

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA – HABILITAÇÃO EM ROBÓTICA E AUTOMAÇÃO
INDUSTRIAL

Diego Albuquerque Carvalho

Controle no módulo de dois tanques: Uma proposta PjBL para o ensino em Engenharia

Juiz de Fora

2015

Diego Albuquerque Carvalho

Controle no módulo de dois tanques: Uma proposta PjBL para o ensino em Engenharia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica – Habilitação em Robótica e Automação Industrial, da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Orientador: Dr. Francisco Gomes

**Juiz de Fora
2015**

Diego Albuquerque Carvalho

Diego Albuquerque Carvalho

Controle no módulo de dois tanques: Uma proposta PjBL para o ensino em Engenharia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica – Habilitação em Robótica e Automação Industrial, da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Aprovada em (dia) de (mês) de (ano)

BANCA EXAMINADORA

Titulação. Nome e sobrenome - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Titulação. Nome e sobrenome

Universidade Federal de Juiz de Fora

Titulação. Nome e sobrenome

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que guiou meus caminhos até esta conquista. Agradeço aos meus pais que se dedicaram a me conduzir pelos caminhos que eu trilhei e me apoiaram e impulsionaram em cada escolha. Agradeço também meus irmãos que se tornaram exemplos para minhas conquistas, além de minha namorada Taynan, minha afilhada Thauany e todos familiares que me apoiaram e me ajudaram a alcançar cada novo objetivo. Em especial agradeço ao meu orientador Francisco Gomes, não apenas pela sua ajuda neste trabalho, mas por toda sua preocupação com a Educação em Engenharia, sempre buscando novos métodos de ensino e novas estratégias a fim de formar melhores profissionais para o mercado de trabalho. Agradeço também à minha amiga Yasmin Cyrillo que contribuiu imensamente com este trabalho, ajudando significativamente no seu desenvolvimento e também durante a graduação nos projetos do Programa de Educação Tutorial da Engenharia Elétrica (PET Elétrica) e na graduação. Agradeço aos meus amigos do PET Elétrica e do IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) que contribuíram de forma ímpar em minha formação pessoal e profissional. Ademais, agradeço aos meus pais, irmãos e namorada que me impulsionaram neste caminho e me ajudaram a alcançar cada conquista de minha vida.

“Para todo esforço há fruto, muito palavrório só produz penúria. ”

(BÍBLIA, Provérbios 14, 23)

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um módulo de controle didático de controle de temperatura de dois tanques de água. O módulo é acionado via software MatLab, onde é possível acionar o aquecedor de água e também os motores para alterar o volume de água em cada um dos tanques. O acionamento dos mesmos utiliza o protocolo OPC para realizar a comunicação adequada entre o computador e o módulo físico. A comunicação é feita utilizando uma ferramenta chamada de OPCTOOL dentro do software MatLab. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma interface didática, para que o acionamento do módulo seja norteado pelos conceitos fundamentais de Controle e seja capaz de auxiliar no desenvolvimento do conhecimento dos alunos de Engenharia Elétrica. A interface foi criada e pretende-se ser utilizada utilizando a estratégia de ensino conhecida como PjBL (Aprendizado Baseado em Projeto – *Project Based-Learning*) que, diferente da metodologia de ensino comum na sociedade, estimula o aluno a desenvolver o conteúdo com mais independência e com desafios propostos, com isso o professor é considerado um Facilitador do ensino, tendo papel fundamental na orientação do aluno, mas sem a pretensão de “passar” a informação para o aluno. A partir deste conceito de ensino que norteia o trabalho tem-se a intenção de que a interface desenvolvida possa ser utilizada no ensino das disciplinas de Controle de forma a auxiliar no ensino da faculdade e formar profissionais cada vez mais adequados ao mercado de trabalho atual.

Palavras-chave: PjBL, módulo de dois tanques, controle, didático, ensino

ABSTRACT

This paper presents a didactic control module of temperature. The module is powered via MatLab software where you can trigger the water heater and also the engines to change the volume of water in each tank. It is used the OPC protocol to perform the proper communication between the computer and the physical module. The objective of this work is to develop a didactic interface, so the module is guided by fundamental concepts of control and is able to assist in developing the students' knowledge of Electrical Engineering. The interface is designed and intended to be used based in a teaching strategy known as PjBL (Project Based-Learning) that, unlike the common teaching Methodology in society, encourages the student to develop content with more independence and proposed challenges, thus the teacher is considered a teaching Facilitator, having key role in guiding the student, but with no claim to "pass" the information to the student. From this concept of teaching, the work has the intention of developing an interface can be used in the teaching process as na extra tool for teaching.

Keywords: Didatic, PjBL, Module, Control, Temperature.

SUMÁRIO

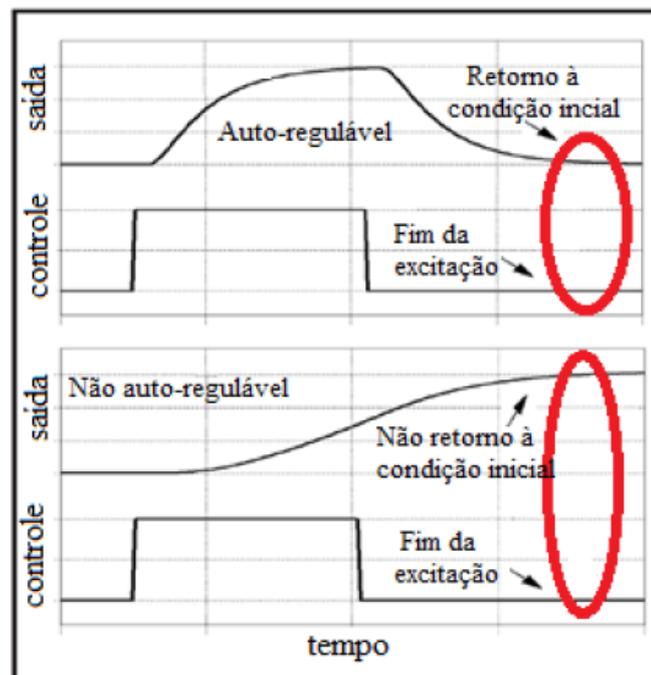
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DOS SISTEMAS INDUSTRIAIS	9
1.2 METODOLOGIA PjBL	9
1.3 PLANTA DE ESTUDO	10
1.4 PROTOCOLO OPC	12
2 RESPOSTA AO DEGRAU.....	13
3 FILTRAGEM	15
3.1 FILTROS ANALÓGICOS	15
3.1 FILTROS DIGITAIS.....	17
3.1.1 Filtro Exponencial	17
3.1.2 Filtro Exponencial Duplo (<i>Double Exponencial</i>)	19
3.1.3 Filtro Moving-Average	20
3.1.4 Filtro Noise-Spike	21
4 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	22
5 OTIMIZAÇÃO.....	25
6 CONCLUSÃO.....	27

1 INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DOS SISTEMAS INDUSTRIAIS

Há duas divisões básicas quando se caracteriza as malhas SISO (“Single input, single-output”) divididas por autorreguláveis e integrativas. A partir destas classificações podemos definir uma malha autorregulável como uma planta que alcança um novo estado de equilíbrio quando perturbado, enquanto o sistema integrativo não alcança um novo estado permanente. Para exemplificar as classificações apresentadas podemos citar como sistemas autorreguláveis malhas de vazão, pressão e temperatura, que engloba a maioria dos processos industriais. Além disso, para exemplificar um processo instável temos como exemplos malhas líquido-vapor e malhas de nível bombeadas. Na figura 1 tem-se exemplificado os dois tipos de malhas de controle.

Figura 1 - Sistemas autorregulável e não autorregulável



1.2 METODOLOGIA PjBL

Os engenheiros exercem fundamental importância no contexto social, econômico e político e, por este motivo, torna-se necessário conduzir sua formação profissional de acordo com esta importância, principalmente quando se reporta às modificações no campo empresarial, pois as empresas buscam novas estruturas organizacionais exigindo competências diferenciadas destes profissionais. Para tal, a educação em engenharia necessita de novas posturas

pedagógicas que permitam formar profissionais em sintonia com as novas demandas do mercado de trabalho (SILVEIRA, 2005).

Levando em conta que a engenharia é uma profissão prática, “hands-on” e, portanto, desde os primórdios da educação em engenharia, os laboratórios didáticos têm constituído um dos fundamentos da graduação e, em muitos casos, da pós-graduação, pode-se afirmar que, anteriormente à ênfase na componente científica, a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios (FEISEL & ROSA, 2005).

Atualmente tem-se novas demandas profissionais que moldam um novo modelo de profissional, que além de bom conhecimento técnico torna-se necessário competências conhecidas como transversais que incluem, dentre outras, a capacidade de trabalhar em equipe, apresentar um ponto de vista, gerenciar projetos, realizar planejamentos adequados e gerir equipes interdisciplinares. Tais características profissionais precisam de ser mais reforçadas no meio acadêmico permitindo um ambiente mais democrático onde os alunos possam desenvolver seu conhecimento fora do modelo usual de aprendizado onde o professor é o “detentor” do conhecimento e “passa” ele para os alunos em aulas altamente expositivas.

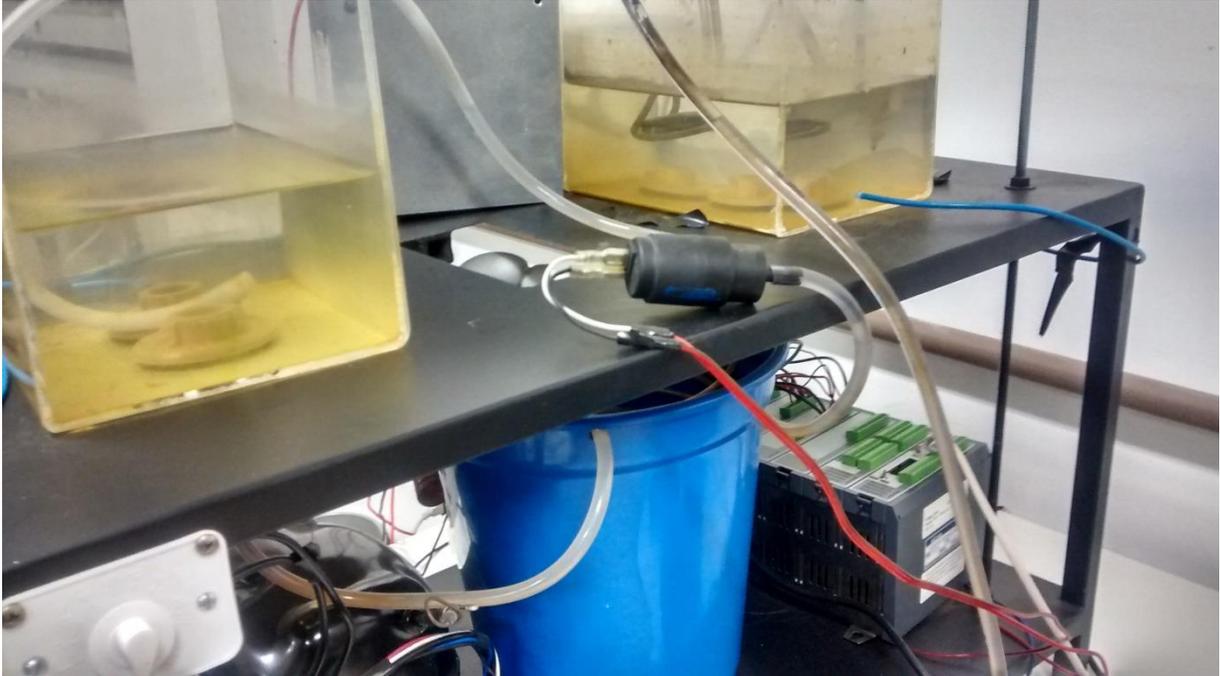
Em consonância com esta metodologia de ensino conhecida como *Project Based Learning* (PjBL) este trabalho está sendo proposto de forma a alterar o modelo de aulas com o suporte adequado de uma planta laboratorial. A intenção do desenvolvimento desta planta é auxiliar no aprendizado dos alunos, de forma que eles possam livremente acionar e analisar as respostas da planta a fim de construir seu próprio conhecimento com a implementação dos conceitos de controle na planta laboratorial e entendendo o funcionamento de sistemas de controle em uma planta laboratorial.

1.3 PLANTA DE ESTUDO

No trabalho apresentado tem-se uma planta de modelo para orientar o estudo. A planta descrita servirá como instrumento de suporte ao estudo de Controle de Processos Industriais e outras disciplinas de controle lecionadas na Universidade Federal de Juiz de Fora. O objetivo da planta é tornar o aprendizado nestas disciplinas mais dinâmico e com suporte adequado; aplicando de forma prática os conceitos de controle em uma planta que simula um processo industrial e permite a aplicação dos conceitos de controle em uma planta laboratorial.

Na figura 2 tem-se uma foto do módulo que serve para entender como a planta funciona.

Figura 2 - Planta de controle



A planta possui dois tanques com água e temos dois modos de controle aplicáveis na planta, que são o controle de temperatura e nível. No controle de temperatura tem-se um aquecedor no tanque dois que permite o aquecimento da água e neste mesmo tanque possui um medidor de temperatura que permite a medição da temperatura da água no módulo. Ademais, há duas bombas que realizam a troca de água de um tanque para o outro, permitindo a alteração de nível dos dois tanques e a medição do nível do mesmo. Em cada tanque há um medidor de nível que mede o nível através da pressão diferencial do volume de água com relação a pressão atmosférica. Ambos os sensores de nível e o sensor de temperatura enviam suas medições para o computador através do protocolo OPC para o software MatLab utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Além disso, há um resfriador da água que permite além do aquecimento da mesma através do aquecedor, também permite o resfriamento da mesma.

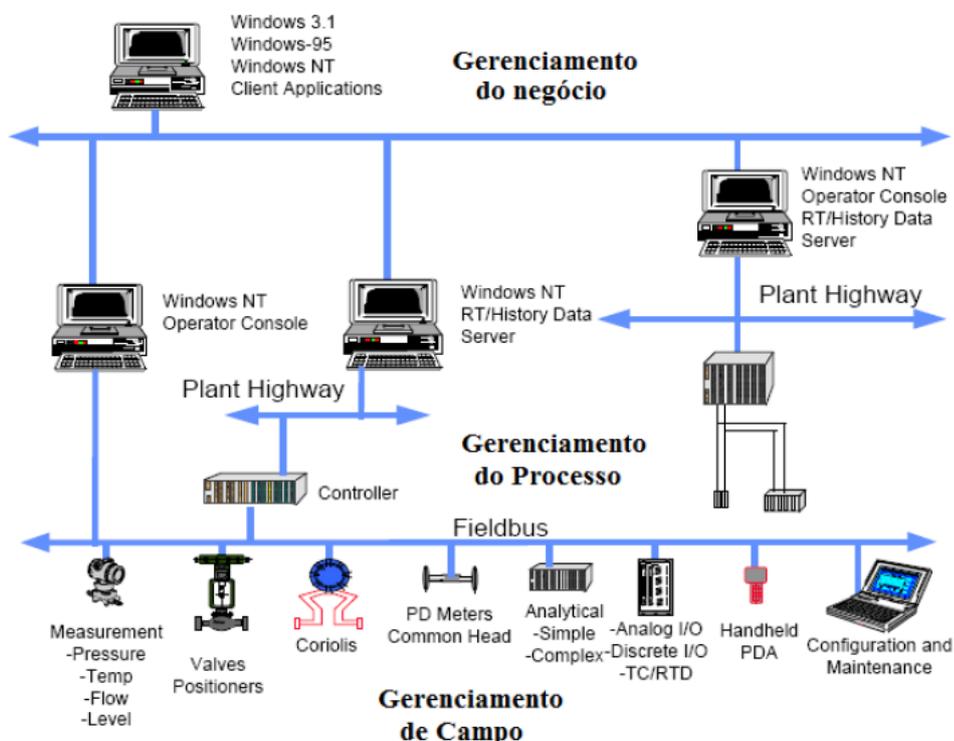
Com esta planta, em consonância com a metodologia PjBL pretende-se tornar possível um novo modelo de ensino de controle de processos. Este é apenas um modelo que pode estimular alunos e professores a buscar novas ferramentas e metodologias de ensino a fim de aprimorar os novos profissionais de engenharia e adequar os alunos da universidade às novas necessidades do mercado de trabalho. Com um modelo proposto em que o aluno não é apenas ouvinte e absorvedor do conhecimento do professor, torna-se possível um ambiente de mútuo

aprendizado, onde a universidade poderá desenvolver melhor seus alunos e estes ter um ambiente que seja capaz de oferecer uma formação profissional completa e não apenas teórica.

1.4 PROTOCOLO OPC

O protocolo OPC é um protocolo de comunicação de dados, sendo a sigla OPC um acrônimo de "OLE for Process Control" (OPC), que consiste na versão OLE - "Object Linking and Embedding- para a indústria de automação (SILVA, 2012). Constitui-se por um conjunto comum de interfaces, métodos e propriedades de comunicação, agregados dentro de uma especificação padronizada e aberta ao acesso público (PUDA, A. P., 2012). Além dessas características, vale destacar que o fato de se basear da tecnologia OLE COM ("Component Object Model") e DCOM ("Distributed Component Object Model") agrega-lhe princípios da programação orientada a objeto, como manipulação e exposição (SILVA, 2012). Quanto às suas origens, vale dizer que surgiu em 1996 (PUDA, A. P., 2012), em meio à dois aspectos principais: a existência de soluções proprietárias dos equipamentos de fornecedores diversificados e redes de campo a eles associadas (Figura 3).

Figura 3 - Funcionamento esquemático do Protocolo OPC



Esta ambiência propiciou o surgimento de sistemas desconexos e dificuldades para sua expansão induzindo, e mesmo coagindo, o usuário a agregar aos sistemas iniciais, já

implantados, e quando necessário, ferramentas do mesmo fornecedor original, ainda que outro fornecedor possuísse soluções mais interessantes e apropriadas. Esta situação, para resumir, gerava dependência de produtos, serviços e manutenção, possível perda de interoperabilidade e de flexibilidade de operação (LUIGUI, A. B. and SANTOS, M. M. D., 2009, PUDA, A. P., 2012). Neste contexto, com o intuito de solucionar, ou minorar, tais problemas, líderes mundiais da rede de fornecedores de equipamentos e componentes para a área de automação, em cooperação com a Microsoft, começaram o desenvolvimento desse protocolo. Aspecto a ser destacado nesta tecnologia é o fato de oferecer mecanismos padrão para comunicação e troca de dados entre servidores e clientes de fabricantes distintos, suportando aplicação em redes de comunicação de procedimentos (SILVA, 2012)

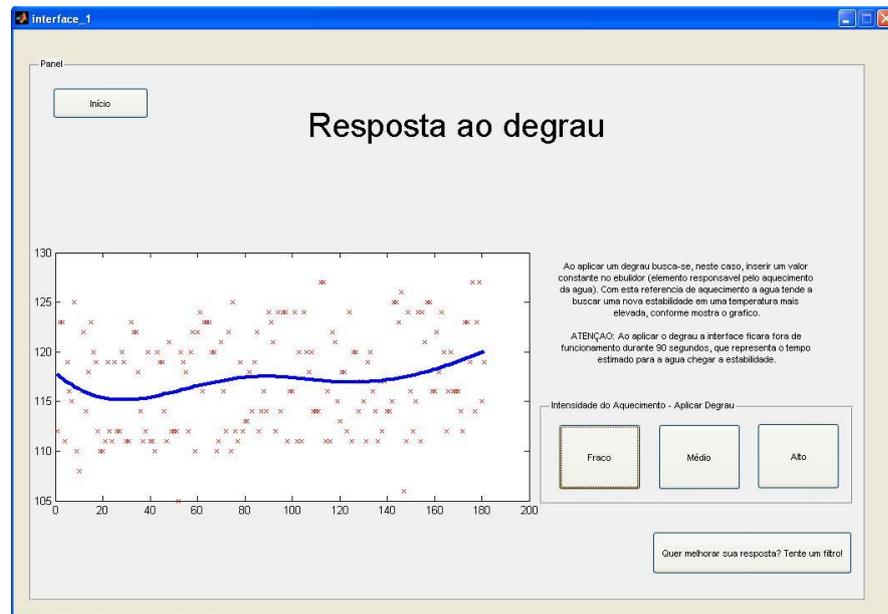
Para um reforço da compreensão sobre o padrão OPC, é válido lembrar que a tecnologia OLE da Microsoft, surgiu em função da necessidade de desenvolver drivers específicos para cada fabricante de impressora diferente. Deste modo, de maneira análoga à dificuldade de interoperabilidade na indústria, a padronização eliminou a necessidade de softwares auxiliares para cada impressora (PUDA, A. P., 2012).

2 RESPOSTA AO DEGRAU

A análise da resposta ao degrau é o primeiro passo para realizar o estudo adequado de uma função de transferência de uma planta. Esta análise será fundamental para obter a função de transferência da função no tópico referente a este assunto. A resposta ao degrau é obtida aplicando um valor fixo de aquecimento na resistência de aquecimento da planta, com isso, temos a estabilização do sistema em uma nova temperatura e a partir do gráfico obtido é possível analisar a resposta do sistema e sua respectiva função de transferência, atraso na resposta e demais características importantes na definição de uma planta de controle.

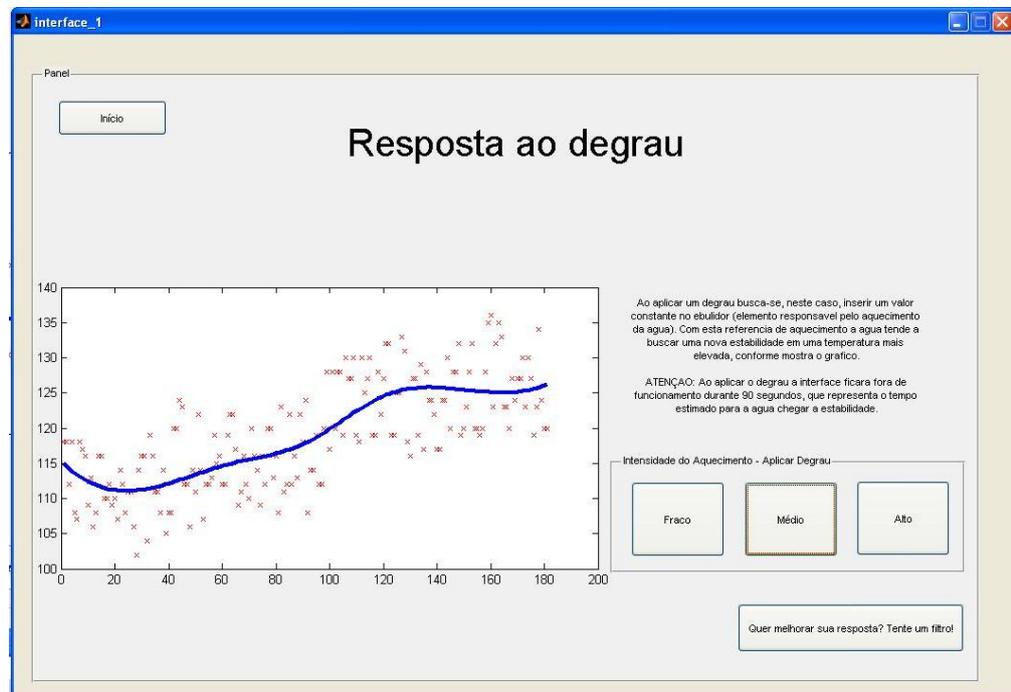
Na planta desenvolvida, é possível acionar o aquecedor em três modos de operação, com intensidades diferentes de aquecimento. Na figura 4 tem-se a resposta ao degrau de um acionamento no modo fraco do aquecedor. O valor de acionamento neste caso é de 2000, valor que, por métodos empíricos, foi calculado como o menor valor possível para aquecimento da planta.

Figura 4 - Resposta ao degrau com pouca intensidade de aquecimento



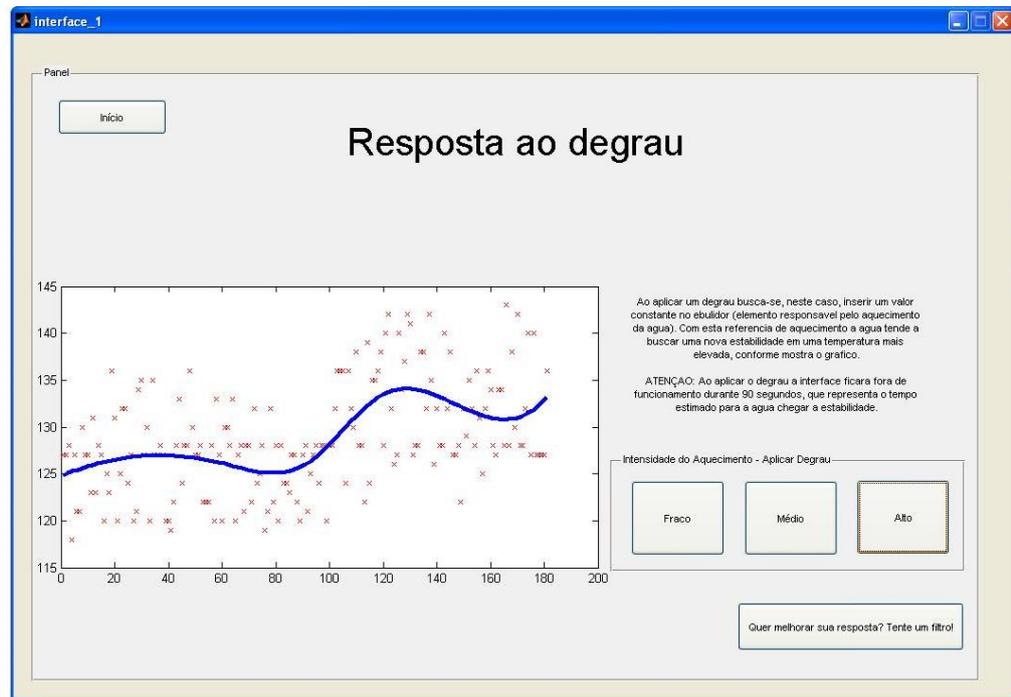
Na figura 5 tem-se o acionamento no modo médio, apresentando uma nova forma de resposta ao degrau. O acionamento neste caso foi feito com um valor de 3000.

Figura 5 - Resposta ao degrau com intensidade média



Por fim, na figura 6 tem-se o acionamento com intensidade alta, colocada no programa como 4000.

Figura 6 - Resposta ao degrau com intensidade alta



A resposta ao degrau neste caso foi através de uma análise de temperatura e também pode ser aplicada para nível ou outras variáveis que se deseja analisar. A resposta do sistema a um degrau nos mostra a resposta do sistema e suas principais características; além disso permite calcular a função de transferência da planta que será analisada no tópico 4.

3 FILTRAGEM

Neste tópico tem-se o objetivo de apresentar os filtros utilizados no desenvolvimento da interface apresentada neste trabalho. Além disso, as principais finalidades de cada um deles e suas principais aplicações.

3.1 FILTROS ANALÓGICOS

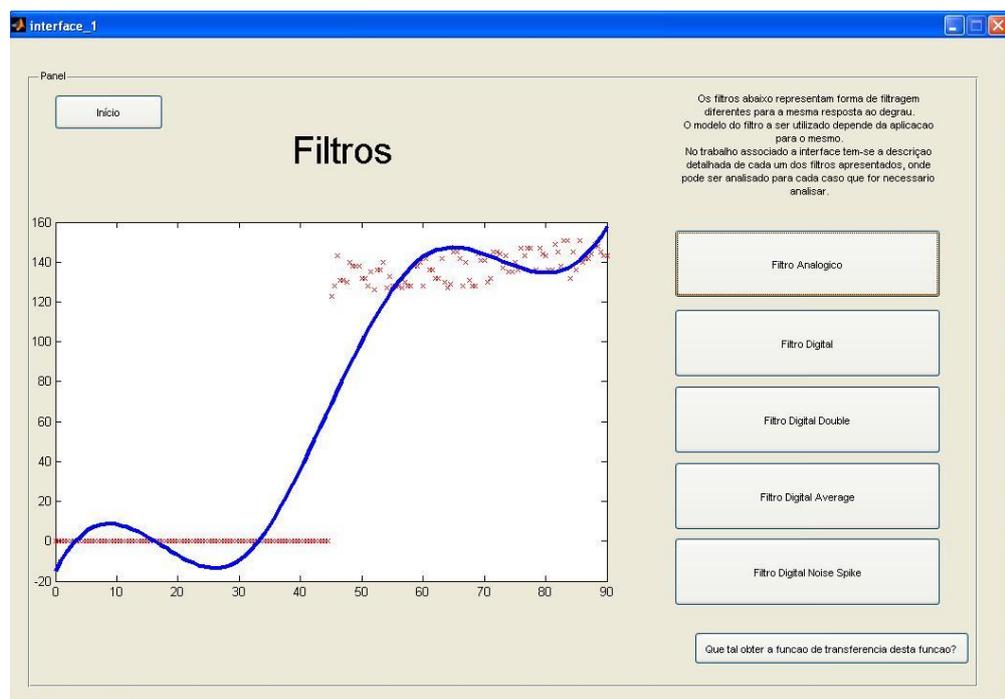
Filtros analógicos são comumente usados para dados experimentais com suaves perturbações. Como exemplo de filtro analógico pode-se citar o *filtro exponencial*, conhecido como filtro passa-baixa que retira as perturbações de alta frequência e sua operação pode ser descrita pela função de transferência de primeira ordem abaixo. (COELHO)

$$\tau_F \frac{dy_F(t)}{dt} + y_F(t) = y_m(t) \quad (1)$$

Onde y_m é o valor medido, ou seja, a entrada do filtro, y_F é o valor filtrado (saída do filtro) e τ_F é a constante do filtro.

Utilizando o filtro analógico como primeira referência de análise tem-se o gráfico apresentado abaixo, analisando a resposta em um intervalo de 90 segundos, assim como a aplicação de degrau do tópico anterior. Vale salientar que se parte da análise de uma mesma amostra analisando primeiramente a resposta ao degrau e em seguida os filtros analógicos e digitais a fim de obter a resposta do sistema e por fim, será calculado a obtenção da função de transferência do sistema.

Figura 7 - Análise da Resposta do Filtro Analógico



A partir do gráfico figura 7 é possível perceber a resposta do sistema utilizando o filtro analógico em estudo. Inicialmente tem-se um atraso grande e uma estabilização demorada, pois mesmo após 90 segundos de análise a planta ainda estava atingindo a estabilidade do sistema.

É desejável que um filtro analógico filtre os dados antes de sua inserção ao invés de um filtro passa-baixa afim de que os dados esperados estejam mais adequados para a análise desejada. Nestas situações o filtro é descrito como *filtro anti-aliasing* onde é possível selecionar

a amostra de período de forma independente. No entanto, para lentas variações de sinais, pode-se também utilizar filtros digitais que serão descritos a seguir.

3.1 FILTROS DIGITAIS

Nesta seção serão apresentados alguns exemplos de filtros digitais. Existem filtros mais complexos que não são descritos neste trabalho, no entanto, todos os filtros detalhados neste escopo foram implementados na interface desenvolvida e em cada tópico é apresentado sua resposta e análise na planta do estudo. (COELHO)

3.1.1 Filtro Exponencial

Primeiro consideramos uma versão digital de filtro exponencial, conforme descrito na equação 2. Denotamos as amostras de medidas como $y_m(k-1), y_m(k), \dots$ e seus valores filtrados correspondentes $y_F(k-1), y_F(k), \dots$ onde k refere-se ao instante corrente de amostra. A equação do filtro exponencial digital pode ser aproximada para a seguinte equação, tomando como base a equação do filtro exponencial analógico. (COELHO)

$$\frac{dy_F}{dt} \cong \frac{y_F(k) - y_F(k-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

Substituindo a equação de filtro analógico na equação temos:

$$\tau_F \frac{y_F(k) - y_F(k-1)}{\Delta t} + y_F(k) = y_m(k) \quad (3)$$

Rearranjando a equação temos:

$$y_F(k) = \frac{\Delta t}{\tau_F + \Delta t} y_m(k) + \frac{\tau_F}{\tau_F + \Delta t} y_F(k-1) \quad (4)$$

Neste ponto torna-se necessário definir um parâmetro:

$$\alpha \triangleq \frac{\Delta t}{\tau_F + \Delta t} \quad (5)$$

Onde $0 < \alpha \leq 1$, então

$$1 - \alpha = 1 - \frac{\Delta t}{\tau_F + \Delta t} = \frac{\tau_F}{\tau_F + \Delta t} \quad (6)$$

Desta forma podemos escrever a equação da seguinte forma:

$$y_F(k) = \alpha y_m(k) + (1 - \alpha)y_F(k - 1) \quad (7)$$

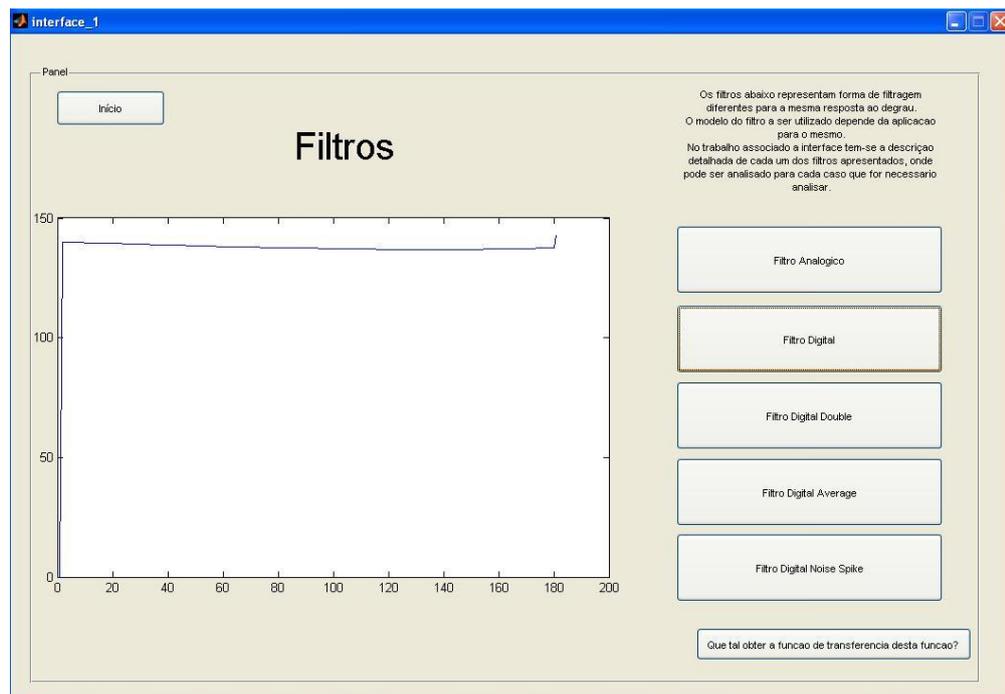
A equação apresentada indica que a medida do filtro é a soma ponderada da atual medida $y_m(k)$ e o valor filtrado na amostra anterior no instante $y_F(k - 1)$. Temos limitações para α que são:

$\alpha = 1$: Sem filtro (a saída do filtro é a medida)

$\alpha \rightarrow 0$: A medida é ignorada

A aplicação deste filtro na interface desenvolvida pode ser analisada através da figura 8. Tem-se a aplicação da mesma resposta aplicada utilizando um filtro analógico, porém é possível perceber a forma apresentada pela função quando se utiliza o filtro digital exponencial.

Figura 8 - Filtro Digital Exponencial



O filtro digital apresenta uma resposta mais estável para a função em análise e um atraso menor que o filtro analógico conforme apresentado na figura. O atraso da resposta está em menos de 10 segundos e a estabilidade fica em um valor razoável para a planta em aproximadamente 30 segundos do sistema funcionando.

3.1.2 Filtro Exponencial Duplo (*Double Exponencial*)

Conhecido também como filtro de segunda ordem oferece algumas vantagens para lidar com escorregamento de sinais. É um filtro equivalente a dois filtros de primeira ordem (filtro do tipo exponencial) em série onde a entrada do segundo filtro é a saída do primeiro filtro. Pode ser expresso pela seguinte equação: (COELHO)

$$\bar{y}_F(k) = \gamma y_F(k) + (1 - \gamma)\bar{y}_F(k - 1) \quad (8)$$

Sendo γ a constante do segundo filtro e $\bar{y}_F(k)$ a saída do segundo filtro.

Para os instantes analisados temos a seguinte equação:

$$\bar{y}_F(k - 1) = \gamma y_F(k - 1) + (1 - \gamma)\bar{y}_F(k - 2) \quad (9)$$

Resolvendo a equação para $y_F(k - 1)$,

$$y_F(k - 1) = \frac{1}{\gamma}\bar{y}_F(k - 1) - \frac{(1 - \gamma)}{\gamma}y_F(k - 2) \quad (10)$$

Com as equações acima é possível obter a expressão para o filtro analisado conforme abaixo.

$$\bar{y}_F(k) = \gamma\alpha y_m(k) + (2 - \gamma - \alpha)\bar{y}_F(k - 1) - (1 - \alpha)(1 - \gamma)\bar{y}_F(k - 2) \quad (11)$$

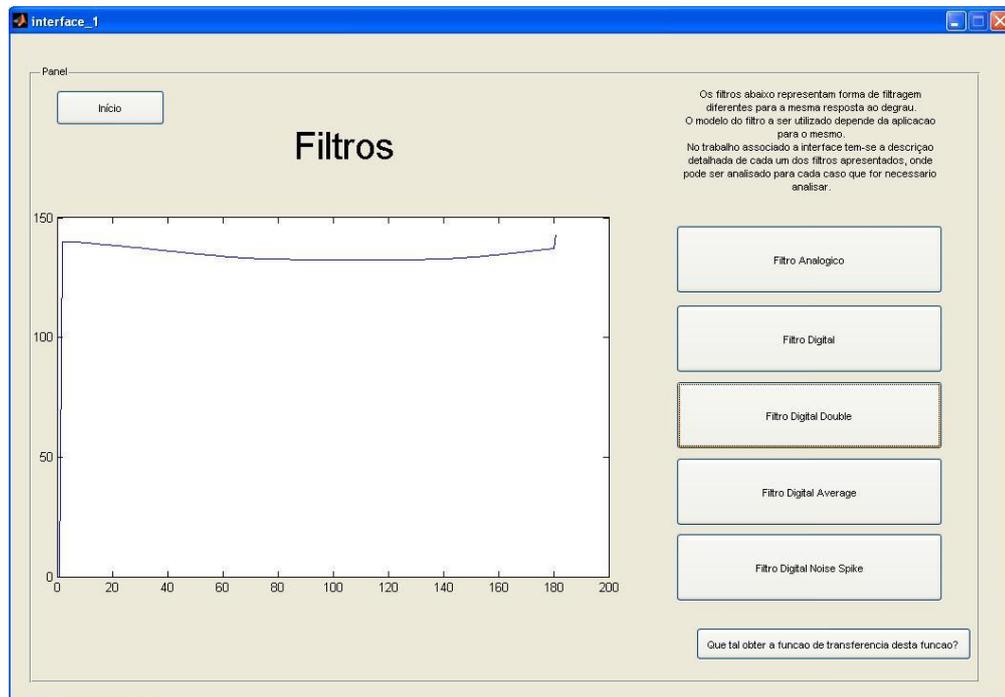
Pode-se simplificar fazendo $\alpha = \gamma$. Com isso, tem-se a seguinte equação:

$$\bar{y}_F(k) = \alpha^2 y_m(k) + 2(1 - \alpha)\bar{y}_F(k - 1) - (1 - \alpha)^2\bar{y}_F(k - 2) \quad (12)$$

A vantagem deste modelo de filtro sobre o filtro exponencial é que este filtro possui uma melhor filtragem para distúrbios de alta frequência, especialmente se $\alpha = \gamma$. No entanto, as vezes torna-se difícil determinar as constantes do filtro.

Na interface é possível notar a característica supracitada, pois temos um filtro com poucos distúrbios e rápida estabilização da resposta conforme figura 9.

Figura 9 - Filtro Doble Exponencial



3.1.3 Filtro Moving-Average

Um filtro moving-average utiliza um número específico de pontos anteriores com igual largura entre os pontos. Normalmente é menos efetivo que o filtro exponencial que dá mais peso ao dado mais recente. A equação do filtro pode ser representada por: (COELHO)

$$y_F(k) = \frac{1}{N^*} \sum_{i=k-N^*+1}^k y_i \quad (13)$$

Onde N^* é o número de dados anteriores utilizados para a média da equação. A mesma equação pode ser expressa em forma de $y_F(k-1)$:

$$y_F(k-1) = \frac{1}{N^*} \sum_{i=k-N^*}^{k-1} y_m(i) \quad (14)$$

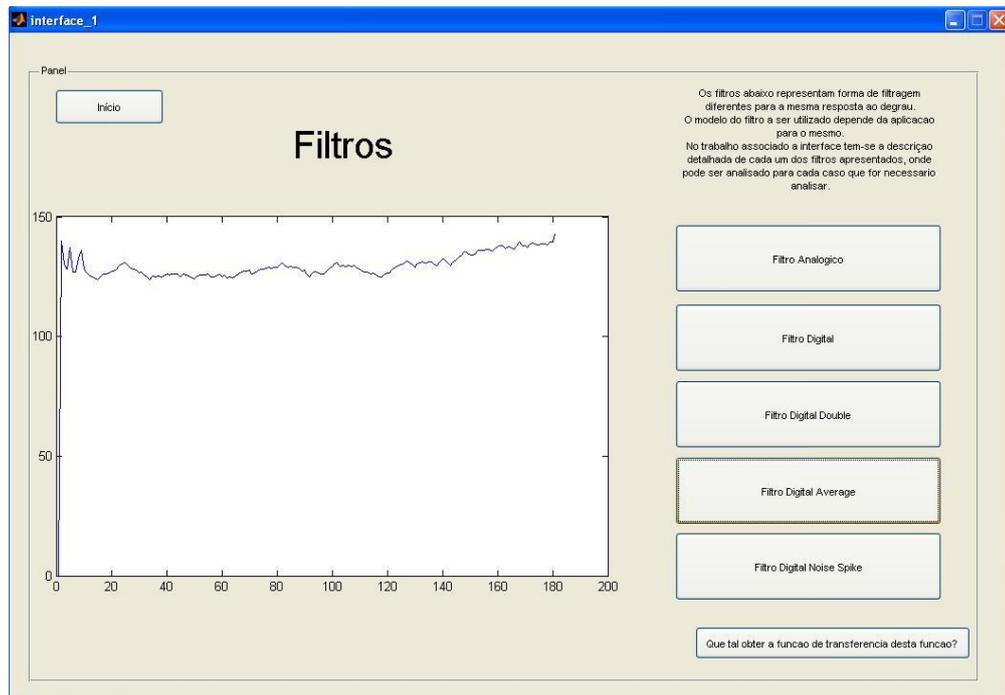
Subtraindo as equações temos a equação abaixo:

$$y_F(k) = y_F(k-1) + \frac{1}{N^*} (y_m(k) - y_m(k-N^*)) \quad (15)$$

Este filtro elimina toda a alta frequência do sinal, sendo também um filtro passa-baixa.

Com base nas equações apresentadas tem-se a resposta na interface na figura 10.

Figura 10 - Filtro Moving-Average



Analisando o gráfico apresentado percebe-se que ele apresenta maiores distúrbios que os dois filtros digitais apresentados, porém uma estabilização bem rápida e com maiores oscilações principalmente no início da análise.

3.1.4 Filtro Noise-Spike

Este filtro trata especialmente mudanças que repentinamente saem da medida esperada e volta ao regime normal em seguida, ou seja, para tratar pulsos na curva da função. Tais variações bruscas no sinal podem causar danos na estrutura de uma malha de controle.

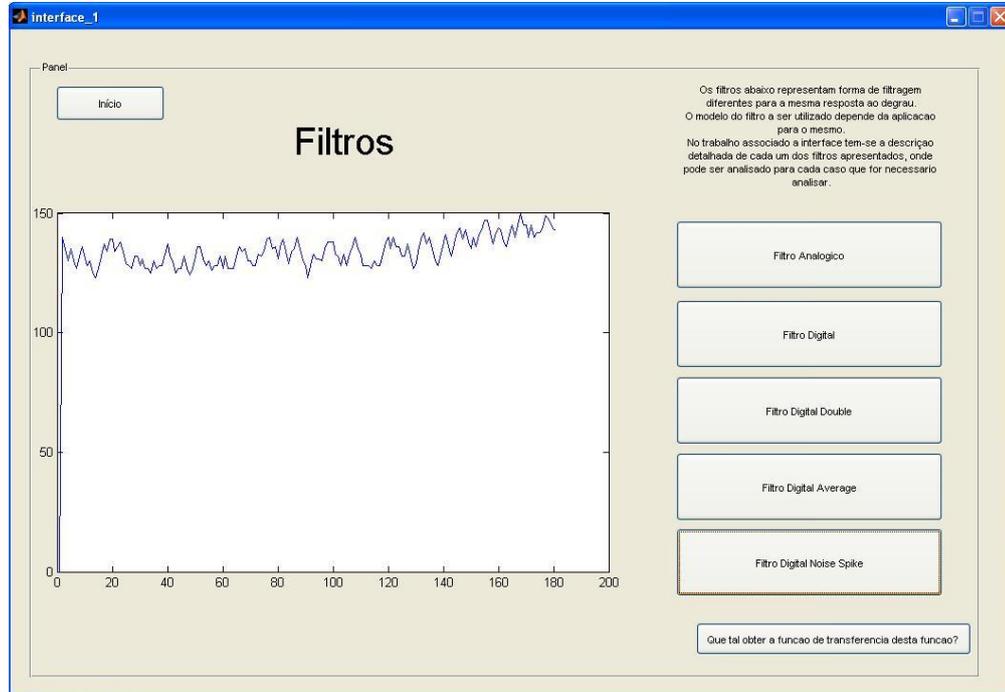
Desta forma, o filtro descrito neste tópico destina-se a limitar o quanto a saída do filtro seria capaz de mudar de um instante para outro. Com Δy podemos denotar as mudanças máximas permitidas conforme a equação 16. (COELHO)

$$y_F(k) = \left\{ \begin{array}{ll} y_m(k) & \text{se } |y_m(k) - y(k-1)| \leq \Delta y \\ y_F(k-1) - \Delta y & \text{se } y_F(k-1) - y_m(k) > \Delta y \\ y_F(k-1) + \Delta y & \text{se } y_m(k) - y_F(k-1) > \Delta y \end{array} \right\} \quad (16)$$

Se ocorre uma variação fora da margem permitida o filtro substitui a medida por um novo valor que coloque o valor dentro da faixa adequada.

Com base neste estudo pode-se apresentar a resposta para a planta que serve modelo de estudo neste trabalho.

Figura 11 - Filtro Noise-Spike



Neste caso tem-se uma resposta com maiores oscilações, porém mantendo uma regularidade e boa estabilidade e também com atraso pequeno na resposta.

4 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A partir de toda análise realizada até este ponto do trabalho é possível calcular a função de transferência da planta. Tal função pode ser encontrada com base na resposta da planta à aplicação de um degrau. A imposição de um degrau sobre a planta já foi devidamente analisada no decorrer deste trabalho, no entanto, ainda não foi calculada a esperada função de transferência da planta.

A função de transferência é capaz de representar uma planta física no domínio de Laplace e permitir um estudo sobre a planta. A partir desta função é possível calcular graficamente a resposta deste sistema à outras variações de temperatura e demais cálculos mesmo que tais análises não possam ser fisicamente aplicadas na planta em estudo.

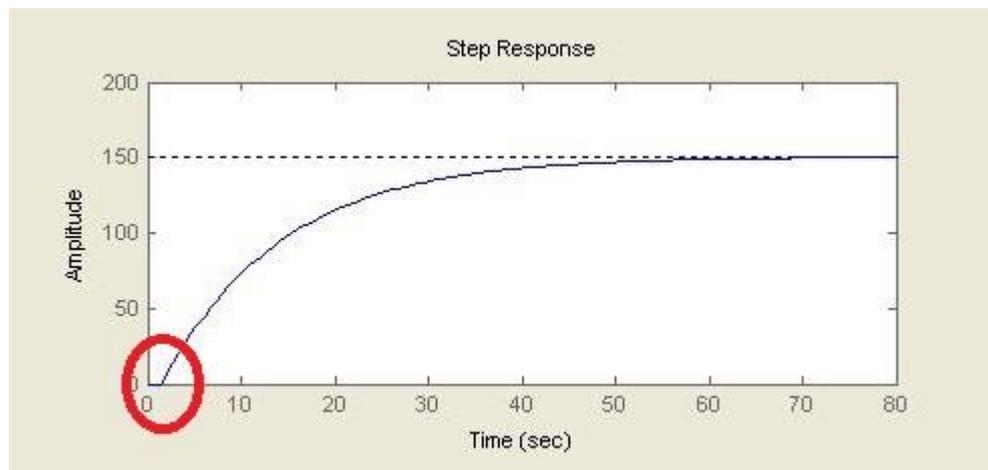
De forma prática a função de transferência pode ser obtida de forma simples com base na estrutura de uma função do Primeiro Grau.

Primeiramente uma função do Primeiro Grau pode ser genericamente representada no formato da equação 17.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s + 1/\tau} \quad (17)$$

Primeiramente é necessário calcular o atraso da função e graficamente isto pode ser obtido analisando o ponto em que o gráfico sai da “inércia”, ou seja, a partir do ponto em que podemos considerar que a planta está efetivamente respondendo ao sinal de entrada. A partir do gráfico destacado abaixo, como exemplo para estudo, é possível perceber o tempo de atraso da planta, que no caso trata de aproximadamente 3 segundos. Na figura 12 tem-se o gráfico de resposta ao degrau com o atraso marcado para orientação.

Figura 12 - Atraso na Resposta ao Degrau

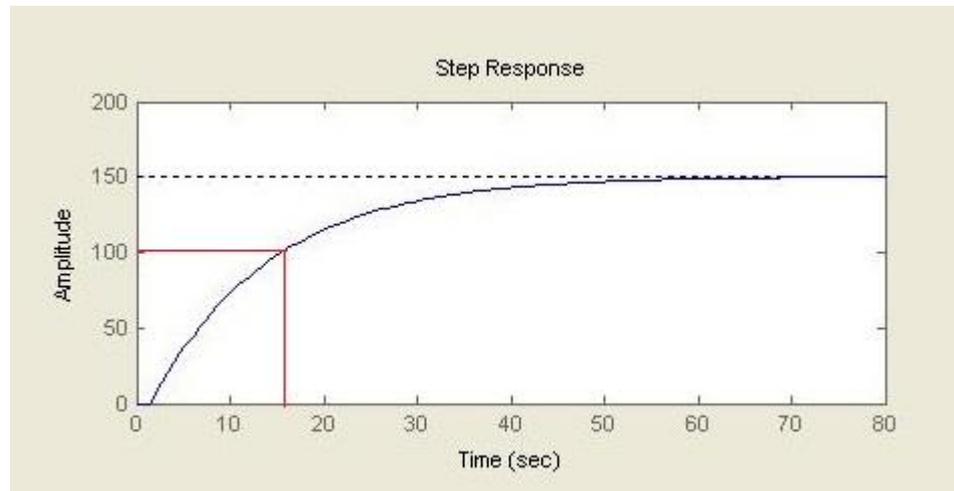


Em seguida é necessário realizar o cálculo da constante de tempo da função de transferência, denotado por τ na equação 17. A constante de tempo pode ser facilmente calculada com base no gráfico. É necessário analisar o valor inicial da planta e o valor em regime permanente e analisar o momento em que o gráfico atinge 67% do seu valor de regime permanente. O tempo que a resposta demora para alcançar este valor (desconsiderando o tempo de atraso do sistema) é a constante de tempo da função de transferência do Primeiro Grau.

Analisando o mesmo gráfico para cálculo da constante de tempo tem-se a figura 13 que mostra o valor da constante de tempo para a função a ser calculada. O valor inicial é 0 e o valor de regime permanente 150, desta forma a variação entre ambos é 150. Calculando 67%

desta variação tem-se o valor 100,5 que está destacado no gráfico da figura 13 e encontra-se no tempo de aproximadamente 16 segundos. Por fim, desconsiderando o atraso, o valor da constante de tempo será de 13 segundos.

Figura 13 - Cálculo da constante de tempo



Por último é necessário calcular o ganho da planta, representado por K na equação. O ganho pode ser calculado pela equação 18. Além desta forma de cálculo, o ganho da função de transferência pode ser calculado pela razão entre a saída e a entrada. (PEREIRA & HAFFNER)

$$Ganho_{DC} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K}{s + 1/\tau} = 150 \quad (18)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{K}{s + 1/13} = 150 \quad (19)$$

$$\frac{K}{0 + 1/13} = 150 \quad (20)$$

$$K = \frac{150}{13} = 11,54 \quad (20)$$

Com base na análise realizada chegamos a função de transferência da planta analisada que pode ser descrita pela equação 21.

$$e^{-3s} \frac{11,54}{s + 0,0769} \quad (21)$$

5 OTIMIZAÇÃO

Antes de falar sobre a implementação de Otimização neste trabalho é necessário percorrer alguns pequenos conceitos de Otimização. Primeiramente otimização pode ser definida como a busca do ótimo de uma função, ou seja, busca-se sempre o valor da função que melhor responde ao objetivo procurado. A fim de exemplificar esta técnica, podemos dizer que se estamos buscando o valor máximo de uma função, a função de otimização servirá para buscar este “ótimo” na função.

Podemos dividir inicialmente a Otimização em dois grandes grupos que seria a Programação Linear e a Programação Não-Linear.

“Programação Linear: resolução de problemas de maximização (como lucro) ou minimização (como custo) de algum objetivo, atendendo a um conjunto de restrições. Parte da modelagem do problema culmina na obtenção da solução ótima. As variáveis são reais (isto é, números não necessariamente inteiros). ” (LOESCH & HEIN)

“Programação Não-Linear: expande o alcance de programação linear, permitindo, nesse caso, que se trate de problemas em que a função objetivo e as restrições sejam equações não-lineares. Diversos algoritmos de solução são apresentados, de acordo com as características estruturais de cada variante do modelo. ” (LOESCH & HEIN)

No caso específico deste trabalho será trabalhada a técnica de otimização utilizando Programação Não-Linear. No entanto, antes disso, é necessário entender o objetivo desta otimização. O “ótimo” procurado neste são as variáveis de PID (Proporcional Integral Derivativo), ou seja, será aplicada função de um PID no sistema e procura-se o valor mais adequado para a função usando como base um algoritmo de programação não-linear para encontrar os valores das constantes do modelo PID.

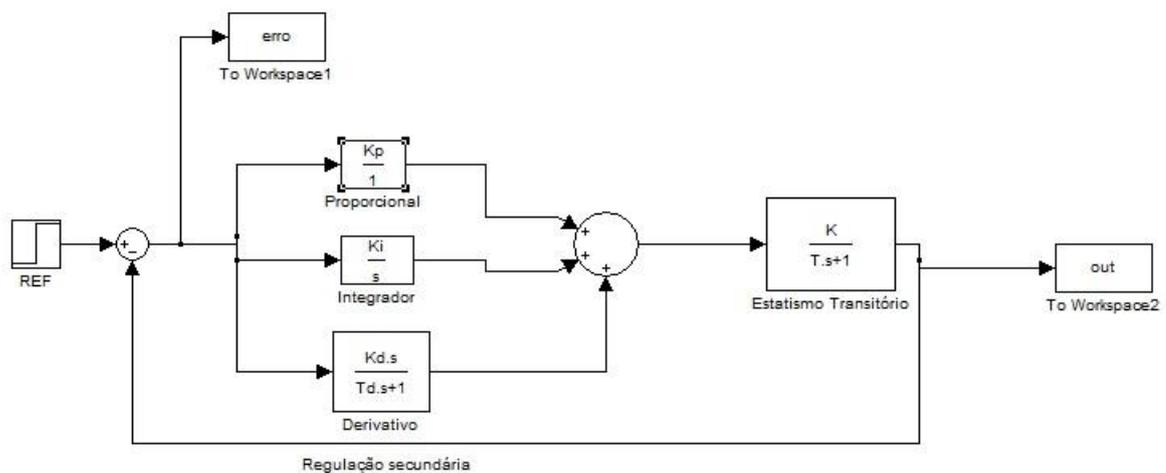
O Controlador PID é um controlador que gera sua saída proporcionalmente ao erro (P), proporcionalmente à integral do erro (I) e proporcionalmente à derivada do erro (D). A equação geral do controlador PID está descrita na equação 22. (CAMPOS & TEIXEIRA)

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_p \times \frac{1}{T_I} \times \int e(t)dt + K_p \times T_D \times \frac{de(t)}{dt} + u_0 \quad (22)$$

O fator multiplicativo K_p é conhecido como ganho do controlador, o termo T_I representa o tempo integral e seu inverso representa o ganho integral e por fim T_D representa o ganho derivativo da função.

Com base nestas informações realizou-se o desenvolvimento de um modelo de otimização que busca-se os melhores valores do controlador PID aplicados na função de transferência representada na equação 21. Na figura 14 tem-se o modelo no simulink que representa a aplicação dos controladores P, I e D na função de transferência escolhida.

Figura 14 - Simulação para aplicação do PID



Utilizando a simulação descrita o programa desenvolvido calcula a melhor resposta para o PID escolhendo a função que se deseja trabalhar. Neste caso, utilizando a equação 21 obtemos os seguintes valores para as variáveis do PID:

$$K_p = 2,5 \quad ; \quad K_I = 0,05 \quad ; \quad K_D = 0,05 \quad ; \quad T_D = 0,5$$

Desta forma, utilizando como base o formato da simulação utilizado tem-se a seguinte função de transferência representada na equação 24.

$$TF = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{T_D s + 1} \right) \left(\frac{11,54}{s + 0,0769} \right) \quad (23)$$

$$TF = \left(2,5 + \frac{0,05}{s} + \frac{0,05s}{0,5s + 1} \right) \left(\frac{11,54}{s + 0,0769} \right) \quad (24)$$

6 CONCLUSÃO

À luz do trabalho apresentado tem-se o panorama de um módulo didático que poderá auxiliar no ensino de controle no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Juiz de Fora. Acerca do trabalho, tem-se exposto alguns dos principais conceitos de controle, iniciando com a resposta do sistema ao degrau, conteúdo apresentado nas cadeiras de controle básico, em seguida tem-se a aplicação de filtros analógicos e digitais, comumente apresentada na disciplina de Controle Digital, a obtenção da função de transferência, também apresentada nas disciplinas de controle, a aplicação física dos conceitos de controle em plantas laboratoriais que pode ser destacada nas disciplinas de Controle de Processos Industriais e Laboratório de Controle e por fim a aplicação destes conceitos também em modelos de otimização, que compõe o conteúdo da disciplina de Otimização do curso. Com este breve contexto pretende-se destacar o aprendizado construído no desenvolvimento deste e sua aplicação no ambiente acadêmico como ferramenta adicional no ensino em engenharia.

Conforme destacado, os profissionais atuais, principalmente em cursos de grande importância social como Engenharia, devem ter novas habilidades e se adequar às novas demandas do mercado de trabalho. Os profissionais atualmente necessitam de, além de conhecimentos técnicos, competências conhecidas como transversais, como por exemplo, apresentação em público, discussão em equipe, gerenciamento de projetos, dentre outras habilidades fundamentais para o ambiente empresarial.

Com este trabalho espero que os alunos tenham um ponto de partida e possam desenvolver cada vez mais este trabalho, desenvolvendo novos modelos e aprimorando o módulo, a fim de aprofundar seus conhecimentos e discutir resultados de forma eficiente. Ademais pode-se destacar como futuras melhorias possíveis para o projeto:

- Implementação do controle de nível dos módulos;
- Uso mais eficiente do resfriamento da planta;
- Reduzir ainda mais os ruídos de medição da planta;
- Buscar respostas mais eficientes;
- Implementar outras metodologias de PID, com possibilidade de outros tipos de controladores;
- Desenvolver novos métodos de otimização.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G.. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. PETROBRÁS, 2010, São Paulo, 2 ed., p. 1-77.

COELHO, A. A. R.. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Filtragem Digital**. Disponível em: http://user.das.ufsc.br/~aarc/ensino/posgraduacao/DAS6613/Filtragem_digital.pdf . Acesso em: 15 de junho de 2015.

FEISEL, L. D., ROSA A. J., The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education, Journal of Engineering Education, January, p. 121-130, 2005.

LOESCH, C.; HEIN, N. **Pesquisa Operacional, Fundamentos e modelos**. São Paulo, 2009, 1 ed., pg 1-10 e 133-166

LUIGUI, A. B.; SANTOS, M. M. D. **Sistemas Fieldbus para Automação Industrial: DeviceNet, CANopen, SDS e Ethernet**. Érica Ltda, 2009.

PEREIRA, L. F. A.; HAFFNER, J. F.. In: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL. **Análise de Sistemas de Controle**. Disponível em: <http://www.feng.pucrs.br/~gacs/new/disciplinas/ascn/apostilas/Aula05.pdf> . Acesso em: 23 de junho de 2015.

PUDA, A. P. **Padronização da Comunicação através da Tecnologia OPC**. Technical report, ISA - Seção Rio de Janeiro, 2012.

SILVEIRA, M. A. A. **Formação do Engenheiro Inovador: uma visão internacional**. Sistema Maxwell, PUC, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, D. B. In: PORTAL CREA DIGITAL, 2012. **Ensinando Técnicas de Controle com o Auxílio do Protocolo OPC**. Disponível em <http://www.creadigital.com.br/portal?txt=367731333938> . Acesso em: 24 de junho de 2015.