PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA / ENGENHARIA ELÉTRICA
Trabalho Final de Curso II

Gabriel Nogueira Barbosa
Lucas Pimenta Cardoso

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA AS DISCIPLINAS DE SISTEMAS DE CONTROLE COM IDENTIFICAÇÃO DE PLANTA E PROJETO DE CONTROLADOR PID VIA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Trabalho Final de Curso II como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica apresentado à Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Antônio de Sousa – Orientador. ENG-PUC Goiás.
Prof. Dr. Bruno Quirino de Oliveira – ENG-PUC Goiás.
Prof. Dr. Antônio Marcos de Melo Medeiros – ENG-PUC-Goiás.
Prof. Msc. Carlos Alberto Bezerra – ENG-PUC Goiás.

Goiânia, 01 de dezembro de 2020.

Desenvolvimento de uma bancada didática para as disciplinas de sistemas de controle com identificação de planta e projeto de controlador PID via simulação computacional.

GABRIEL NOGUEIRA BARBOSA, LUCAS PIMENTA CARDOSO, MARCOS A. SOUSA

Abstract— This course conclusion work presents the development of a didactic system to support disciplines that address topics of study on automatic control systems with application in experimental laboratories. The system allows the validation of analysis and design techniques strongly disseminated in specialized literature, with the objective of making the dynamic control of a physical plant. Two lines of development are outlined. First: model and implementation of a physical plant. The transfer function of the plant is specified using classical modeling and system identification techniques. Second: model, design and implementation of compensators. Several study scenarios are evaluated via computational simulation of the electronic circuits developed together with their respective mathematical models. The results presented and discussed allow us to glimpse the great application potential of the developed system.

Keywords − Control systems, teaching kit, classic controllers

Resumo − Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de um sistema didático para apoiar disciplinas que abordam temas de estudo sobre sistemas de controle automático com aplicação em laboratórios experimentais. O sistema permite validar técnicas de análise e projeto fortemente difundidas na literatura especializada, com o objetivo de se fazer o controle dinâmico de uma planta física. Duas linhas de desenvolvimento são delineadas. Primeiro: modelo e implementação de uma planta física. A função de transferência da planta é especificada utilizando modelagem clássica e técnicas de identificação de sistemas. Segundo: modelo, projeto e implementação de compensadores. Diversos cenários de estudo são avaliados via simulação computacional dos circuitos eletrônicos desenvolvidos em conjunto com seus respectivos modelos matemáticos. Os resultados apresentados e discutidos permitem vislumbrar o grande potencial de aplicação do sistema desenvolvido.

Palavras-chave – Sistemas de controle, planta didática, controladores clássicos.

I. INTRODUÇÃO

A aprendizagem sobre sistemas de controle automático requer práticas de laboratório, em que são demonstrados os conceitos trabalhados em sala de aula, bem como suas aplicações em plantas industriais. Naturalmente, o uso de aparatos experimentais torna-se uma exigência incontestável na formação de engenheiro e técnicos da área de controle e automação, bem como na especialização e atualização de profissionais que já atuam no setor.

As práticas de laboratório para atingirem seu objetivo devem ser realizadas, sempre que possível, em plantas didáticas que possam proporcionar aos estudantes e professores um complemento aos conteúdos ministrados nas unidades curriculares, verificando as aplicações que estejam em consonância com a realidade do mercado profissional. Neste sentido, uma abordagem interessante, relacionada à área de educação, pode ser conferida no trabalho de Xueyun [1]. Neste estudo levanta-se a hipótese de que a educação tradicional, relacionada aos estudos, deve estar aliada a atividades de lazer e entretenimento e dessa forma incentivar o estudante a mostrar apreciação, interesse e suas habilidades. Por conseguinte, de uma maneira geral, a aplicação prática de conceitos teóricos consolida as ideias, direcionando o aprendiz quanto às tarefas realizadas pelo engenheiro, conforme o seu campo de atuação.

Entre algumas das dificuldades de se intensificar o uso de plantas industriais nas disciplinas de controle e servomecanismo está o preço dos *kits* comerciais. Outras limitações que podem ser acusadas referem-se aos custos de instalação, operação e manutenção, o número de pessoas que efetivamente utilizam o equipamento, espaço físico do laboratório e a quantidade de equipamentos disponíveis [2].

Sabendo-se da necessidade e da importância de se aplicar o conhecimento teórico em uma situação real e das dificuldades de se adquirir *kits* didáticos comerciais, este trabalho apresenta como proposta a montagem de uma bancada didática a ser utilizada no ensino, treinamento e pesquisa das disciplinas Sistemas de Controle I e II, dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação, da Escola de Engenharia (EENG), da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-Goiás). Trata-se de uma planta didática para ensino de estratégias de controle com uma variável de entrada e uma variável de saída. Neste sistema, um conjunto composto de circuito eletroeletrônico e computador é usado para a assimilação das principais técnicas de controle e identificação, normalmente ensinadas nestes cursos de graduação.

A bancada didática aqui proposta visa atender critérios como fácil construção, assimilação de conceitos físicos e demonstrar didaticamente a operação de diversos componentes de controle, dentre outros. Esse trabalho engloba modelos aplicáveis ao contexto do engenheiro eletricista e de automação – como controle de motores elétricos, uso de sensores e circuitos eletrônicos para observação de fenômenos físicos – além de explorar aspectos construtivos que fazem parte do contexto da engenharia. Este

trabalho prevê ainda a aplicação de técnicas de identificação de sistemas para modelagem de funções de transferência.

Nas seções seguintes serão detalhadas as etapas de construção e aplicações da bancada didática, descrevendo a modelagem implementada, além do projeto e simulação dos controladores analógicos. Por fim, são descritos os resultados e as conclusões gerais sobre o trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A evolução tecnológica, com a integração de sistemas computacionais, microprocessadores e redes de comunicação, assegura a prática de técnicas de ensino de sistemas de controle digital que se tornaram essenciais para a formação e atuação do engenheiro. Graças às vantagens oferecidas por sistemas controlados por computador, dentre elas robustez, precisão e performance ótima [3], aliadas ao custo cada vez mais reduzido de sistemas computadorizados e às melhorias práticas ao se trabalhar com sinais digitais, os controladores digitais possibilitam vasta aplicação atualmente, desde o manejo de braços robóticos a sensores inteligentes de vazão de fluidos em processos industriais.

Concomitante com a evolução tecnológica, mantem-se, não menos importante, a necessidade de estudo das técnicas de controle clássico para tratamento de plantas e sistemas. Estas técnicas continuam sendo utilizadas e ensinadas até os dias atuais [4], como base da teoria de controle linear no domínio contínuo. Esta prática visa garantir uma formação completa e robusta para o futuro profissional no que tange, principalmente, aos conceitos fundamentais sobre modelagem de sistemas físicos, com o estudo de parâmetros que avaliam as medidas de desempenho operacional dos sistemas projetados. As seções seguintes listam estes conceitos fundamentais da teoria clássica de sistemas de controle linear e invariante no tempo e que formam a base conceitual dos modernos sistemas de controle digital.

A. Sistema de controle

Um sistema de controle é definido como um conjunto de subsistemas e processos (plantas) que juntos, a partir de uma entrada, fornecem uma saída específica de um sistema [4]. A entrada pode ser entendida como uma resposta desejada e a saída como uma resposta real [4]. Adicionalmente, o processo de controle está relacionado às ações necessárias para que o sistema atinja as características de desempenho desejadas. Em sistemas de controle é importante identificar e destacar os seguintes conceitos e elementos:

Sistema de controle em malha aberta (MA)

Sistemas de controle em malha aberta são sistemas em que o sinal de saída não exerce ação de controle no sistema, ou seja, não há realimentação. Isso quer dizer que o sinal de saída não tem efeito na ação de controle e não é usado para ser comparado com o sinal de entrada. Desta forma, a precisão desse sistema depende de uma boa calibração [3]. A figura 1 descreve um sistema de controle em malha aberta utilizando diagramas de blocos. Nesta configuração caso ocorra perturbações, ou distúrbios, nenhuma ação vai ser tomada para que se corrija este problema [3].

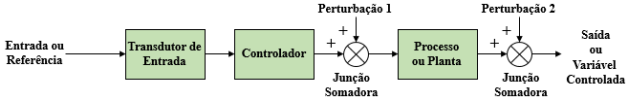


Figura 1. Diagrama de blocos – sistema de controle em malha aberta [4].

Sistema de controle em malha fechada (MF)

Sistemas de controle em malha fechada são aqueles em que o sinal atuante no controlador é constituído pela diferença entre o sinal desejado e a saída real do sistema. O objetivo, então, é minimizar esta diferença, que pode ser vista como um erro, e ajustar o valor de saída do sistema de acordo com o valor desejado (de referência) na entrada. Nesse tipo de sistema, são utilizados sensores, que medem a resposta da saída e, em seguida, convertem o sinal para a forma utilizada pelo controlador [4]. A figura 2 descreve um sistema de controle em malha fechada utilizando diagramas de blocos. Adicionalmente, os sistemas de malha fechada possuem a vantagem óbvia de apresentar uma acurácia superior à dos sistemas de malha aberta. Eles são menos sensíveis a ruídos, perturbações e alterações do ambiente [3].

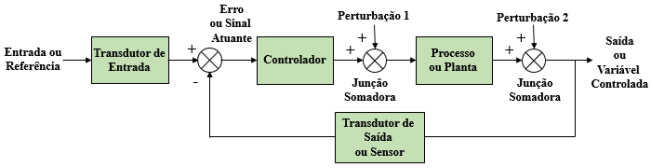


Figura 2. Diagrama de blocos – sistema de controle em malha fechada [4].

B. Planta física

Consiste em um conjunto de partes que interagem para realizar determinada operação. Trata-se de um objeto físico a ser controlado, que é constituído por um equipamento ou um conjunto de componentes de um equipamento implementado para operar de forma integrada, com o objetivo de realizar determinada operação.

Variáveis de Processo (PV) e Variável Manipulada (CV)

Processo pode ser entendido como toda operação a ser controlada. Já as variáveis de processo são todas aquelas grandezas físicas que fazem parte do processo. Estas variáveis podem ser: nível, temperatura, pressão, vazão, pH, tensão, corrente elétrica etc. O processo pode ser controlado medindo estas grandezas físicas e aplicando-se ações para alterá-las conforme desejado. Variáveis de processo também podem ser chamadas de variáveis controladas. Segundo Ogata [3], "Normalmente, a variável controlada é a saída do sistema. A variável manipulada é uma grandeza constantemente modificada pelo controlador, visando afetar o valor da variável controlada". Em outras palavras, o controlador atua diretamente aplicando ações de controle na variável manipulada de modo que a variável de processo alcance e se mantenha no valor desejado.

Função de transferência

Denomina-se função de transferência de um sistema linear, de parâmetros concentrados, invariantes no tempo e de entrada e saída únicas a relação entra as transformadas de *Laplace* da variável de saída e da variável de entrada, supondo as condições iniciais nulas [6]. Geralmente, a função de transferência de um sistema de controle é alcançada aplicando-se a transformada de Laplace na equação diferencial ordinária que modela o sistema, admitindo condições iniciais nulas. Sistemas de controle em malha fechada, com realimentação negativa, conforme descrito na figura 3, possuem a seguinte função de transferência, T(s), que relaciona o sinal de saída Y(s) com o sinal de entrada R(s):

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (1)$$

Onde G(s) representa a função de transferência da planta e H(s) a função de transferência que modela o processo de realimentação ou retroação.

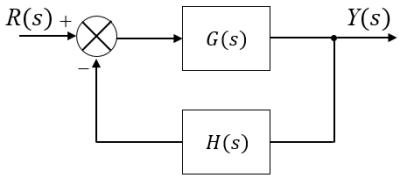


Figura 3. Sistema de controle com realimentação unitária negativa [4].

É importante enfatizar que a aplicação da função de transferência se limita a sistemas de equações diferenciais lineares invariantes no tempo. A função de transferência é uma característica intrínseca do sistema, que independe da natureza do sinal de entrada ou de excitação. Caso a função de transferência de um sistema não seja conhecida, ela pode ser determinada experimentalmente através das técnicas de identificação de sistemas, com a utilização de entradas conhecidas e da análise das respectivas respostas do sistema [3].

Estabilidade

A estabilidade de um sistema é a especificação mais importante. E de acordo com Nise [4], um sistema linear invariante no tempo é considerado estável se a resposta natural do sistema tende a zero quando o tempo tende ao infinito. Com a utilização de realimentação se torna possível estabilizar processos instáveis, ajustando parâmetros com finalidade de adaptar o desempenho em regime transitório. Para processos que já são estáveis em malha aberta, utiliza-se também a realimentação para ajustar o desempenho de modo alcançar especificações de um dado projeto [7].

Um sistema de controle normalmente possui energia interna armazenada. Esta energia armazenada impede que a saída do sistema siga a entrada imediatamente. Consequentemente, quando se aplica um sinal de controle o sistema necessita de algum tempo para responder ao estímulo. A saída ao atingir o regime permanente, poderá conter, então, um erro devido a este atraso. Este erro é denominado erro estacionário. De posse da função de transferência do sistema, pode-se, a partir de funções de teste [4], obter as características de resposta transitória e permanente do sistema.

Medidas de desempenho - Sistema de 2ª Ordem

Um sistema de segunda ordem, com retroação a malha fechada, tem seu sinal de saída modelado como [7]:

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}R(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}R(s) \quad (2)$$

Que para uma entrada degrau unitário R(s) = 1/s, fica:

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)} \quad (3)$$

Onde:

ζ: representa a relação de amortecimento do sistema;

ω_n: representa a frequência natural de oscilação do sistema.

As raízes da equação característica (polos de malha fechada do sistema) são:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{(\zeta^2-1)} \quad (4)$$

O sistema de 2ª Ordem, modelado pela equação (3), possui resposta completamente influenciada pelos parâmetros ζ e ω_n. Constata-se que:

- Caso 1 – Resposta Superamortecida: quando ζ>1, os polos são reais, negativos e distintos;
- Caso 2 – Resposta Subamortecida: quando 0<ζ<1, os polos são complexos conjugados;
- Caso 3 – Resposta sem Amortecimento: quando ζ=0, polos puramente imaginários;
- Caso 4 – Resposta Criticamente Amortecida: quando ζ=1 - as raízes são reais e iguais.

Uma vez que em aplicações práticas em problemas físicos o cenário mais provável de ocorrência é aquele em que se têm polos complexos conjugados, vale destacar aqui as medidas de desempenho para esta categoria de sistemas subamortecidos. Estes sistemas possuem como resposta para uma entrada degrau unitário [4]:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)} \quad (5)$$

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{(1-\zeta^2)}}e^{-\zeta\omega_n t}cos\left[\left(\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)}\right)t-\varphi\right]$$

$$\text{Onde: } \varphi = tg^{-1}\left(\frac{\zeta}{\sqrt{(1-\zeta^2)}}\right) \quad (6)$$

Vale observar que o sistema possui uma resposta transitória com oscilação senoidal amortecida. Em regime permanente, *t* tendendo ao infinito ($t \rightarrow \infty$), não existe erro entre a entrada e a saída [3].

Os índices de desempenho de um sistema são utilizados, normalmente, para determinar a qualidade da resposta. A figura 4 lista as principais medidas de desempenho para um sistema de 2ª ordem com resposta subamortecida,

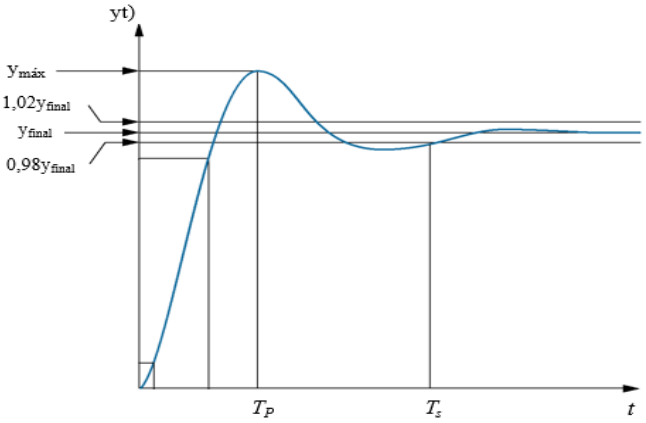


Figura 4. Medidas de desempenho para um sistema subamortecido.

Onde:

Tempo de Acomodação – **Ts**: tempo necessário para que o sistema atinja o valor de regime em torno do valor do degrau unitário. Existe um valor de tolerância de até 2% acima ou abaixo do valor de regime, para que se considere uma variação aceita. O valor do tempo de acomodação pode ser calculado de forma simplificada por [4]:

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (7)$$

Tempo de Pico – **Tp**: o tempo de pico pode ser compreendido como o tempo transcorrido até atingir o primeiro pico de sinal, ou valor máximo. O valor do tempo de pico pode ser calculado de forma simplificada por [4]:

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)}} \quad (8)$$

Sobressinal Máximo - %UP: representa o quanto a forma de onda, no instante de pico, ultrapassa o valor de estado estacionário (Valor Final), expresso como uma percentagem do valor de estado estacionário. Este valor, em muitos casos, está associado a questões de segurança, tais como tensão máxima que um circuito pode suportar, máxima deformação que uma estrutura pode suportar sem que haja ruptura do material, entre outros. O sobressinal máximo também pode ser compreendido como a Ultrapassagem Percentual (%UP) e pode ser expressa por [4]:

$$\%UP = \frac{y(Tp)-y(\infty)}{y(\infty)} x100\% \quad (9)$$

$$\%UP = e^{-\zeta\pi/\sqrt{(1-\zeta^2)}} x100\% \quad (10)$$

C. Ações de controle PID

O controlador é um dispositivo que mantém a variável de processo num valor pré-determinado. É um instrumento que compara o valor da variável de processo (sinal de saída) com o set-point (valor de referência na entrada) e exerce uma ação corretiva na variável manipulada (MV) [5]. O controlador tem um sinal de saída que pode ser variado para manter a variável controlada (PV) dentro de um limite específico ou para alterá-la de um valor previamente estabelecido [5]. A figura 5 mostra as possíveis ações de controle que podem ser aplicadas em sistemas automatizados industriais e que são descritas a seguir. Estas ações de controle estão representadas através de funções de transferência e estão descritas a seguir.

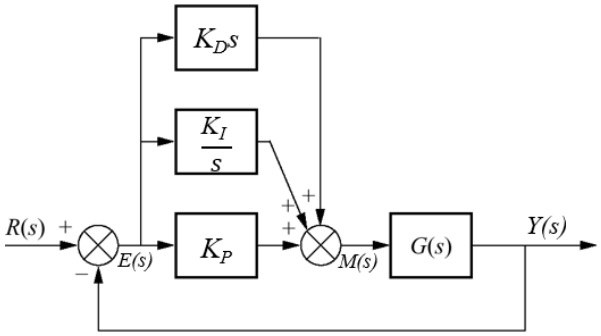


Figura 5. Diagrama de blocos do sistema com controlador PID.

- **Ação proporcional (P)**: atua no processo fazendo com que a ação na saída do controlador seja proporcional ao sinal de erro na entrada desse. Desta forma, quanto maior for o erro na entrada do controlador, maior será o sinal de correção na saída dele [3];
- **Ação proporcional-integral (PI)**: gera na saída do controlador uma ação proporcional ao erro e proporcional à integral do erro. A função da ação do termo integral é eliminar o erro em regime permanente. Em geral esse controlador apresenta baixo sobressinal e tempo de subida e estabilidade elevada [3];
- **Ação proporcional-derivativa (PD)**: tem como finalidade antecipar a ação de controle, atuando na variação do erro conforme o tempo. Deve ser empregada em processos lentos onde o tempo de retorno ao *set-point* (SP) seja demorado e a ação derivativa antecipe esse acontecimento [3]. A ação derivativa nunca é usada isoladamente, sendo combinada com a ação proporcional (PD) ou com as ações proporcional e integral juntas (PID);
- **Ação proporcional-integral-derivativa (PID)**: é uma operação em conjunto do controle proporcional (P), do controle integral (I) e do controle derivativo (D). O controle proporcional produz em sua saída um sinal de controle que é proporcional ao erro sendo esta proporcionalidade de ganho representada por uma constante Kp que define o ganho do controlador. Já o controle integral produz em sua saída um sinal proporcional à integral do erro e o valor do ganho integral é dado pela constante Ki. Este tipo de controlador minimiza os erros de regime permanente do sistema, entretanto sua ação de resposta é lenta. Por fim, o controle derivativo produz em sua saída a derivada do erro e o valor do ganho derivativo é dado pela constante Kd. Este tipo de controlador proporciona uma ação bastante rápida sempre que ocorrerem variações na saída, entretanto não minimiza os erros em regime permanente.

Matematicamente, a equação que modela a ação combinada de controle proporcional, controle integral e de controle derivativo pode ser descrita por [3]:

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Onde:

m(t): representa o sinal de saída do controlador PID;

e(t): representa o sinal atuante no controlador PID.

Portanto a função de transferência do controlador PID da figura 5 fica, aplicando Laplace [4]:

$$G(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (12)$$

$$G(s) = \frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_d\left(s^2+\frac{K_p}{K_d}s+\frac{K_i}{K_d}\right)}{s} \quad (13)$$

Portanto, a função de transferência do controlador PID possui dois Zeros e mais um Polo na origem. Um Zero e o Polo na origem podem ser projetados como o compensador Integral Ideal; o outro Zero pode ser projetado como o Compensador Derivativo Ideal.

D. Técnicas de calibração de um PID

Em sintonia de controladores, quando existe a viabilidade de se obter o modelo matemático da planta, é possível aplicar diversas técnicas de projeto para ajustar os valores dos parâmetros do controlador PID. O lugar geométrico das raízes e a resposta em frequência são exemplos de técnicas que podem ser aplicadas. Entretanto, existem situações em que a planta física possui complexidade muito elevada, inviabilizando a obtenção de sua função de transferência. Nestas condições, pode ser aconselhável o uso de técnicas de identificação de sistemas para a modelagem matemática da função de transferência da planta.

Além disso, não se recomenda aplicar a mesma abordagem analítica que é utilizada quando se tem o modelo

matemático da planta. Nestes ambientes, a sugestão é recorrer a métodos experimentais de sintonia de controladores PID, com destaque para os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols [3].

III. METODOLOGIA

Com o intuito de melhorar a qualidade das aulas práticas, da Escola de Engenharia, da PUC-Goiás, foi desenvolvido o projeto e a construção de uma planta eletroeletrônica didática para ensino experimental nas disciplinas de sistemas de controle. O projeto foi dividido nas seguintes etapas: planejamento e projeto da planta, simulação computacional dos circuitos eletroeletrônicos da planta [9], estudo sobre as mais diversas estratégias de controle, especificação e calibração de controladores, simulação computacional das estruturas de controle e das técnicas de identificação de sistemas desenvolvidas.

A implementação de uma estrutura de compensação PID possibilita explorar conceitos da área de sistemas de controle, tais como estabilidade, critérios de desempenho em regime permanente e transitório, Lugar Geométrico das Raízes (LGR), gráficos de Bode, métodos de sintonia de controladores PID, dentre outros. Toda a estrutura está sendo implementada de forma modular com o intuito de favorecer o desenvolvimento das atividades práticas de acordo com a planta utilizada e o sistema de compensação adequado para cada cenário de análise e projeto.

A. Projeto e montagem da planta didática

A configuração da planta didática a ser implementada pode ser conferida na figura 6. Tem como objetivo demonstrar didaticamente a operação de um sistema físico e avaliar conceitos fundamentais de um sistema de controle linear e invariante no tempo. Entre estes conceitos, pode-se destacar: função de transferência, estabilidade, medidas de desempenho de sistemas de 2ª ordem.

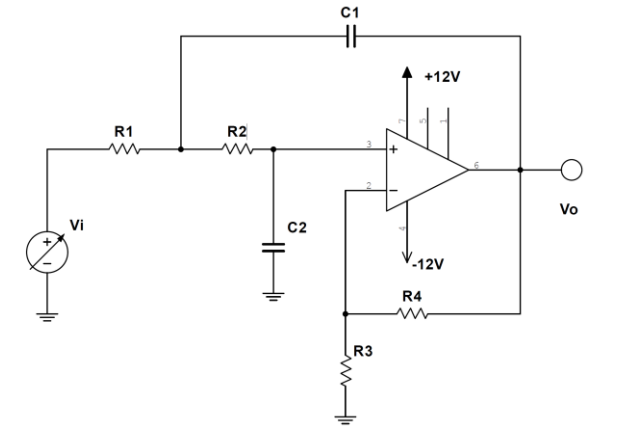


Figura 6 – Planta – circuito elétrico.

Função de transferência da planta

Um sistema pode ser modelado matematicamente de tal forma que seu comportamento dinâmico possa ser caracterizado com precisão razoavelmente boa. A dinâmica de um sistema seja ele físico, químico, econômico ou qualquer outro, pode ser definida utilizando-se equações diferenciais. Para-se obter tais equações, utiliza-se as leis que regem o sistema, como as leis de Kirchhoff para circuitos elétricos, as leis de Newton para sistemas mecânicos, entre outras. Para a planta eletroeletrônica da figura 6 utiliza-se a Lei de Kirchhoff das correntes.

Com a finalidade de se obter a função de transferência do sistema elétrico representado na figura 6, obteve-se a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada do sistema [3][4]. A análise é realizada com todos os componentes modelados no domínio "s", domínio de Laplace, em que resistores e capacitores são reconhecidos por suas respectivas impedâncias. Para efeito de cálculo, são utilizados os parâmetros de um amplificador operacional ideal.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{K}{s^2[R_1R_2C_1C_2]+s[C_2(R_1+R_2)-R_1C_1(K-1)]+1} \quad (14)$$

Onde:

$$K = \frac{R_3+R_4}{R_3} = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (15)$$

Modelagem do controlador PID

A partir das configurações básicas de ação (vide apêndice 1) projetou-se o controlador PID visto na figura 7. A função de transferência do circuito PID corresponde a soma das contribuições do amplificador proporcional, do amplificador integrador e do amplificador derivativo. É utilizado um circuito amplificador-somador que inverte o sinal de saída dos controladores que é aplicado na entrada na planta (vide apêndice 2). As funções de transferência para os controladores, seguindo a nomenclatura da figura 5, ficam [4]:

- Controlador Proporcional (P):

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \left[\frac{R_{F1}}{R_{E1}}\right] \quad (16)$$

- Controlador Proporcional-Integral (PI):

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \left[\frac{R_{F2}}{R_{E1}}\frac{\left(s+\frac{1}{R_{F2}C_{F2}}\right)}{s}\right] \quad (17)$$

- Controlador Proporcional-Derivativo (PD):

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \left[R_{F3}C_{E3}\left(s+\frac{1}{R_{E3}C_{E3}}\right)\right] \quad (18)$$

- Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID):

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \left[\left(\frac{R_{F4}}{R_{E4}}+\frac{C_{E4}}{C_{F4}}\right)+(R_{F4}C_{E4})s+\frac{\left(\frac{1}{R_{E4}C_{F4}}\right)}{s}\right] \quad (19)$$

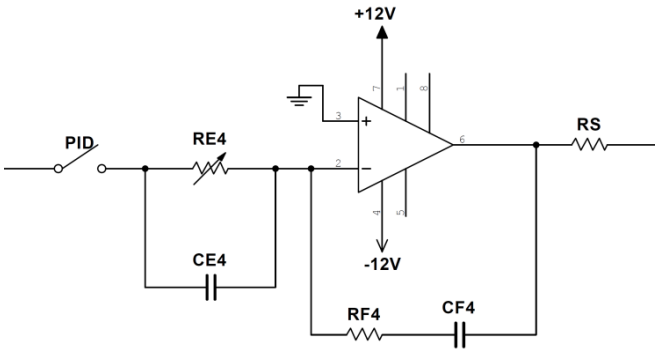


Figura 7 – Controlador PID - circuito elétrico.

Placas de circuito impresso

A partir das configurações do circuito elétrico da Planta (figura 6) e do Controlador PID (figura 7), projetou-se o PCB (*Printed Circuit Board* – Placa de Circuito Impresso) dos circuitos eletrônicos a serem impressos, conforme figuras 8 e 9. As demais placas do sistema didático, estão disponíveis no apêndice 3.

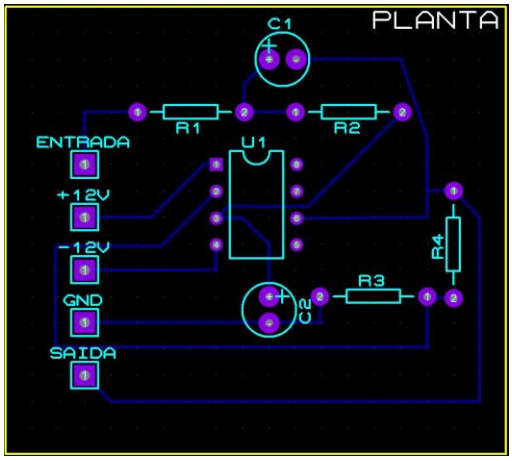


Figura 8 – PCB da Planta.

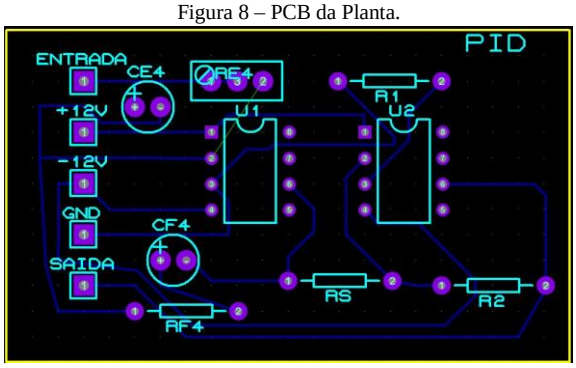


Figura 9 – PCB do PID.

B. Técnicas de Identificação de Sistemas

É comum encontrar dificuldade com os primeiros passos da sequência de análise e projeto de um sistema de controle, principalmente durante a etapa de transformação de um sistema físico em um esquema. A modelagem matemática pode requerer muitas hipóteses simplificadoras baseadas na experiência do projetista. Essa dificuldade se intensifica quando o estudo exige a obtenção de função de transferência de um sistema de controle constituído por uma diversidade de componentes implementados de forma modular. Neste cenário, identificar e descrever matematicamente a relevância e as relações que regem o comportamento físico de cada elemento dentro do contexto global do sistema desenvolvido é uma tarefa de enorme dificuldade de execução. Nestas condições, o uso de técnicas de identificação de sistemas permite agilizar o processo de modelagem da função de transferência com alto grau de confiabilidade.

Apesar de ser um software pago, a utilização do Matlab [8] se fundamenta devido a sua ampla utilização no meio acadêmico e por possuir uma ampla gama de pacotes que permitem trabalhar com identificação de sistemas, sintonia de controladores, geração de diagramas de Bode e LGR de forma otimizada.

Neste caso, foi utilizado como ferramenta de identificação de sistemas a Toolbox "*System identification*" do Matlab. Esse método, utiliza as entradas conhecidas e a análise das respectivas respostas do sistema [3]. Ressalta-se que esses dados podem ser obtidos experimentalmente. A figura 10 mostra a Toolbox do Matlab.

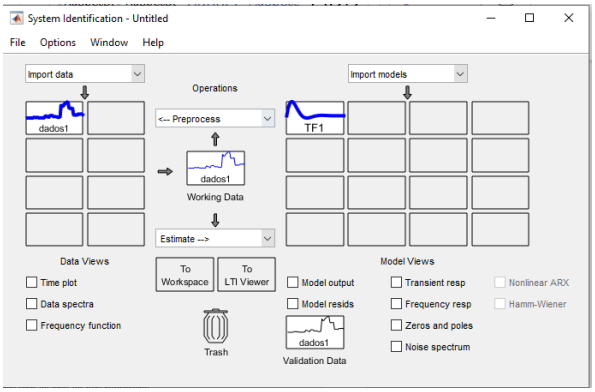


Figura 10 – Toolbox "System identification" – Página Inicial.

Na figura 10, pode se destacar alguns objetos, no qual são fundamentais para a identificação da função de transferência:

- *Import Data*: dados de entrada e saída (medidos) na planta, a serem importados pela Toolbox, no qual devem ser inseridos previamente na Workspace do Matlab em formato de matriz coluna;
- *Time Plot*: gráfico do sinal de entrada e saída fornecido;
- *Working Data*: dados a serem usados na estimativa;
- *Estimate*: modelo de estimativa a ser realizado. No caso em questão é utilizado o "*Process Models*";
- *TF1*: Função de Transferência estimada;
- *To LTI Viewer*: fráfico da Função de Transferência Estimada em malha aberta, em relação à entrada degrau.

Após inserir os dados e selecionar o modelo de estimativa, a Toolbox abre uma nova tela (figura 11), com parâmetros que podem ser configurados.

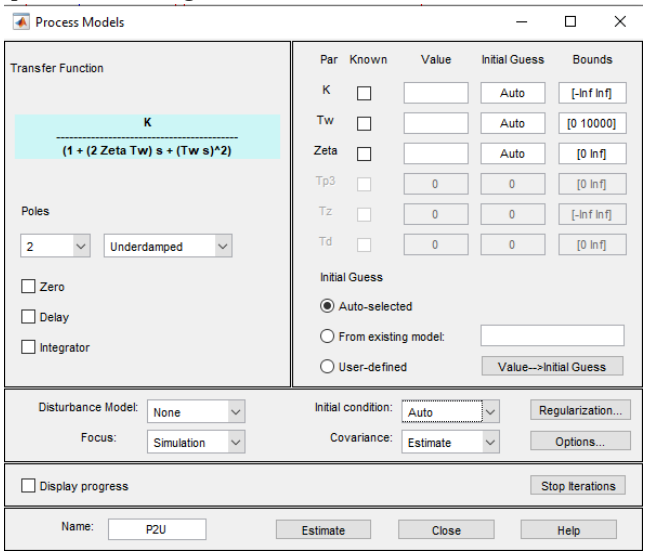


Figura 11 – Toolbox "System identification" – Process Models.

Nessa tela (figura 11), sugere-se a seleção e o preenchimento das seguintes informações:

- *Poles*: quantidade de Polos da função a ser estimada;
- *Underdamped / All Real*: tipo do sistema previsto, sendo eles: Subamortecido e Superamortecido ou Criticamente Amortecido, respectivamente;
- *Zeta*: valor correspondente à ultrapassagem percentual *%UP*;
- *Initial Condition*: condição do sistema inicialmente;
- *Estimate*: simulação para estimativa da função de transferência.

IV. CENÁRIOS AVALIADOS

Através da implementação de uma planta e de uma estrutura de compensação PID, pretende-se explorar conceitos tais como: estabilidade, medidas de desempenho em regime permanente e transitório, Lugar Geométrico das Raízes (LGR), efeitos das ações de controle P. PI, PD e PID, métodos de projeto de controladores PID, dentre outros.

Os cenários de análise estão divididos de acordo com a planta utilizada e o sistema de compensação projetado. Além disso, há a implementação e análise da técnica de identificação de sistemas como forma alternativa para especificar a função de transferência da planta.

Neste trabalho de conclusão de curso, com o objetivo de se estudar os conceitos fundamentais sobre sinais e sistemas lineares, são utilizados a planta em conjunto com as estruturas de compensação analógicas clássicas, com destaque para o controlador PID.

Os cenários avaliados são:

- Confrontar o desempenho entre o circuito elétrico e simulação utilizando o modelo matemático da planta;
- Verificar a estabilidade do sistema via simulação da planta física e modelo matemático;
- Analisar a resposta da planta em malha aberta e em malha fechada: o objetivo é verificar as medidas de desempenho da planta física sem compensação e confrontar com as técnicas de análise teórica;
- Avaliar a ação de Controle Proporcional (P);
- Avaliar a ação de Controle Proporcional-Integral (PI);
- Avaliar a ação de Controle Proporcional-Derivativo (PD);
- Avaliar a ação de Controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID);
- Projetar um compensador PID, utilizando a técnica de Lugar das Raízes, para atender uma aplicação específica do sistema.
- Identificar a função de transferência da planta: o objetivo é confrontar a modelagem matemática a partir de relações físicas no próprio circuito elétrico com a função de transferência obtida por técnicas de identificação de sistemas;

V. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O software MultiSim é uma ferramenta computacional para análise de circuitos eletrônicos [9]. Através dele é possível se obter uma avaliação do desempenho do circuito eletrônico final por meio de simulações. Dessa forma, pode-se avaliar os circuitos que executariam as funcionalidades avaliadas pelo Simulink do MatLab, por exemplo. Com esta atividade pretende-se minimizar a possibilidade de erros de engenharia ainda no processo de concepção do projeto. Utilizou-se, assim, o software MultiSim para avaliar as respostas da planta em conjunto com as estruturas de compensação PID. Além disso, o software *Proteus Design Suite* [10] foi utilizado para a simulação e processo de modelagem do circuito impresso (PCB).

Os cenários de análise listados na seção V passam, inicialmente, por este processo de simulação para posterior montagem e análise experimental de desempenho dos sistemas propostos.

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos sistemas que serão montados, os processos de simulação computacional e análise já contemplam os circuitos eletrônicos constituídos por componentes comerciais.

Esta abordagem valoriza o processo de ensino-aprendizagem, uma vez que permite contextualizar os fundamentos básicos da teoria de controle com técnicas de análise avançada, disponível nas plataformas de simulação de circuitos eletrônicos. Isto representa uma bagagem intermediária importante entre a teoria e a experimentação laboratorial. A confirmação prática, precedida da experimentação virtual, possibilita uma assimilação mais aprofundada de conceitos fundamentais e de técnicas de abordagem e análise.

A figura 12 lista a planta com componentes comerciais, estudada neste trabalho. A estrutura formada para o acionamento das ações de controle pode ser conferida nos apêndices 1 e 2. Na seção seguinte são apresentados os resultados das simulações com as implicações decorrentes das análises realizadas.

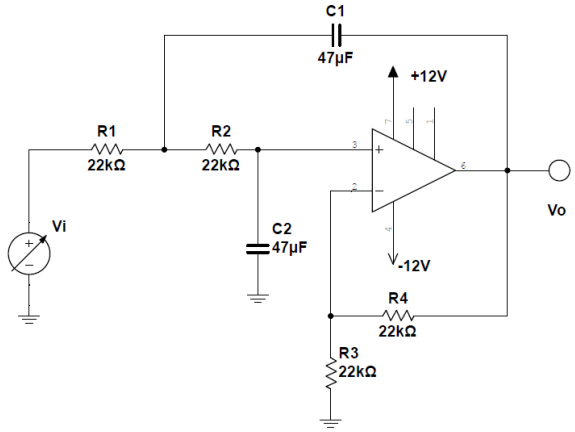


Figura 12 – Circuito elétrico da planta com componentes comerciais.

VI. RESULTADOS

Para extrair mais informações sobre os sistemas de controle desenvolvidos, realizou-se um estudo sobre suas funções de transferência e consequentemente, com a planta para verificar a correspondência da prática com a teoria.

Nesse sentido, são apresentados os resultados dos testes realizados com a planta, bem como os gráficos gerados pelas simulações computacionais. Uma comparação das respostas obtidas com os conceitos observados na teoria é feita, a fim de validar os resultados obtidos experimentalmente. Como pode ser visto na figura 12 que representa o esquema elétrico da planta utilizada, tem-se no sistema, um sinal de entrada, tensão $v_i(t)$, e um sinal de saída, tensão $v_o(t)$. Portanto, denomina-se que o sistema utilizado é mono variável ou SISO, isto é, de uma entrada e uma saída.

Além disso, a planta foi estimulada com entradas conhecidas e a respectiva resposta correlacionada. A partir dessas informações de entrada e saída extraídas, utilizou-se a Toolbox do Matlab [8] para estimar a respectiva função de transferência.

Função de transferência da planta

Na seção III foi obtida a função de transferência da planta em função das resistências (R1, R2, R3 e R4) e das capacitâncias (C1 e C2). Como o objetivo é realizar a montagem experimental da planta e dos controladores, foram adotados valores comerciais para os componentes eletrônicos presentes no sistema, sendo resistências de 22 kΩ para os componentes R1, R2, R3 e R4 e capacitâncias de 47 µF para os componentes C1 e C2. Consequentemente, pode-se

expressar a função de transferência da planta, em valores numéricos, conforme a expressão:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{2}{s^2[1{,}069]+s[1{,}034]+1} \quad (20)$$

Esta função de transferência de 2ª ordem pode ser melhor ajustada dividindo os termos da equação pelo fator 1,069, que fica:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1{,}871}{s^2+0{,}967s+0{,}935} \quad (21)$$

Estabilidade da planta:

Sobre a estabilidade do sistema em malha aberta, pode-se afirmar que a planta é estável pois a resposta natural do sistema tende à zero conforme o tempo avança. Isto pode ser observado na resposta do sistema para uma entrada degrau unitário, listada na figura 10. Esta confirmação pode ser validada ao analisar os polos da função de transferência do sistema:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)} \quad (22)$$

$$s_{1,2} = \frac{-0{,}967 \pm \sqrt{(0{,}967^2 - 4.1.0{,}935)}}{2.1} \quad (23)$$

$$s_{1,2} = -0{,}484 \pm j0{,}837 \quad (24)$$

Pode-se observar que os polos da função de transferência estão localizados no semiplano da esquerda, validando a informação de estabilidade do sistema.

Além disso, partir do circuito elétrico e função de transferência da planta, foi possível simular a mesma em Malha Aberta e Malha Fechada, conforme figuras 13, 14 e 15.

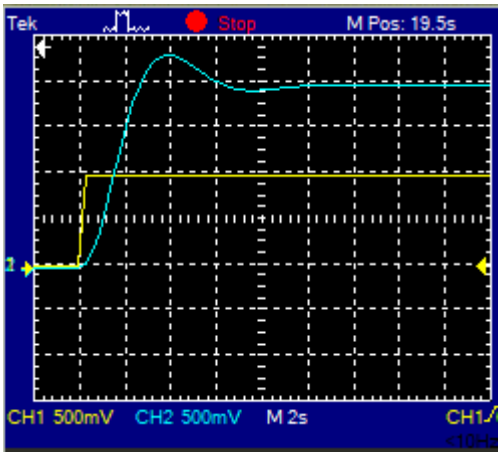


Figura 13 – Resposta da planta em Malha aberta no MultSim – sinal de entrada (cor amarelo) e sinal de saída (cor azul).

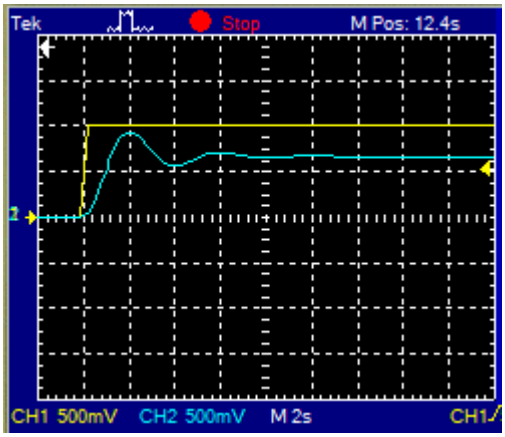


Figura 14 – Resposta da planta em Malha Fechada no MultSim – sinal de entrada (cor amarelo) e sinal de saída (cor azul).

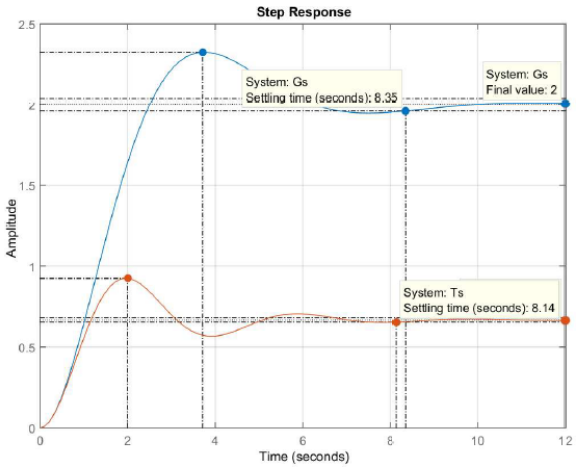


Figura 15 – Resposta da planta no MatLab – Malha Aberta (cor azul) e Malha fechada (cor laranja).

Desempenho da planta:

A figura 16 apresenta a resposta do sistema em malha aberta para uma entrada degrau unitário, obtida com a simulação da função de transferência no MatLab. Alguns pontos da curva são destacados, permitindo que os índices de desempenho do sistema possam ser observados. O tempo de pico (*Tp*) vale 3,7 segundos, O tempo de acomodação (*Ts)* observado teve um intervalo de aproximadamente 8,4 segundos para este índice. Por fim, o sobressinal máximo medido é de aproximadamente %UP=16,3%.

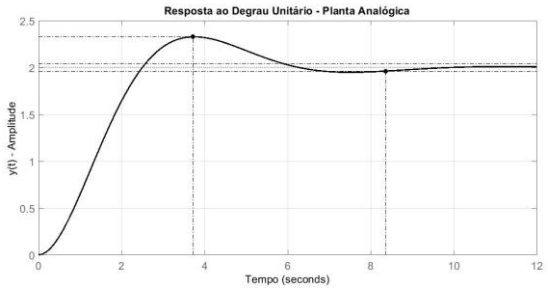


Figura 16 – Resposta da planta em malha aberta no MatLab – medidas de desempenho.

Segue os resultados obtidos das simulações computacionais no software MultSim [8], para cada uma das ações de controle aplicada na planta, conforme configuração de teste indicada na figura 5.

Ação de controle proporcional (P):

A análise do efeito da ação proporcional no controle da planta foi efetuada com a realização de testes em que somente utilizou-se do ganho proporcional como ação de controle (chave "P" fechada), as outras três chaves foram mantidas em aberto. Foram executados testes com o ganho proporcional (P) ajustado em 1, 5 e 10. Os resultados podem ser conferidos nas figuras 17, 18 e 19.

Vale observar que nenhum valor de ganho proporcional foi satisfatório para controlar o sistema. O sinal de saída da planta não alcançou o valor de *set point*, gerando ainda um erro em regime permanente. Nota-se também que a resposta apresenta um maior *overshoot* (sobressinal máximo) e uma maior oscilação conforme o ganho proporcional é

gradualmente aumentado. Com estes resultados pode-se afirmar que as respostas obtidas condizem com o esperado neste trabalho, bem como o encontrado na bibliografia especializada [3][4].

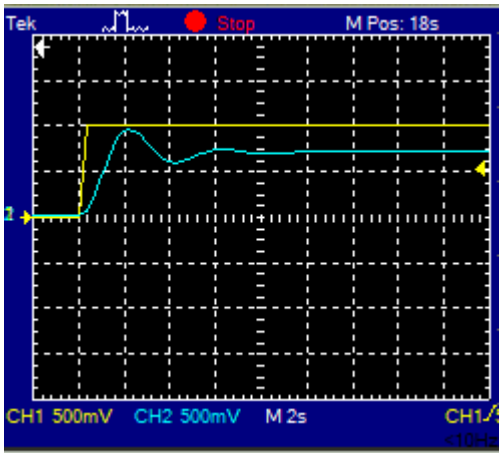


Figura 17 – Resposta da planta com controlador "P" – Ganho=1.

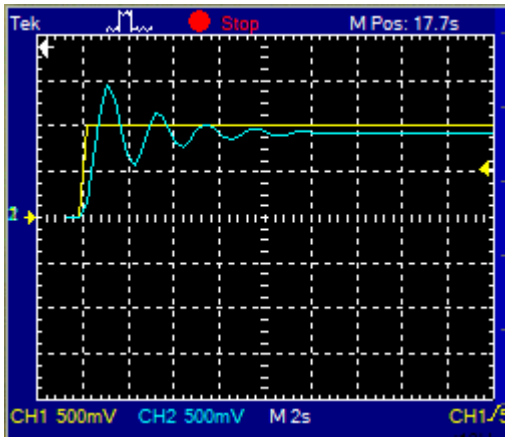


Figura 18 – Resposta da planta com controlador "P" – Ganho=5.

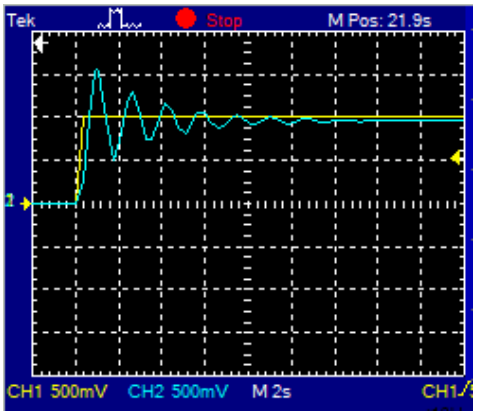


Figura 19 – Resposta da planta com controlador "P" – Ganho=10.

Ação de controle proporcional-integral (PI):

Com a finalidade de avaliar a influência da ação proporcional-integral (chave "PI" fechada), o valor do ganho proporcional-integral foi calibrado em 0,1, 0,5 e 1,0. As outras três chaves foram mantidas em aberto. O resultado para as três curvas obtidas, para o sinal de saída da planta, podem ser conferidas nas figuras 20, 21 e 22. As respostas alcançadas estão de acordo com a teoria de controle, já que a ação proporcional-integral obteve êxito para controlar o sistema, uma vez que o valor de *set point* foi devidamente atingido. Em outras palavras, o erro de estado estacionário foi eliminado pelo efeito da ação integradora, mesmo que com diferentes tempos para atingir tal correção. Vale observar também que para valores de ganho proporcional-integral menores, a resposta obteve um pico de sobressinal pequeno, com poucas oscilações até a estabilização do sinal. Entretanto, nestas condições de ajuste, o tempo de estabilização da resposta do sistema, para que o erro possa ser considerado "nulo", foi relativamente mais alto.

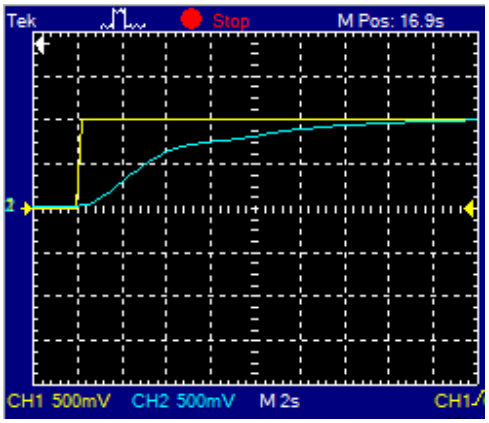


Figura 20 – Resposta da planta com controlador "PI" – Ganho=0,1.

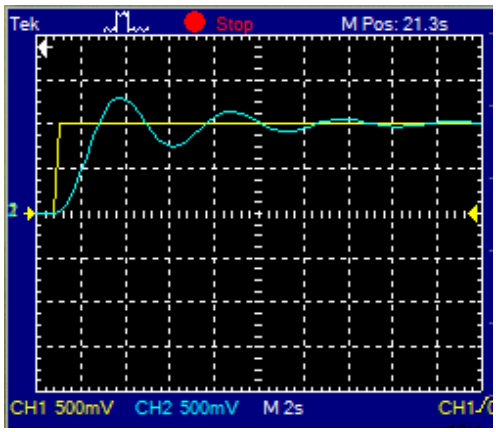


Figura 21 – Resposta da planta com controlador "PI" – Ganho=0,5.

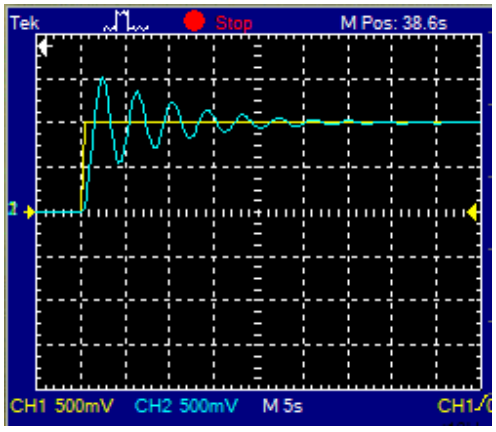


Figura 22 – Resposta da planta com controlador "PI" – Ganho=1,0.

Ação de controle proporcional-derivativa (PD):

Para verificar como a ação proporcional-derivativa atua em um controle da planta, o valor do ganho proporcional-derivativo foi ajustado em 0,0005, 0,0025 e 0,0050 (chave "PD" fechada). As outras três chaves foram mantidas em aberto. As figuras 23, 24 e 25 mostram as formas de onda obtidas para a resposta do sistema. O sinal de saída da planta se comportou de acordo com a resposta esperada e em conformidade com a teoria de controle. Vale destacar que o ganho derivativo é uma ação que visa alterar a sensibilidade da ação de controle e atua nos parâmetros de desempenho da resposta transitória, tais como tempo de acomodação, instante de pico e sobressinal máximo. Portanto, o aumento do ganho

proporcional-derivativo não é suficiente para alcançar o valor de *set point*.

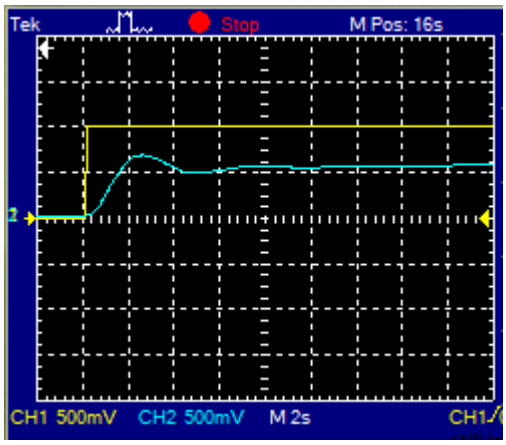


Figura 23 – Resposta da planta com controlador "PD" – Ganho=0,0005.

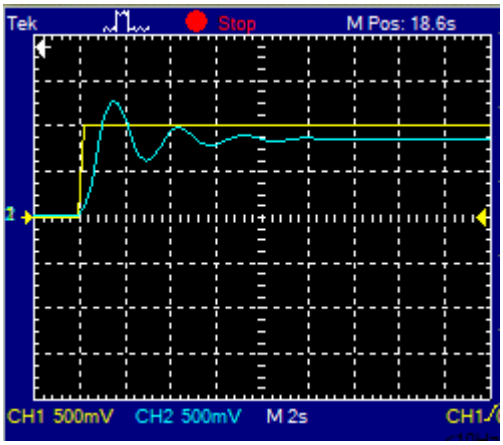


Figura 24 – Resposta da planta com controlador "PD" – Ganho=0,0025.

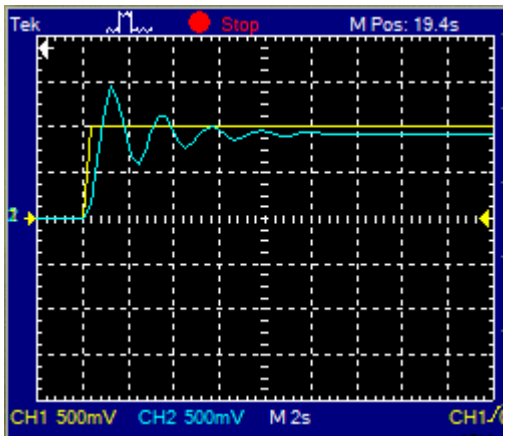


Figura 25 – Resposta da planta com controlador "PD" – Ganho=0,005.

Ação de controle proporcional-integral-derivativa (PID):

Para o ensaio da ação PID o ganho foi ajustado em 11, 21 e 101. O objetivo aqui é garantir que as características e vantagens inerentes de cada uma das ações de controle se faça presente na qualidade da resposta alcançada na saída da planta. Os gráficos das formas de onda obtidas para o sinal de saída da planta podem ser conferidos nas figuras 26, 27 e 28.

As respostas apresentaram pouca oscilação e uma rápida eliminação do erro por conta do ajuste do ganho. Portanto, é importante observar que o sinal de saída do sistema sob a compensação PID obteve o melhor desempenho entre todas as ações de controle. Esta validação é justificada pela utilização conjunta da ação integral (responsável pela correção do erro de estado estacionário) com a ação derivativa (responsável por ajustar o desempenho da reposta transitória).

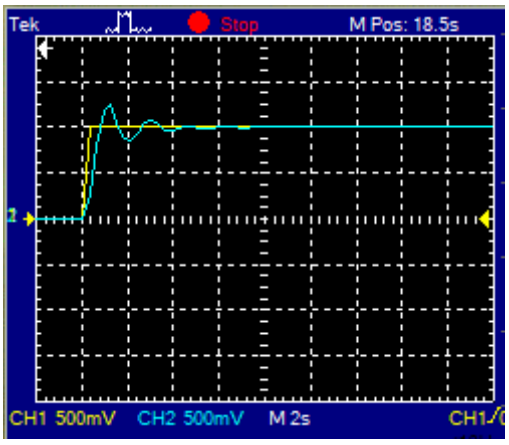


Figura 26 – Resposta da planta com controlador "PID" – Ganho=11.

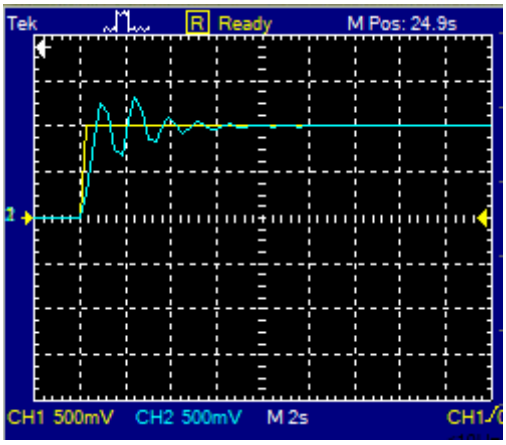


Figura 27 – Resposta da planta com controlador "PID" – Ganho=21.

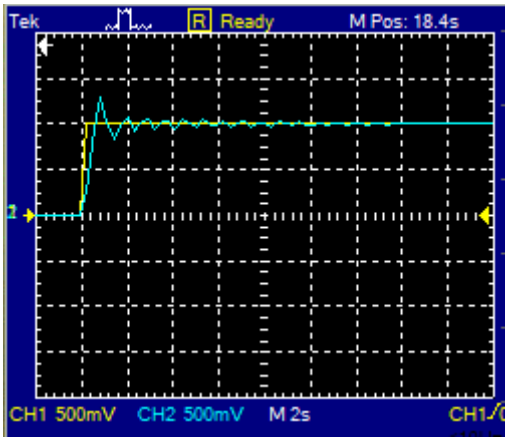


Figura 28 – Resposta da planta com controlador "PID" – Ganho=101.

Projeto de controlador PID via LGR

A fim de verificar a precisão e o uso do Lugar Geométrico das Raízes (LGR), foi especificado a partir da planta didática desenvolvida nesse trabalho, um controlador PID, com o objetivo de eliminar o erro em regime permanente da planta, com o tempo de acomodação (*Ts*) de aproximadamente 5 (cinco) segundos.

A partir dos Polos projetados para atender a especificação de resposta transitória, de acordo com a equação 5, foi encontrado o lugar geométrico das raízes, conforme mostra a figura 29, para projetar o compensador PID descrito pela equação 19, cuja configuração física pode ser conferida na figura 7.

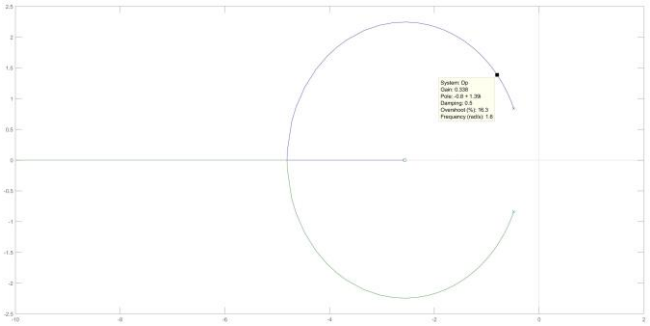


Figura 29 – Lugar das raízes no MatLab para o Polo Projetado.

Com as informações alcançadas do LGR, o PID projetado para corrigir a planta, para atender as especificações solicitadas, apresenta a seguinte função de transferência:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \left[\left(\frac{1k\Omega}{34k\Omega} + \frac{338.5\mu F}{3.9\mu F}\right) + (1k\Omega * 338.5\mu F)s + \frac{\left(\frac{1}{34k\Omega * 3.9\mu F}\right)}{s}\right] \quad (25)$$

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \left[\frac{0.3385s^2 + 0.9028s + 0.0869}{s}\right] \quad (26)$$

Os resultados da simulação computacional via modelo do sistema compensado com PID projetado, conforme topologia de implementação descrita na figura 5, podem ser conferidos nas figuras 30 e 31. Já o resultado da simulação do circuito elétrico formado pelo conjunto controlador PID projetado e planta encontra-se na figura 32. Nesta configuração, o circuito elétrico do compensador PID da figura 7 teve os seus componentes ajustados em aproximadamente RE4 = 35kΩ, RF4= 1kΩ , CE4= 4µF e CF4 = 350µF . Deve ser observada a validação da atuação do controlador PID projetado, tanto em circuito eletrônico quanto modelado matematicamente, visto que a resposta da planta alcança os requisitos de projeto propostos inicialmente.

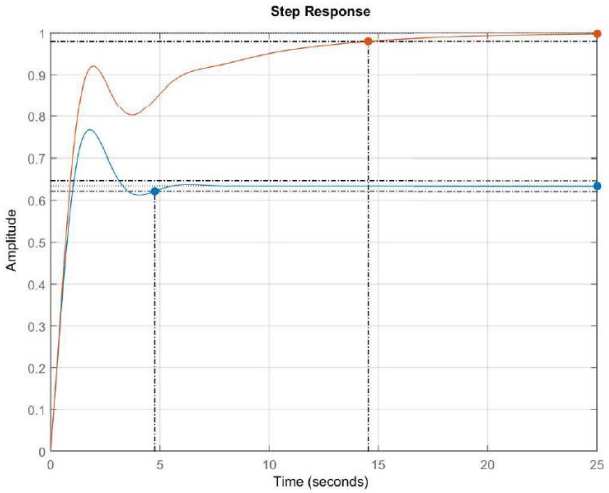


Figura 30 – Resposta da planta no MatLab – Planta com PID Projetado (laranja) – Ganho=0.3; Planta com PD (azul).

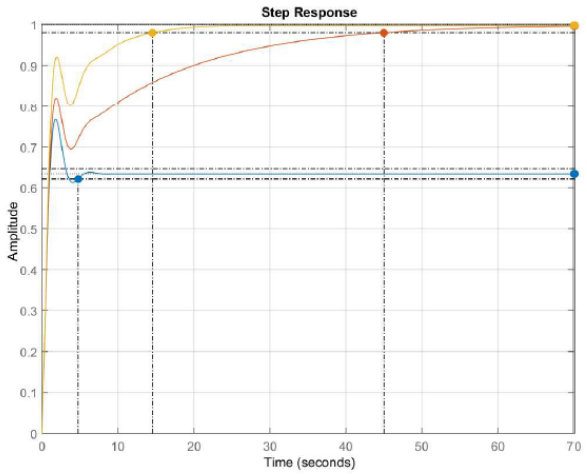


Figura 31 - Resposta da planta no MatLab – Planta com PID Projetado (laranja e amarelo) – Ganhos=0.3 e 0.1, respectivamente; Planta com PD (azul).

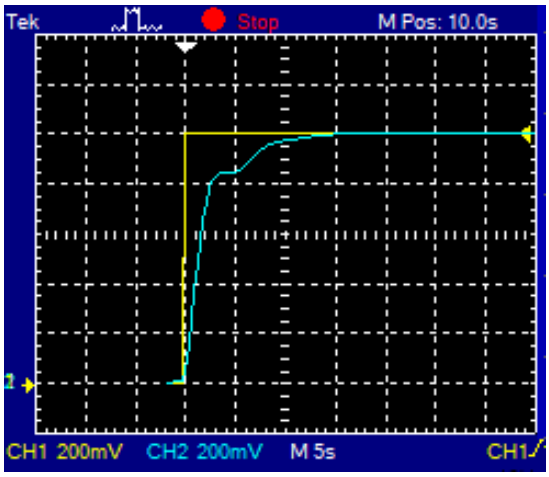


Figura 32 – Resposta da planta com "PID" Projetado – Ganho=0.1.

Identificação de Sistemas:

Para a operação do sistema de identificação de sistemas, utilizou-se a Planta desenvolvida nesse trabalho a fim de comparar os resultados. Para isso, esse sistema foi estimulado com entradas conhecidas e correlacionadas com as respectivas respostas. Então, foi analisada a eficiência da estimava da função de transferência da planta.

A figura 33 lista os dados de entrada e saída do sistema a ser identificado. A figura 34 apresenta os ajustes de parâmetros desejados para a função de transferência estimada, com destaque para o número de polos e zeros, além da relação de amortecimento desejada. A figuras 35 mostra os resultados encontrados com a utilização da técnica de identificação de sistemas, comparando os sinais de saída estimado e coletado.

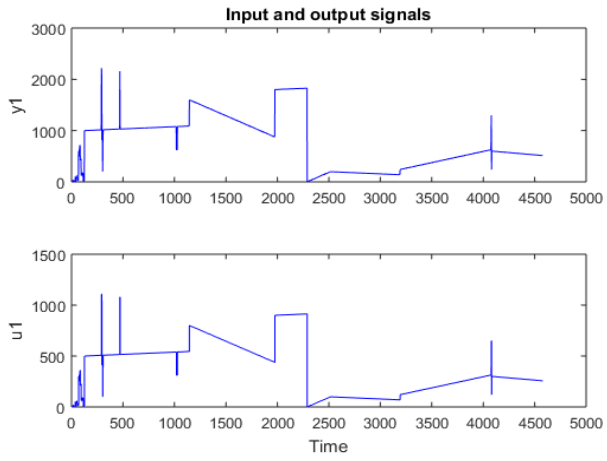


Figura 33 – Sinal de saída e entrada da planta.

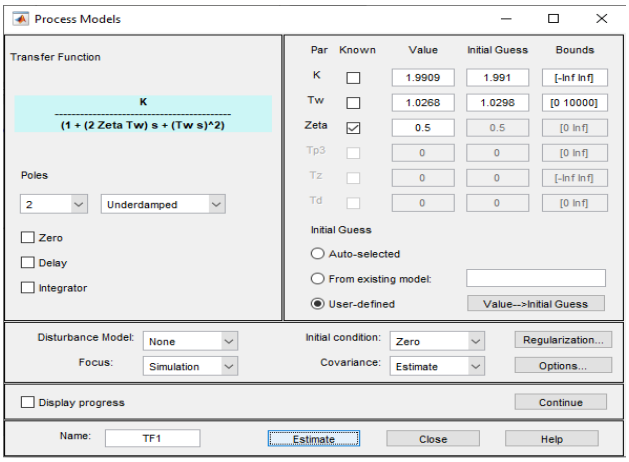


Figura 34 – Parametrização da função de transferência desejada.

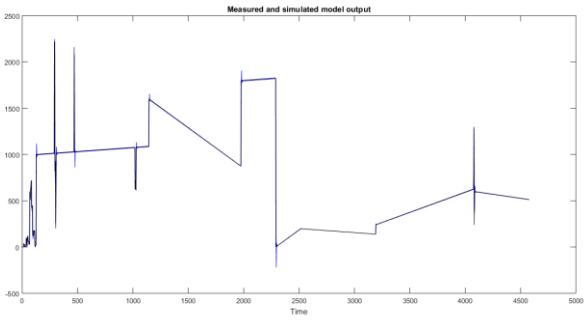


Figura 35 - Teste de aderência - Linha azul: Sinal de saída estimado; Linha Preta: Sinal de saída original.

A função de transferência estimada para a planta ficou:

$$G(s) = \frac{1.9909}{s^2+1.0268s+1.0268} \quad (27)$$

Neste trabalho, a planta didática, que teve a sua função de transferência estimada pelas técnicas de identificação de sistemas, possui a sua função de transferência conhecida e modelada pelos métodos tradicionais:

$$G(s) = \frac{1.8701}{s^2+0.967s+0.935} \quad (28)$$

A função de transferência estimada pela técnica de identificação de sistemas mostrou-se bastante eficiente, atingindo cerca de 83% de aderência, segundo os próprios índices de desempenho apontados pela toolbox do Matlab [8]. Além disso, verifica-se aproximação nos valores encontrados na função de transferência estimada e original (equações 27 e 28).

Uma outra forma de validar o resultado alcançado com a identificação de sistemas é comparar a resposta ao degrau unitário dos sistemas estimado e original. Isso pode ser conferido na figura 36. É importante destacar que a técnica de identificação de sistemas foi aplicada numa planta didática com função de transferência conhecida com o intuito de validação. Os procedimentos de identificação de sistemas descritos neste trabalho podem ser facilmente reproduzidos em um ambiente industrial em que o projetista de sistemas de controle necessita avaliar o desempenho de uma planta que apresenta restrições de modelagem a partir dos métodos tradicionais.

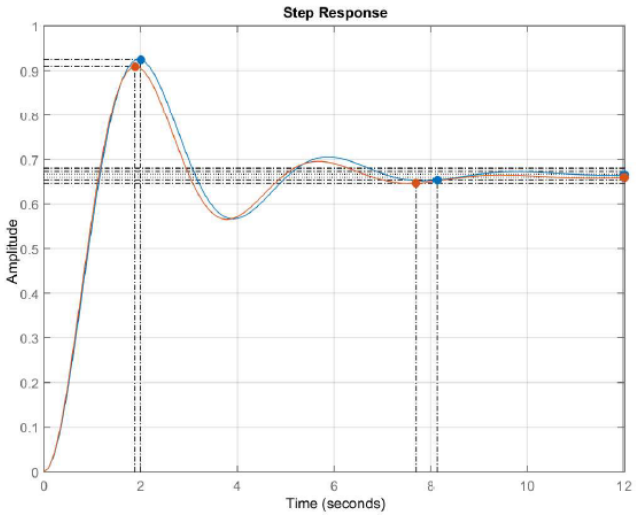


Figura 36 – Resposta ao degrau – sistema original (linha azul), sistema estimado (linha laranja).

VII. Conclusão

Este trabalho apresenta uma proposta de desenvolvimento de uma planta didática para ser utilizada na aplicação prática de algumas técnicas de controle. Inicialmente são desenvolvidos dois módulos analógicos: um circuito elétrico é confeccionado para desempenhar a função da planta (ou processo), que tem o seu sinal de tensão de saída gerenciado por algumas ações de controle. As ações de controle estão implementas em um segundo módulo composto por circuitos elétricos que executam as ações de controle: P, PI, PD e PID. Em todas as simulações computacionais realizadas, os componentes foram ajustados em valores comerciais para garantir uma posterior implementação de bancada dos mesmos.

Com o esquema elétrico da planta didática previamente definido, foi realizado o seu modelamento matemático, com destaque para a utilização das Leis de Kirchhoff, objetivando extrair a função de transferência do sistema e a sua consequente análise matemática, abrindo a possibilidade de se prever o seu desempenho de forma teórica.

Na sequência, foram executados testes de modo a avaliar o desempenho da planta didática. Simulações computacionais possibilitaram acompanhar a resposta desta planta a alguns estímulos e identificar as suas medidas de desempenho, tais como tempo de estabilização e qualidade da resposta em estado estacionário.

Nesse sentido, foram utilizadas técnicas de identificação de sistemas, com o propósito de modelar a função de

transferência da planta, comparando o resultado estimado com o modelamento matemático tradicional.

Diferentes combinações de ações de controle (proporcional, integral, derivativa) e projeto, foram utilizadas a fim de demonstrar correspondência dos gráficos obtidos com as respostas esperadas. As respostas obtidas através dos testes com a planta didática e com os controladores tiveram um comportamento bastante satisfatório. Além disso, o projeto do controlador "PID", utilizando o Método do Lugar das Raízes obteve a resposta esperada, ou seja, apresentou-se dentro do previsto pela literatura especializada. A técnica de identificação de sistemas também mostrou-se bastante eficiente e com potencial enorme de aplicação em ambiente industrial. Particularmente, para aqueles cenários em que o engenheiro enfrenta restrições de modelagem para a função de transferência da planta a ser avaliada e que necessite de melhorias no seu desempenho operacional.

Conclui-se, então, que o sistema desenvolvido neste trabalho pode ser empregado para ensaios didáticos uma vez que valida os resultados teóricos e com isso, torna-se uma ferramenta para o apoio ao aprendizado da disciplina de sistemas de controle da PUC Goiás.

Seguindo o objetivo inicial deste trabalho de conclusão, do curso de Engenharia Elétrica da PUC-Goiás, o desenvolvimento desta planta didática, juntamente com sua validação através de processos rigorosos de simulações computacionais, possibilita várias abordagens que possam ser desenvolvidas em muitos outros projetos futuros. Dentro destas possibilidades, podem ser vislumbradas:

- Implementação em bancada de todo o sistema proposto e analisado neste trabalho, juntamente com suas medidas experimentais. Deve-se ressaltar a necessidade de se respeitar as limitações físicas de funcionamento dos componentes. Esta atividade possibilitará um confronto entre os resultados experimentais e os resultados das simulações computacionais. Validando ainda mais o sistema desenvolvido;
- Proposta de outras plantas didáticas, com destaque para sistemas utilizando servo-motores. Estas plantas poderiam ter o seu desempenho controlado pela estrutura PID desenvolvida neste trabalho.
- Proposta de um sistema PID digital. Este sistema poderia ser implementado no software MatLab/Simulink com a adição de uma estrutura de aquisição de dados confeccionada utilizando, por exemplo, a plataforma Arduino.

VIII. REFERENCIAS

[1] XUEYUN, J.; ZIHUI, C. A New Way to Software Engineering Education. International Conference on Educational and Information Technology. IEEE, vol. 2. pp. V2-1, V2-3, 17-19, 2010.

[2] PEREIRA, C. E. et al. Control and Automation Engineering Education: combining physical, remote and virtual labs. 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. IEEE. pp. 1-10, 20 a 23, 2012.

[3] OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

[4] NISE, N. S. Engenharia de sistemas de controle. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

[5] BEGA, E.A. Instrumentação industrial. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

[6] MAYA, P.A.; LEONARDI, F. Controle Essencial. 2.ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

[7] DORF, R.C; BISHOP, R.H. Sistemas de controle modernos. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

[8] Site do desenvolvedor do software MatLab. Acessado em abril de 2020.

[9] Site do desenvolvedor do software MultiSim. Acessado em abril de 2020. https://www.ni.com/pt-br.html

[10] Site do desenvolvedor do software Proteus. Acessado em novembro de 2020. https://www.labcenter.com/

Apêndice 1

– Estruturas implementadas para executar as ações de controle:

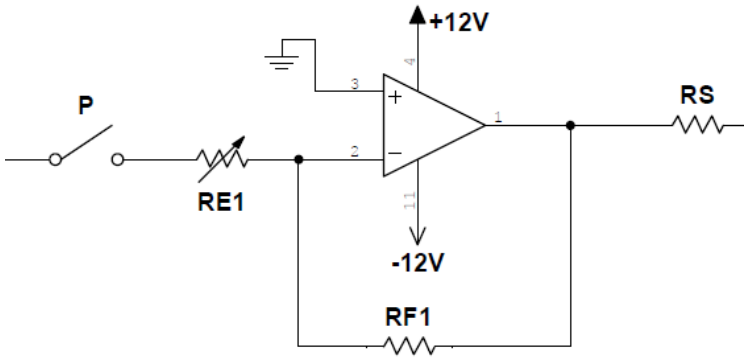


Figura A1.1 – Estrutura do controlador Proporcional (P) implementado – circuito elétrico P.

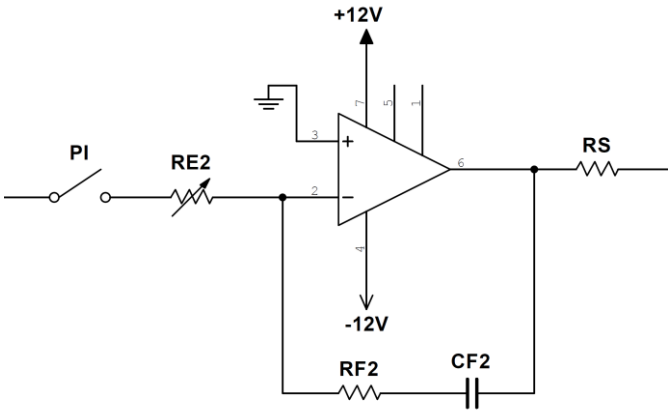


Figura A1.2 – Estrutura do controlador Proporcional-Integral (PI) implementado – circuito elétrico PI.

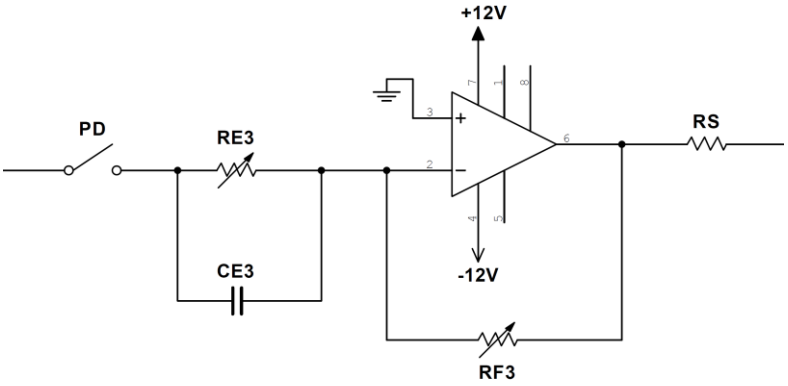


Figura A1.2 – Estrutura do controlador Proporcional-Derivativo (PD) implementado – circuito elétrico PD.

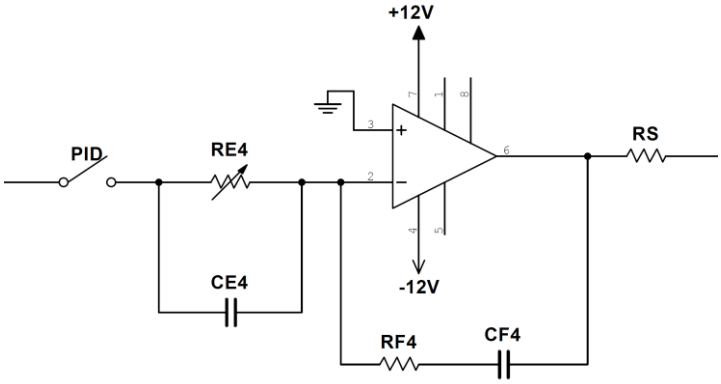


Figura A1.2 – Estrutura do controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) implementado – circuito elétrico PID.

Apêndice 2

– Sistema de controle em malha fechada com os dois módulos interconectados – planta + controladores.

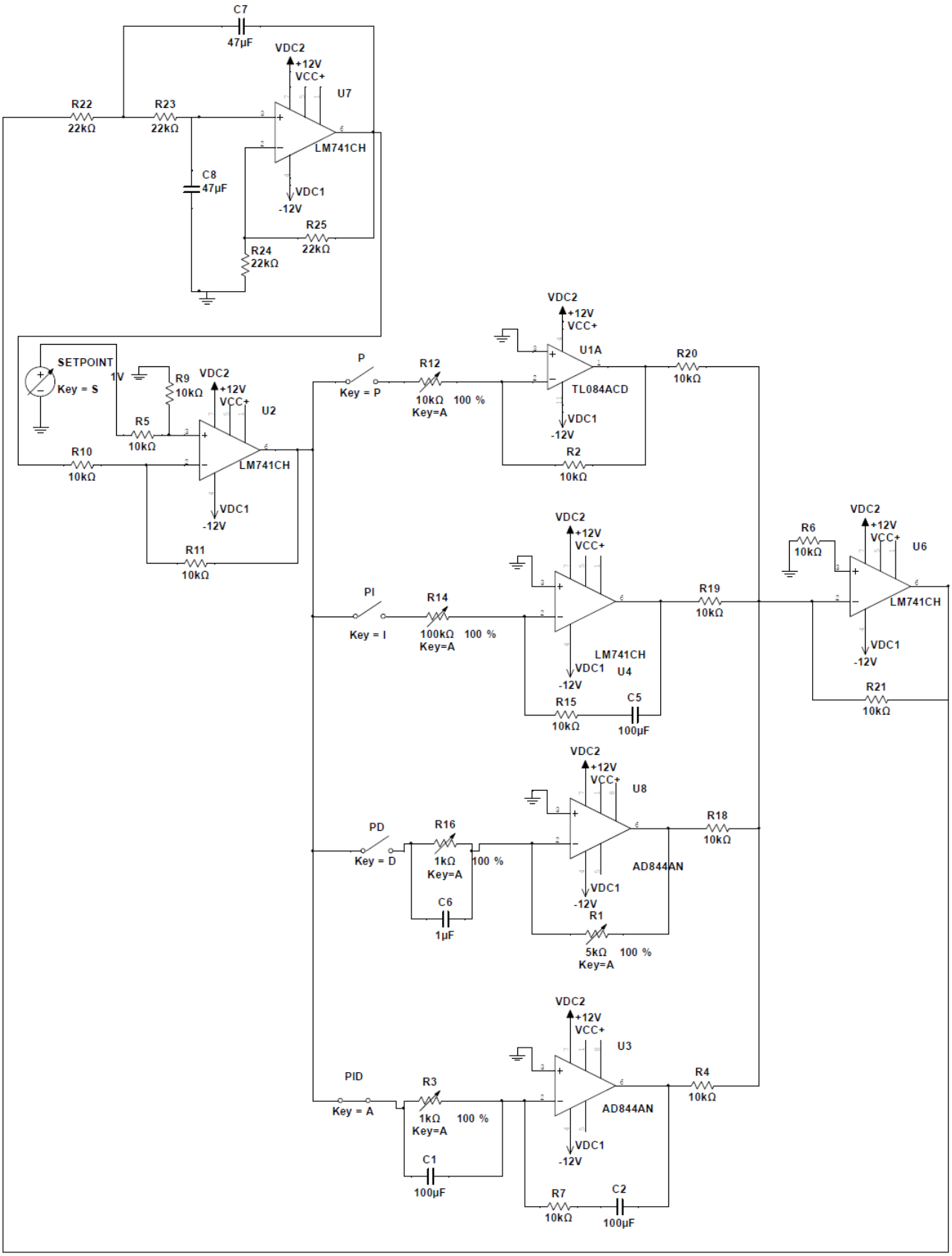
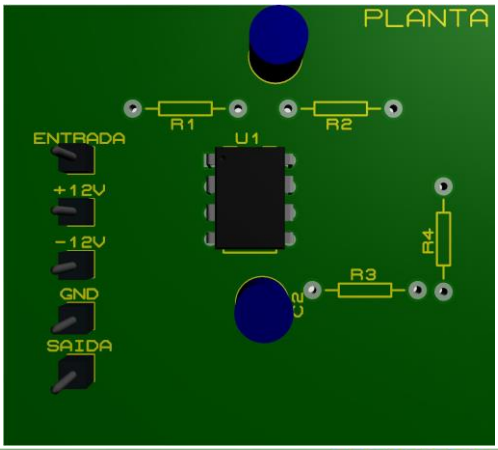
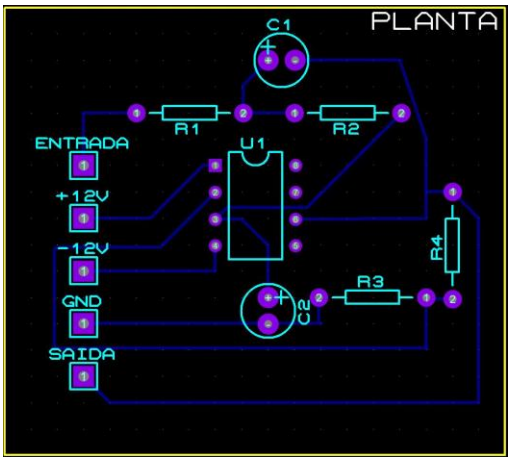


Figura A2.1 – Sistema em malha fechada composto por Planta + Compensadores – Circuito elétrico completo.

Apêndice 3

– Placas de Circuito Impresso





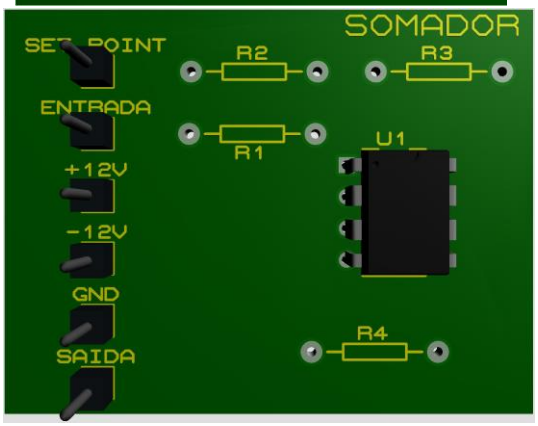


Figura A3.1 – PCB 3D do somador.

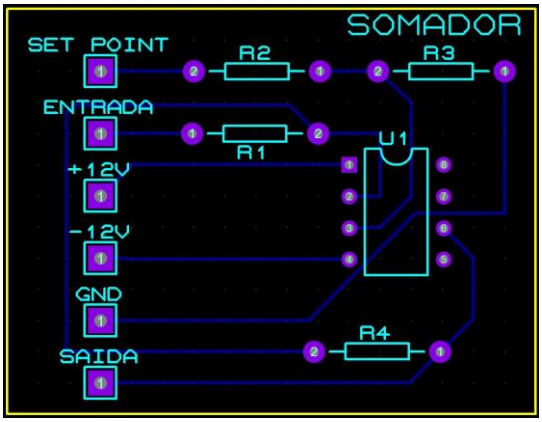


Figura A3.2 – PCB do somador.

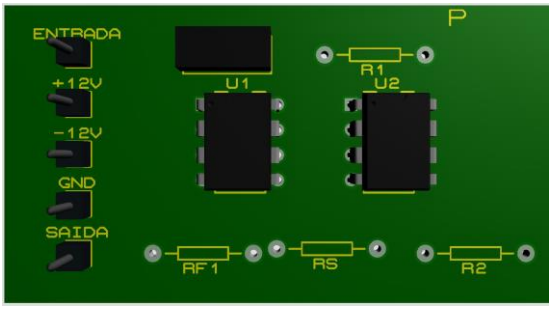


Figura A3.3 – PCB 3D do Controlador Proporcional (P).

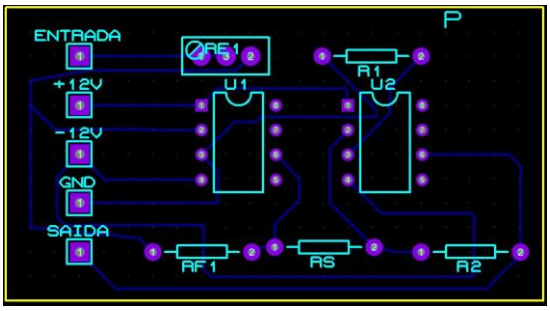


Figura A3.4 - PCB do Controlador Proporcional (P).

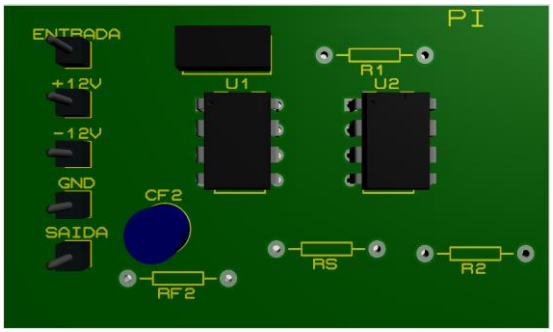


Figura A3.5 – PCB 3D do Controlador Proporcional-Integral (PI).

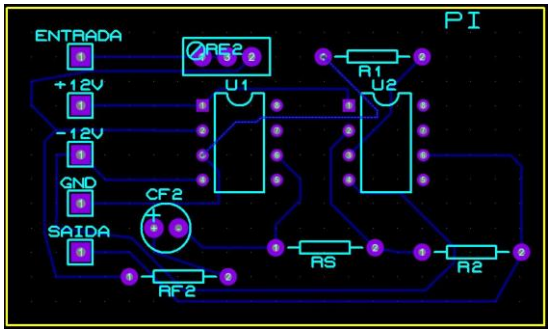


Figura A3.6 – PCB do Controlador Proporcional-Integral (PI).

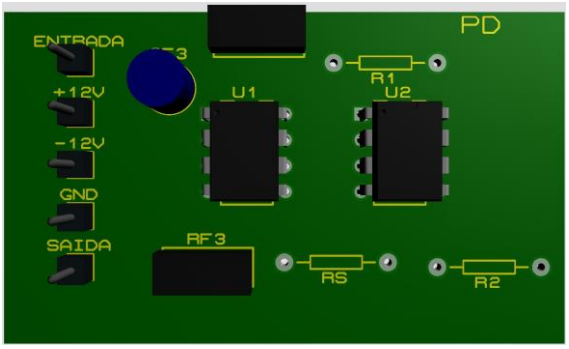


Figura A3.7 - PCB 3D do Controlador Proporcional-Derivativa (PD).

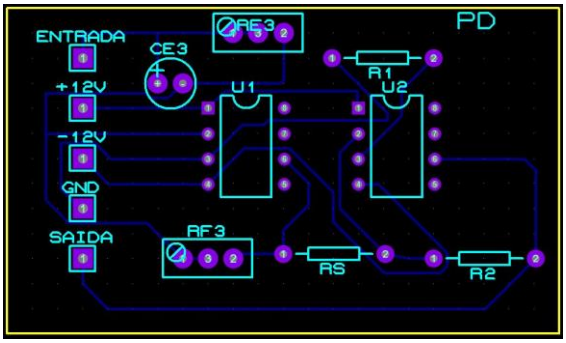


Figura A3.8 - PCB do Controlador Proporcional-Derivativa (PD).

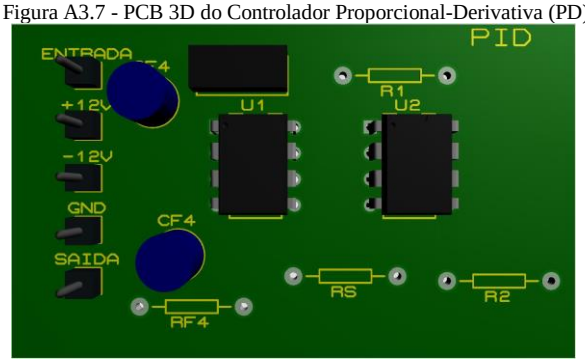


Figura A3.9 – PCB 3D do Controlador PID.

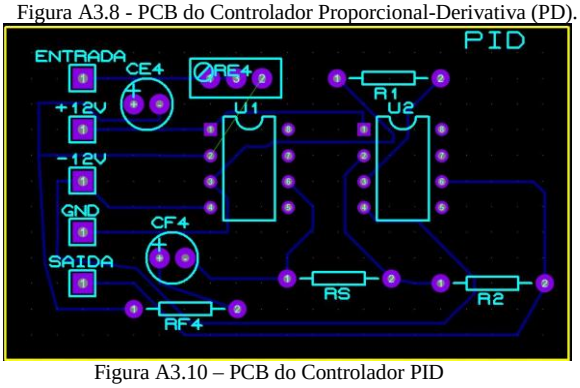


Figura A3.10 – PCB do Controlador PID