

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM
SISTEMAS PRODUTIVOS

ALBERTO CARLOS PALAZZO

Sistema Simulador de Controle de Processos Industriais Voltado a Aplicação Didática

São Paulo
Junho/2020

ALBERTO CARLOS PALAZZO

Sistema Simulador de Controle de Processos Industriais Voltado a Aplicação Didática

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi.

São Paulo

Junho/2020

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA
FATEC-SP / CPS – CRB8 8281

Palazzo, Alberto Carlos

**155s Sistema simulador de controle de processos industriais
voltado a aplicação didática / Alberto Carlos Palazzo. – São
Paulo: CPS, 2020.**

92 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Tadeu Degaspari

**Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia
em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação
Tecnológica Paula Souza.**

**1. Ensino. 2. Sistemas Produtivos. 3. Controle de processos.
I. Degasperi, Francisco Tadeu. II. Centro Estadual de Educação
Tecnológica Paula Souza. III. Título.**

ALBERTO CARLOS PALAZZO

Sistema Simulador de Controle de Processos Industriais Voltado a Aplicação Didática

Prof. Dr. Humber Furlan

Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa

Profa. Dra. Mariana Amorim Fraga

São Paulo, 18 de junho de 2020

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiou nesta caminhada e aos meus orientadores, Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi e Prof. Dr. Humber Furlan pela dedicação e preciosas orientações no desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro e sempre acima de tudo pelo dom da vida.

A minha esposa, Nair, que esteve sempre ao meu lado nesta caminhada.

Aos meus pais Januário e Adelina, que embora já não estejam presentes, foram, são e sempre serão lembrados pela educação, carinho e formação cristã dentro da qual fui criado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi, pela disponibilidade de sempre atenderem às minhas solicitações e pelas proposições extremamente valiosas, durante os encontros de orientação.

Ao Prof. Dr. Humber Furlan que sempre se colocou à disposição para contribuir com seu conhecimento e *expertise* na solução de dúvidas e superação de dificuldades que surgiram durante todo o percurso do mestrado.

Aos professores do programa de mestrado profissional em gestão e tecnologia em sistemas produtivos, por todo conhecimento compartilhado, e aos colegas de turma pela amizade e companheirismo.

Ao amigo Jaci Vasconcellos Santanna pelo apoio técnico e pelas sugestões sempre interessantes ao longo de todo o processo construtivo do artefato.

Ao amigo Paulo César Abreu Paiva pela colaboração na construção do artefato e valiosas sugestões dadas durante o seu desenvolvimento.

Ao amigo Alexandre Erdmann Silva pela ajuda nos temas a Sistemas de Controle e modelamento matemático de motores.

Aos amigos da RQ projetos e, em particular, ao Márcio Correa, pela contribuição na construção mecânica do artefato.

Aos amigos da Saravatti pela contribuição dada ao projeto e em particular ao Raniel pelas valiosas informações sobre o funcionamento de motores de passo.

Aos amigos da Proxsys de Campinas que, com toda a paciência, me atenderam e me orientaram no uso do seu Controlador Lógico Programável para que eu pudesse aplicá-lo.

A Profa Dra Mariana Amorim Fraga, da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP) pela gentileza em participar da banca de qualificação e defesa deste trabalho.

“O dom da vida é um presente de Deus a nós e
o que fazemos dela é o nosso presente a Ele”
(Dom Bosco)

RESUMO

PALAZZO, A. C. **Sistema Simulador de Controle de Processos Industriais Voltado a Aplicação Didática**: 92 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2020.

Este trabalho insere-se no contexto do ensino de Sistemas de Controle, tema presente nos cursos de engenharias e tecnologia de controle e automação, elétrica, eletrônica e mecatrônica. Entende-se que todos os recursos que puderem ser disponibilizados para auxílio no processo ensino-aprendizagem podem e devem ser aplicados às atividades didáticas como forma de tornar menos árdua a difícil e importante tarefa de ensinar e aprender. A proposta é o desenvolvimento, construção e aplicação de um artefato cuja finalidade é contribuir com os estudantes das áreas de engenharia mencionadas para que a aprendizagem de Sistemas de Controle tenha melhores resultados didáticos. Para o alcance do objetivo, foi aplicada a metodologia de pesquisa denominada *Design Science Research*. Esta metodologia tem como eixo a proposta de construção de um artefato, cuja função é atender aos requisitos e necessidades previamente levantadas pelo pesquisador. A proposta é inovadora no sentido de que oferece aos estudantes a possibilidade de compreenderem a lógica dos sistemas de controle por malha fechada de uma maneira simples, uma vez que o artefato tem como característica principal a movimentação automática de uma mesa de coordenadas, cujo funcionamento depende de distúrbios inseridos no sistema justamente com o objetivo de avaliar se o sistema responde adequadamente à correção da perturbação. O resultado alcançado foi o funcionamento adequado do artefato, de acordo com o projeto inicialmente proposto. Por meio deste artefato os alunos poderão concretizar os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula. Nesta direção, o trabalho salienta a necessidade de se aplicar elementos inovadores no ensino como forma de se aprofundar o conhecimento adquirido teoricamente.

Palavras-chave: Ensino; Sistemas Produtivos; Controle de processos.

ABSTRACT

PALAZZO, A. C. **Sistema Simulador de Controle de Processos Industriais Voltado a Aplicação Didática**: 92 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2020.

This work is inserted in the context of the teaching of Control Systems, a theme present in the engineering and control and automation technology, electrical, electronic and mechatronic courses. It is understood that all resources that can be made available to assist in the teaching-learning process can and should be applied to activities as a way of making the difficult and important task of teaching and learning less arduous. The proposal is the development, construction and application of an artifact whose purpose is to contribute with students from the mentioned engineering areas so that the learning of Control Systems has better didactic results. To achieve the objective, a research methodology called Design Science Research was used. This methodology has as its axis the proposal to build an artifact, whose function is to meet the requirements and needs previously raised by the researcher. The proposal is innovative in the sense that it offers students the possibility to understand the logic of closed loop control systems in a simple way, since the main feature of the artifact is the automatic movement of a coordinate table, whose operation depends on of disturbances inserted in the system precisely with the objective of evaluating if the system responds adequately to the correction of the disturbance. The expected result is that through this artifact the students can realize the theoretical knowledge acquired in the classroom. In this direction, the work emphasizes the need to apply innovative elements in teaching as a way to deepen the knowledge acquired theoretically.

Keywords: Teaching; Productive Systems; Process control

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Presença de questões relativas a sistemas de controle no Enade 2005 – 2017	59
Tabela 2: Dados técnicos do Motor de passo	77
Tabela 3: Dados técnicos do Drive do Motor de Passo	78
Tabela 4: Dados técnicos do Controlador Lógico Programável.....	79
Tabela 5: Custos de materiais e serviços	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sinal em degrau	21
Figura 2	Tipos de sinais	22
Figura 3	Ciclo da Automação	23
Figura 4	Controlador Centrífugo de James Watt	25
Figura 5	Pirâmide da Automação	28
Figura 6	Regime permanente x Regime transitório	32
Figura 7	<i>Overshoot</i>	33
Figura 8	Ganho	33
Figura 9	Ganho com dimensões	33
Figura 10	Ganho proporcional	34
Figura 11	Dois ganhos diferentes	34
Figura 12	Controle Proporcional gerando <i>offset</i>	34
Figura 13	Efeito do ganho proporcional	35
Figura 14	Ajuste de ganho alto	36
Figura 15	Controle proporcional aplicado a processo térmico	36
Figura 16	Saída linear resultante de erro não-zero	37
Figura 17	Saída resultante de um sinal de erro zero	37
Figura 18	Resposta do controlador a um erro devido ao controle integral	37
Figura 19	Tempo de reset x taxa de reset	38
Figura 20	Ajuste correto da ação integral	39
Figura 21	Efeito do ajuste de tempo de reset alto ou de uma taxa de reset baixa	39
Figura 22	Um tempo de reset baixo (taxa de reset alta) resulta em um sistema instável	39
Figura 23	Diagrama de blocos de um Sistema de Controle usando Controle Proporcional-Integral	40
Figura 24	Resposta do controlador para o controle proporcional x controle PI	41
Figura 25	Controle PI x Controle PD	42
Figura 26	Diagrama de blocos de um sistema operando com controle derivativo	42
Figura 27	Resposta derivativa a um sinal de erro variando a uma taxa muito rápida	42
Figura 28	Resposta derivativa a um sinal de erro variando a uma taxa lenta	42
Figura 29	Resposta derivativa a um erro constante	43
Figura 30	Resposta derivativa a uma mudança em degrau no erro	43
Figura 31	Mudança em degrau com e sem filtro	44
Figura 32	Resposta derivativa a uma mudança em degrau com filtro	44

Figura 33	Diagrama de blocos de um sistema de controle de processos utilizando o Controle Proporcional-Derivativo	44
Figura 34	Resposta proporcional – derivativa a um erro	44
Figura 35	Resposta proporcional x resposta proporcional - derivativa	45
Figura 36	Resposta de um processo para um ajuste alto	45
Figura 37	Malha de controle fechada	46
Figura 38	Efeito do controle Proporcional-Integral-Derivativo	46
Figura 39	Resposta do processo ao Controle Proporcional-Integral-Derivativo	47
Figura 40	As quatro vertentes do <i>Design Science Research</i>	62
Figura 41	Bancada Didatech	66
Figura 42	Bancada Exsto	67
Figura 43	Bancada Solis	67
Figura 44	Projeto original	71
Figura 45	Cabeçote de sensorização	72
Figura 46	Cabeçote de sensorização sobre a mesa	72
Figura 47	Sistema completo	73
Figura 48	Perfil de alumínio	75
Figura 49	Motor de passo	76
Figura 50	Drive WD – 2404	77
Figura 51	Controlador Lógico Programável	78
Figura 52	Sensor óptico	79
Figura 53	Válvula de processo automatizada	81
Figura 54	Mesa de coordenadas tridimensional	82
Figura 55	Cabeçote de sensorização tridimensional	83

LISTA DE SIGLAS

CNE	Conselho Nacional de Educação
ENADE	Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes
IES	Instituição de Ensino Superior
INEP	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas “Anísio Teixeira”
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica
MEC	Ministério da Educação e Cultura
RUF	Ranking Universitário Folha
SBA	Sociedade Brasileira de Automática
PPC	Projeto Pedagógico de Curso

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
1.1. Engenharia.....	17
1.2. A Automação	20
1.3. Engenharia de Controle e Automação – Caracterização.....	29
1.3.1. Conceitos fundamentais de Controle.....	30
1.4. Ensino de controle e automação.....	46
1.5. Engenharia de Controle e Automação no Brasil.....	47
1.6. Formação em Controle e Automação.....	49
1.7. A Indústria 4.0 e o Ensino de Sistemas de Controle.....	50
1.8. Experimentos e laboratórios.....	51
1.9. Laboratórios de Controle.....	53
1.10. Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE).....	57
1.11. Design Science.....	58
1.11.1. Características do Conhecimento Gerado.....	59
2 METODOLOGIA.....	64
2.1. Pesquisa bibliográfica.....	64
2.2. Principais produtos oferecidos pelo mercado.....	66
2.3. Pesquisa aplicada a docentes da área de Controle e Automação.....	66
2.4. A proposta de artefato deste trabalho.....	68
2.5. O funcionamento.....	71
2.6. A construção do artefato.....	72
2.6.1. Perfis de alumínio.....	73
2.6.2. Motor de passo.....	73
2.6.3. Drive do Motor de passo.....	74
2.6.4. Controlador Lógico Programável.....	75
2.7. Custos de Construção do artefato.....	78
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	84
5. REFERÊNCIAS.....	87
6. APÊNDICES.....	89

INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda dois campos do conhecimento interligados e extremamente significativos em termos de avanço tecnológico. Ensino e sistemas de controle. Ambos são extremamente complexos, diversificados e requerem aprofundados estudos para o seu conhecimento, ainda que parcial, visto que dada sua amplitude se torna impossível o seu pleno domínio.

Sistemas de Controle é um tema de suma importância em diferentes campos do conhecimento tecnológico como, por exemplo, nos processos produtivos, aviação e saúde. O conhecimento deste tema é adquirido em cursos técnicos, tecnológicos e de engenharia voltados às áreas da elétrica, eletrônica, mecatrônica e de controle e automação.

Sendo um tema inserido em diferentes segmentos da engenharia, requer para a sua plena aprendizagem que haja a aliança entre teoria e prática.

O ensino de Sistemas de Controle é, portanto, altamente dependente da existência de infraestrutura adequada para que os alunos possam compreender com clareza e profundidade os conceitos que governam este assunto. Sendo assim, quando uma instituição de ensino pretende oferecer um curso de engenharia ou tecnologia nas áreas mencionadas, vários fatores devem ser considerados, entre os quais os custos de implantação, dado que a formação em engenharia exige altos investimentos em infraestrutura para a adequada formação prática de seus alunos.

É importante mencionar que a infraestrutura mínima para se implantar cursos de engenharia no Brasil não possui normas específicas, ficando a cargo da Instituição de Ensino Superior (IES) definir como equipar seus ambientes de ensino, de acordo com o Projeto Pedagógico de Curso (PPC).

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um equipamento (artefato) cuja função é contribuir no processo ensino – aprendizagem dos alunos das áreas de engenharia elétrica, eletrônica e controle e automação, especificamente no ensino de Controle Automático de Processos. A proposta tem em foco três fatores de suma importância. Em primeiro lugar, a contribuição que a utilização deste equipamento trará à aprendizagem dos

alunos nesta área, uma vez que existem disponíveis no mercado diferentes alternativas para ensino deste tema, porém nenhuma que se assemelhe à proposta aqui apresentada, até onde se pesquisou. Segundo, a simplicidade construtiva e, terceiro, o baixo custo.

O objetivo, portanto, é o desenvolvimento de um sistema eletromecânico a ser utilizado no ensino dos tópicos que formam a Teoria dos Sistemas de Controle, buscando tornar mais fácil a sua compreensão. Complementando, é importante ressaltar que a proposta se fundamentou nas seguintes premissas:

- O sistema proposto deve ter um custo menor quando comparado com os sistemas didáticos ofertados pelo mercado;
- O sistema deve propiciar aos alunos a possibilidade de executar os exercícios práticos em sala de aula caso a instituição não disponha de ambientes para aulas práticas;
- O sistema deve oferecer a oportunidade de que os alunos visualizem de maneira direta as reações do sistema quando da aplicação das diferentes ações de controle;
- O sistema deve propiciar ao docente o desenvolvimento de diferentes propostas de experimentos conforme sua avaliação da capacidade dos alunos em apreender os conceitos físicos e matemáticos que fundamentam a Teoria dos Sistemas de Controle.

Conforme mencionado anteriormente, as instituições de ensino superior dispõem no mercado de diferentes alternativas de equipamentos didáticos para o ensino de Teoria dos Sistemas de Controle. Porém, para muitas delas os valores de aquisição destes equipamentos são proibitivos, o que faz com que acabem optando pelo ensino puramente teórico, tornando assim o processo ensino-aprendizagem extremamente empobrecido, não conduzindo os alunos à aquisição de conhecimentos e habilidades necessárias ao profissional que irá atuar nesta área.

O método a ser utilizado será *Design Science Research*, uma vez que se trata de um método cujas características se mostram adequadas à proposta do trabalho. A principal proposta deste método é ser voltado totalmente ao desenvolvimento de um artefato, sua aplicação prática e consequente avaliação dos resultados alcançados.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. Engenharia

A atividade de engenharia é, essencialmente, desenvolvida em termos de planejamento, implementação e gerenciamento de intervenções em recursos naturais com vistas a transformá-los em bens a serem utilizados pelos seres humanos. Estas intervenções possuem duas características fundamentais: são sempre de base tecnológica e devem levar em conta os impactos econômicos, ambientais e políticos.

As ciências de base de toda a engenharia são a matemática, a física e a química. Numa perspectiva histórica, a engenharia praticada no início do século XX, tinha como objetivo principal a transformação de energia e de materiais. Desde então, esta visão passou por muitas mudanças em função da própria evolução tecnológica e por novas demandas sociais, oriundas da evolução e conscientização do ser humano sobre a utilização dos recursos naturais e seu possível esgotamento e pelas alterações provocadas no planeta em função da utilização destes mesmos recursos. (SILVEIRA, 2007, p. 63).

A engenharia do século XXI, portanto, difere muito daquela praticada há um século. Novos campos foram criados a partir de ciências que a princípio não pareciam ter nenhum ponto em comum com a engenharia, como por exemplo, a engenharia genética, que une engenharia e biologia, enquanto outros campos nasceram do desmembramento de áreas de engenharia pré-existent, como a engenharia de computação, por exemplo. A Resolução 11/2002 da Câmara de Educação Superior (CES) do Conselho Nacional de Educação (CNE) afirma que “A formação do Engenheiro tem por objetivo dotar o profissional dos conhecimentos requeridos para o exercício das seguintes competências e habilidades gerais”. (SILVEIRA, 2007, p. 63).

- I - Aplicar conhecimentos matemáticos, científicos, tecnológicos e instrumentais à engenharia;
- II - Projetar e conduzir experimentos e interpretar resultados;
- III - Conceber, projetar e analisar sistemas, produtos e processos;
- IV - Planejar, supervisionar, elaborar e coordenar projetos e serviços de engenharia;
- V - Identificar, formular e resolver problemas de engenharia;
- VI - Desenvolver e/ou utilizar novas ferramentas e técnicas;

- VI - Supervisionar a operação e a manutenção de sistemas;
- VII - Avaliar criticamente a operação e a manutenção de sistemas;
- VIII - Comunicar-se eficientemente nas formas escrita, oral e gráfica;
- IX - Atuar em equipes multidisciplinares;
- X - Compreender e aplicar a ética e responsabilidade profissionais;
- XI - Avaliar o impacto das atividades da engenharia no contexto social e ambiental;
- XII - avaliar a viabilidade econômica de projetos de engenharia;
- XIII - assumir a postura de permanente busca de atualização profissional.

Nos dias atuais a engenharia se faz presente em campos de atividade distantes entre si, mas onde os profissionais de engenharia podem desenvolver suas atividades de maneira a contribuir de forma substancial com o alcance de resultados e metas pré-estabelecidas. Neste aspecto cumpre lembrar o grande número de egressos das escolas de engenharia que migram para carreiras na área financeira, por exemplo.

Além destas novas aplicações denominadas como aplicações de engenharia, outras há que também se servem deste mote para se enquadrarem naquilo que denomina-se engenharia, como por exemplo, a engenharia de alimentos e a engenharia de software, que em sua essência produz não produtos tangíveis mas sim produtos virtuais cuja função é contribuir na produção de bens tangíveis e possibilitar o aumento de sua produtividade e do controle do processo produtivo.

Nas últimas décadas em particular, graças ao aumento expressivo do uso de equipamentos de base eletrônica, surgiram novas áreas de atuação para o engenheiro, como por exemplo, a modelagem de produtos ou ainda a modelagem de análise de riscos para aplicações financeiras. Outro campo de trabalho que surgiu nesta caminhada foi a área de consultoria, que gerando relatórios cria instrumentos orientadores de decisões no nível tático e estratégico de empresas privadas e instituições públicas. Neste contexto de novos campos de trabalho e novas vertentes da engenharia cabe destaque à Engenharia de Energia. A Universidade Federal do ABC informa por meio de seu site (<http://cecs.ufabc.edu.br/index.php/cursos-de-graduacao/5-energia.html>) que o egresso do curso de Engenharia de Energia:

se habilita a ser capaz de discutir e propor soluções aos desafios contemporâneos na área de conversão, transporte e uso final das mais diversas formas de manifestação de energia. Ele poderá aplicar os conhecimentos científicos e tecnológicos no desenvolvimento desse setor, considerando os fenômenos e a realidade sociocultural e econômica sob a perspectiva da sustentabilidade.

Esse profissional também estará apto a conceber, projetar e analisar sistemas energéticos e planejamentos estratégicos, identificar técnicas e tecnologias de

otimização de consumo de energia em processos industriais, avaliar criticamente a operação e manutenção de sistemas energéticos (redes de distribuição e transporte), avaliar o impacto socioeconômico e político ambiental das ações privadas ou públicas, avaliar a viabilidade econômica, social e política de projetos, desenvolver, implementar e gerenciar políticas, programas e projetos nas áreas de energia e desenvolver e/ou utilizar novas ferramentas e técnicas para solução de problemas energéticos regionais ou globais.

A leitura e análise da proposta do curso permite observar que este profissional deverá estar à frente de desafios que envolvem diferentes áreas do conhecimento como Geração, Transmissão e Distribuição de Energia, Sistemas de Controle para Eficiência energética, além de ter capacidade de análise para poder avaliar situações e projetos que se apresentem para serem solucionados ou desenvolvidos. A abrangência da proposta deixa claro que a formação desse profissional deverá ser não apenas de cunho tecnológico, mas também deverá propiciar a aquisição de conhecimentos humanísticos, habilidades e atitudes necessários ao bom desempenho da atividade profissional.

O trabalho de engenharia na maior parte dos casos foca-se em questões tecnológicas como meio para se alcançar objetivos econômicos, essência da existência de empresas e mercados. Produzir mais e melhor traz benefícios de diferentes naturezas, como a redução do custo, o aumento da disponibilidade de um determinado produto ou ainda do aumento no nível de segurança na utilização deste.

Hoje, pode se afirmar que a complexidade dos temas tratados no campo da engenharia faz com que seja necessária a formação de equipes multidisciplinares compostas por profissionais de diferentes áreas além da engenharia para dar conta de aspectos que não estão apenas na esfera tecnológica, mas também na esfera jurídica, social e ambiental.

O profissional de engenharia é por essência um solucionador de questões que se colocam a partir de diferentes fontes. Pode ser, por exemplo, a necessidade trazida pelas forças de mercado, ou ainda as imposições regulatórias que exijam novas alternativas tecnológicas como forma de proteger os consumidores de um determinado produto. Em resumo, a atividade de engenharia é antes de tudo racional, e o seu sucesso é medido pelo alcance total ou parcial de objetivos e metas preestabelecidos.

Na busca pela solução de dada questão, o profissional de engenharia faz uso das práticas e técnicas disponíveis no acervo de conhecimentos ou, caso não encontre neste acervo as técnicas e práticas de que necessita, desenvolve novas e chega ao que se denomina “estado da arte”. Quando, diante de um determinado problema, existe a possibilidade de uso

de diferentes técnicas e estas se encontram devidamente descritas e sistematizadas afirma-se que existe uma tecnologia que abrange aquele determinado tema em estudo.

Este círculo virtuoso de necessidades que geram soluções e de soluções que geram novas necessidades forma a espiral do desenvolvimento tecnológico e por consequência, humano.

É mister mencionar que o fazer do engenheiro não é a ampliação do estoque de conhecimentos, mas a utilização desse repositório para a solução de problemas que se apresentam. Desta forma, quando este se depara diante de uma questão que não possui solução por meio do conhecimento posto, a pesquisa científica e não a engenharia é o caminho adequado para esta ampliação de conhecimentos e alcance da solução. A engenharia busca a solução de questões e problemas que se apresentam e cuja solução é provocada, em última análise, por interesses humanos, o que gera a necessidade de um olhar do ponto de vista ético sobre qualquer questão que se apresente para ser solucionada.

Outro aspecto extremamente importante tratando-se de engenharia é que, ao mudar a técnica, muda-se também a cultura, uma vez que as alterações tecnológicas provocam mudanças comportamentais e estas se configuram como culturais quando alcançam grande capilaridade social. Como por exemplo, mencionem-se as profundas alterações sociais e políticas surgidas no bojo das inovações tecnológicas como os computadores pessoais, o telefone celular e a internet.

Atualmente, o engenheiro ao iniciar um novo projeto deve ter em mente as possíveis implicações humanas, sociais e ambientais daquela empreitada e ao considerar estas variáveis deve analisar de largada se a proposta está fadada ao fracasso ou tem possibilidades de êxito. Portanto, fica claro que a análise puramente técnica é muitas vezes insuficiente para abarcar todos os aspectos presentes em determinados projetos.

Complementando, é fundamental, portanto, que entre as capacidades do profissional de engenharia esteja presente a capacidade de atuar em equipe com profissionais de outras áreas uma vez que existe quase sempre a necessidade de se avaliar aspectos multidisciplinares de projetos e propostas de cunho tecnológico.

1.2. A automação

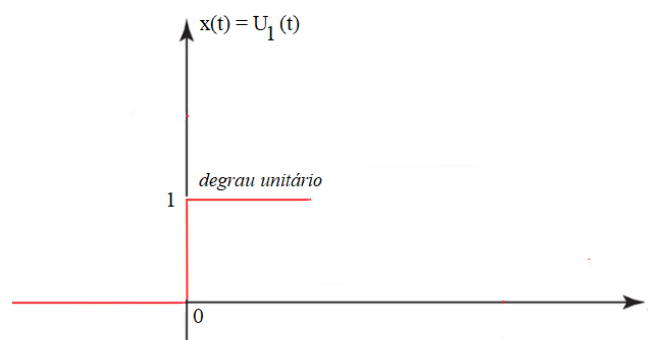
A etimologia da palavra automação refere-se a um termo proveniente do latim *automatus* e significa mover-se por si. Modernamente, automação é a aplicação de técnicas

computadorizadas ou mecânicas com o objetivo de tornar um processo mais eficiente, maximizando a produção com menor gasto de energia e gerando maior segurança, em suma, aumentando a produtividade. Nesta busca, alcança-se a redução do gasto de energia e/ou da aplicação de mão de obra especializada em atividades de baixa geração de valor, consumo de tempo, desperdícios, retrabalhos e outros aspectos que além de gerarem custos, não contribuem com o valor final do produto.

Alguns conceitos devem ficar claros desde o início quando se aborda o tema automação de forma abrangente. Em primeiro lugar cabe definir sistema como sendo um conjunto de elementos interdependentes de modo a formar um todo organizado. É uma definição que acontece em várias áreas do conhecimento como biologia, medicina, informática, administração, direito e diversos outros campos de conhecimento.

Em segundo lugar, é importante definir o termo “sinal” no campo da automação. Este termo, muito utilizado neste campo tecnológico, refere-se à alteração do valor de uma grandeza física com vistas a se obter um resultado previamente estipulado. Em outras palavras, quando um sensor, por exemplo, é tocado por algum elemento de uma máquina e este toque tiver que ser informado a algum dispositivo de controle, afirma-se que este sensor gerou um sinal. Na realidade, a corrente elétrica que percorre o cabo que interliga este sensor ao dispositivo de controle muda de valor, saindo de zero quando o sensor estava em estado de repouso, para um valor pré-definido no projeto do sistema quando o sensor é acionado. Este tipo de sinal é também denominado sinal em degrau. Observe-se a figura 1 a seguir:

Figura 1 – Sinal em degrau

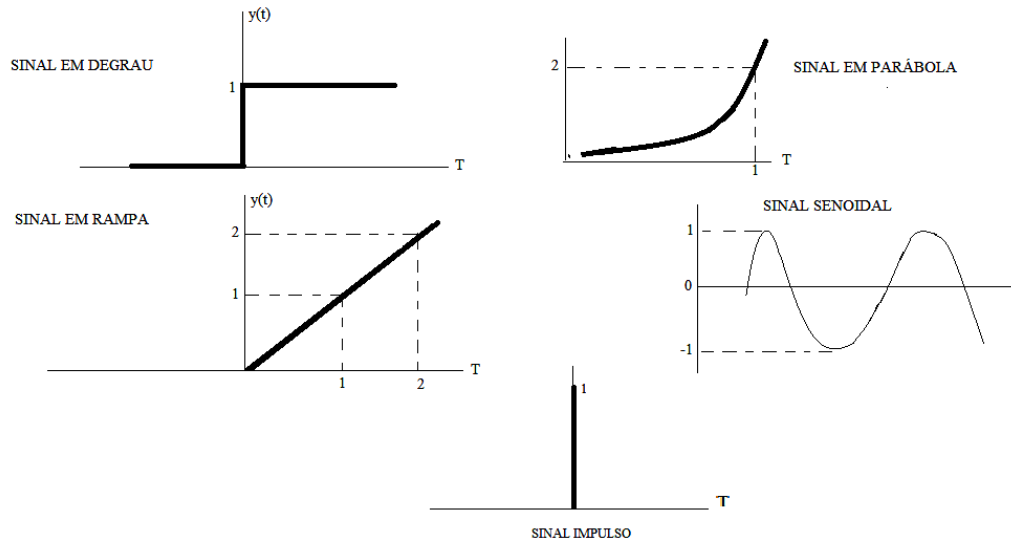


Um exemplo simples de um sinal em degrau ocorre ao apertar um botão para solicitar um elevador. Ao se acionar o botão está se emitindo um sinal ao comando do elevador para que ele atenda ao chamado de determinado andar.

Mas a geração de um sinal não ocorre apenas na forma de um degrau, outras formas de sinais existem no universo da automação. Dependendo da grandeza a ser controlada no

processo pode se ter sinais em forma de uma rampa ou de uma parábola ou ainda um sinal em forma de uma senóide. A figura 2 apresenta estes sinais.

Figura 2 – Sinais típicos



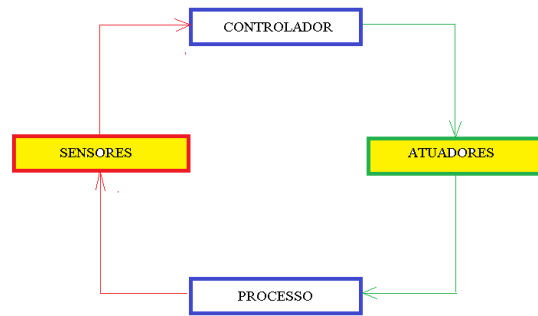
Fonte: adaptado de Engenharia de Sistemas de Controle, Norman S. Nise

A função de um sinal é transportar uma informação, a qual irá gerar uma decisão automatizada, a partir e a partir desta se inicia uma ação física (um movimento mecânico rotativo ou linear, ou a combinação de ambos ou ainda um sinal resultante em forma de onda sonora ou eletromagnética) que irá disparar ações complementares com fins pré-definidos.

A reflexão a respeito do funcionamento de sistemas automatizados leva à conclusão de que somente os seres humanos interpretam dados como informações e tomam decisões a partir deles, ao menos por enquanto. Quanto às máquinas e sistemas estes apenas geram sinais e dados.

Em terceiro lugar cabe apresentar um conceito que é denominado “ciclo da automação”. Este conceito procura tornar claras as diferentes funções de cada um dos elementos que compõem processos automatizados, conforme figura 3.

Figura 3 – Ciclo da automação



Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/11907476/7/image7/CICLO+DA+AUTOMA%C3%A7%C3%A3o.jpg>, acesso em 02/11/2019

Os quatro elementos presentes na figura 3 compõem a essência de qualquer projeto de automação. Cabe lembrar que o importante neste contexto é o bloco onde está representado o processo, pois é ali que todos os demais elementos do ciclo devem executar as suas funções. O resultado de um sistema como esse, quando bem implementado e bem configurado é um processo que permanentemente se mantém dentro de parâmetros estipulados para que se obtenha um resultado de alta qualidade ao seu final.

Os sensores são elementos captadores dos valores das grandezas que influenciam o processo. Portanto, pode-se afirmar que os sensores são as “sentinelas” do processo, mantendo-o sempre sob vigilância. Quando alguma grandeza influente no processo foge de seus valores prescritos, é o momento de o controlador provar sua função. Cabe a este elemento receber os valores informados pelos sensores e compará-los a valores prescritos em sua memória. Caso estes dois valores não coincidam, o controlador deve disparar uma ordem que vai chegar até os atuadores. Estes têm por missão alterar os valores físicos das grandezas influentes no processo para restabelecer os valores ideais. O ciclo então se reinicia de forma a monitorar esta nova realidade. É importante ressaltar que o tempo para a execução de todas as etapas do ciclo pode ser de alguns milissegundos, dependendo do processo.

Diversas e diferentes máquinas desenvolvidas ao longo dos tempos permitem compreender a evolução humana no campo tecnológico. As primeiras máquinas eram na verdade prolongamentos dos sentidos humanos. Nesta classe pode se incluir as primeiras alavancas, polias e aríetes, os quais amplificavam a capacidade humana de exercer força. As primeiras máquinas que convertiam energia dependiam da energia contida no vento ou no movimento das águas, tais como moinhos e barcos.

Sob o enfoque da automação, pode se entender que a primeira máquina automática foi a clepsidra de Ktesibios, em 270 AC, que na verdade era um dispositivo para controle de nível a partir de uma válvula cuja abertura era controlada pelo próprio nível do tanque.

Ao longo dos séculos XIV e XV foram feitos grandes desenvolvimentos particularmente na área da relojoaria, podendo-se afirmar que os relógios foram as primeiras

máquinas realmente automáticas, pois funcionavam sem a interferência humana.

Já no início do século XVII surgiram as primeiras máquinas complexas de conversão de energia. A partir do desenvolvimento da válvula da panela de pressão por Papin em 1601, outras invenções vieram trazer grande evolução como, por exemplo, a máquina a vapor de T. Savery (1698) que era equipada com caldeiras, pistões, engrenagens e válvulas controladas manualmente para acionar um eixo, gerando torque. Thomas Newcomen conseguiu em 1712 automatizar a manipulação de válvulas de vapor, porém em função da alimentação de energia ser proveniente do carvão e este ter baixa homogeneidade, a regularidade da marcha era ainda muito pequena. No entanto, estas máquinas encontraram sua utilização no bombeamento de água em minas de carvão onde esta deficiência era menos danosa.

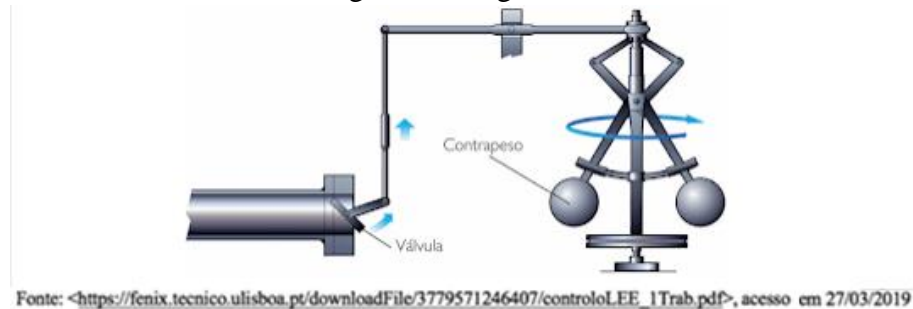
Em 1738, surgem os bonecos autômatos de J. Vaucanson, os quais executavam música a partir de movimentos de polias e cabos acionados por fontes de energia externas. Eram feitas para uma única partitura definida previamente antes de sua fabricação.

Do século XVIII em diante, em função de uma indústria nascente no continente europeu, surgiram diferentes invenções que vieram trazer enormes benefícios ao processo produtivo que nesta época migrava de artesanal para industrial. Destaque-se os primeiros teares automáticos, boias para caixas d'água e para caldeiras, controladores de descarga e reguladores de temperatura para uso industrial. Nestes inventos todos, cabe salientar, que era utilizada a realimentação da saída para manter constante o seu valor que fazia com que funcionassem como reguladores.

Um dos primeiros exemplos de controle em automação provém dos moinhos de vento. Em 1745 E. Lee patenteou um leme que apontava o moinho na direção do vento, sendo este um primeiro exemplo de adaptação automática. Nesta época já eram utilizados reguladores centrífugos, onde um sensor media a rotação do eixo do moinho e corrigia as variações de velocidade causadas por flutuações na força do vento, aproximando ou afastando a distância das mós, controlando a qualidade da farinha.

Um marco histórico foi a invenção da máquina a vapor de James Watt, o qual, a partir da máquina de Newcomen promoveu diversas modificações elevando a sua eficiência em 75%, chegando quase ao seu limite técnico. Este fato costuma ser mencionado como o início da revolução industrial. Uma invenção não tão conhecida, mas igualmente importante foi a do regulador de Watt. Observe-se a figura 4, a seguir:

Figura 4 – Regulador de Watt



Este equipamento, mediante a sua regulação pelo operador, mantém a máquina em seu ponto de operação, de maneira que a abertura da válvula será regulada pela velocidade da marcha da máquina, isto é, quando a velocidade aumenta demasiadamente, o regulador abre e a válvula fecha reduzindo a passagem de vapor e, por consequência, reduzindo a velocidade da máquina. Em sentido oposto, caso a velocidade diminua a marcha, o regulador reduzirá a sua rotação, fazendo com que a válvula abra, aumentando assim a quantidade de vapor a ser injetado na máquina. Este dispositivo, embora simples, é extremamente engenhoso, e é por muitos estudiosos de sistemas de controle considerado o primeiro servomecanismo.

O servomecanismo é um conceito extremamente importante e se faz presente até a atualidade em veículos e em muitas aplicações industriais. O conceito básico de um servomecanismo é fazer com que uma pequena parcela da energia gerada pela máquina seja desviada por um sensor ou aparelho de medida, transportando informação (neste caso, a velocidade da máquina) que, aplicada a um atuador (a válvula de vapor da caldeira) resulta no comportamento desejado do equipamento. Esta regularidade automaticamente controlada permitiu estender o uso de máquinas a vapor ao transporte terrestre e marítimo e à movimentação de teares e de outros equipamentos industriais.

Ao longo do século XIX outras máquinas dotadas de regulação automática surgiram e o conceito central, que é a realimentação da informação em malha fechada foi formalizado e melhor compreendido, mas sempre tratado empiricamente. O desenvolvimento da teoria do controle é datado dos trabalhos pioneiros de J.C. Maxwell (1868) e J. Vyshnegradskii (1876). Ambos seguem a mesma linha de raciocínio, individualizando o conceito de controlador, uma nova máquina adicionada à máquina motriz cuja função é recolher informação, transformá-la e utilizá-la sobre o atuador para impor o comportamento desejado. Este comportamento é uma escolha do operador ou do programador do sistema e deve permanecer inalterado mesmo diante de eventos externos ao sistema (perturbações).

O trabalho de Vyshnegradskii foi baseado no trabalho de A. M. Lyapunov, que definiu o conceito de estabilidade de forma abstrata, indo além de sua compreensão mecânica,

apresentando metodologias que ainda hoje influenciam decisivamente os desenvolvimentos da teoria de controle. (Silveira, 2007).

Outra característica importante destes trabalhos é o uso da formalização matemática através de uma modelagem apropriada do sistema e de seu controlador. A partir desse momento, a modelagem tornou-se uma ferramenta essencial em projetos de engenharia.

Na evolução do conhecimento sobre Sistemas de Controle cabe lugar especial ao trabalho do engenheiro Oliver Heaviside que foi o criador do conceito de função de transferência entre 1892 e 1898.

Desta época até a primeira guerra mundial surgiram as máquinas que transportam informação seja de forma analógica (telefone, rádio) ou digital (telégrafo). Nestes equipamentos importa mais a forma do sinal elétrico, térmico ou sonoro, ou da onda eletromagnética, não mais a potência do sinal, que passa a ser uma limitação.

A necessidade de se estender linhas de transmissão intercontinentais trouxe também a necessidade de se amplificar o sinal, isto é, aumentar sua potência, sem alterar a sua forma. Lembre-se que o amplificador elétrico típico se baseia na realimentação do erro entre o sinal recebido e transmitido. Esta aplicação trata-se de mais uma aplicação baseada nos conceitos desenvolvidos por H. S. Black (1927), H. Nyquist (1932) e H. W. Bode (1938). A partir destes desenvolvimentos, novos campos passaram a fazer uso da teoria dos controles, graças à criação de novos equipamentos que permitem ao fluxo de informações alterar o fluxo de potência tais como comutadores e relês, válvulas elétricas, hidráulicas ou pneumáticas, transistores, motores controlados, etc. (SILVEIRA, 2007, p. 85).

Nyquist e Bode observaram que a função de transferência era uma função de variável complexa, à qual podia ser aplicada a riquíssima teoria deste tipo de função. Esta observação matemática permitiu uma verdadeira explosão dos métodos de projeto na área de controle e automação. Além desses desenvolvimentos, as ideias de Henry Poincaré foram a base para a aplicação das teorias de equações diferenciais não-lineares aos sistemas de controle. Um dos cientistas que desenvolveram novos dispositivos a partir destas ferramentas matemáticas foi A. Andronov, criando a teoria das oscilações. (SILVEIRA, 2007, p. 86).

O desenvolvimento das máquinas mais complexas construídas no período das duas guerras mundiais, como navios, radares e outros, foi possível em função do aperfeiçoamento das primeiras técnicas de automação industrial utilizando sistemas de segurança e de acionamento baseados nos primeiros sistemas de comutação (eletromagnéticos e mecânicos). Grandes contribuições foram trazidas nesta época por John Von Neumann e N. Wiener como máquinas digitais com um número finito de estados. (SILVEIRA, 2007, p. 92).

Por volta da segunda metade da década de 40 do século passado, começam a surgir os primeiros computadores. Nasce assim também o processamento de dados digitalmente codificado, uma vez que em essência um computador é uma máquina digital sequencial, isto é, dotada de um relógio interno e de um sistema de acionamento a intervalos regulares, com memória. Neste tipo de máquina pode se misturar instruções e dados. (Von Neumann, 1945).

Nesta etapa do desenvolvimento da engenharia de controle e automação surgem as primeiras manifestações ecológicas que trazem embutida uma definição de sistema que rapidamente seria absorvida pela biologia e pela engenharia de computação. Nesta visão define-se sistema como sendo um todo dinâmico formado por partes interagindo entre si e com o ambiente que as envolve, incluindo fluxos de energia e fluxos de informação gerando, inclusive, malhas de realimentação. A atividade científica e tecnológica levou à aplicações construídas pelo homem, incluindo a principal delas, o computador.

Em 1948, Claude Shannon traz aquela que seria talvez a mais importante contribuição ao processo de desenvolvimento das telecomunicações, apresentando sua famosa teoria da comunicação criando um modelo para pensar o problema da transmissão de informação codificada e o de sua quantidade, identificando o *bit* como unidade de informação. (SILVEIRA, 2007, p. 97).

Desta forma a distância entre o mundo real (analógico) e o mundo virtual (digital) foi se tornando cada vez menor, graças ao desenvolvimento de máquinas cada vez menores, mais rápidas, mais potentes e de menor custo.

Juntando os diversos conceitos apresentados até então, Wiener definiu a cibernética, em 1948, um estudo prospectivo do encontro sobre as possibilidades científicas e tecnológicas da união de sistemas (físicos, químicos, biológicos; de dinâmicas de natureza contínua, a eventos discretos ou híbridos), realimentações e processamento de dados e informações. A cibernética não é uma ciência ou uma técnica, mas uma especulação informada sobre suas possibilidades, a partir dos novos paradigmas explicativos que apareceram ao longo do desenvolvimento das teorias de controle e informação.

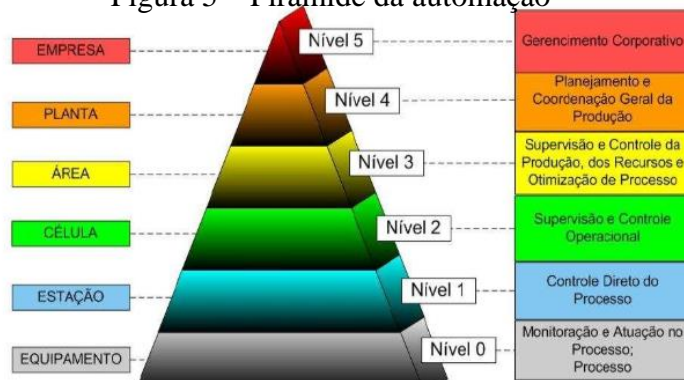
Desde Wiener, cujas hipóteses viriam a ser historicamente comprovadas, o desenvolvimento teórico e prático tem ganhado velocidade cada vez maior, lembrando do filtro de Kalman, a teoria do controle ótimo e o princípio do máximo de Pontryaguin, a teoria geral de sistemas com seus sistemas hierárquicos (L. Von Bertalanfly, H. Simon, M. Mesarovic), os algoritmos de identificação de sistemas, sistemas e controles adaptativos (onde uma malha de realimentação externa altera o controlador), modelos de referência (onde o controlador deixa de impor uma forma para o sinal de saída e passa a impor um

comportamento ao sistema controlado semelhante ao de um sistema de referência pré-especificado) e todo um desenvolvimento teórico juntando o controle clássico com o controle moderno.

Microprocessadores invadiram todas as áreas levando ao controle amostral e ao controle de processos industriais. A introdução de computadores nos controladores permitiu torná-los inteligentes. A noção de inteligência artificial e de máquinas que aprendem, o desenvolvimento matemático e técnico de processos automáticos de decisão (sistemas especialistas) e à construção de sistemas misturando máquinas mecânicas, atuadores elétricos e controladores digitais levaram para além da teoria de controle, às fábricas automatizadas e à robótica.

Uma fábrica moderna não é mais uma coleção de conexões mecânicas alimentadas por poucas e grandes fontes de potência, mas um conjunto de atuadores locais independentes, com seus controladores interligados por uma rede de comunicação que permite a sua concatenação e o seu gerenciamento a partir de uma unidade lógica central. Mais que sistemas controlados, as fábricas automatizadas são a interligação de sistemas locais controlados (manipuladores, esteiras, máquinas, robôs) coordenados através de um controle centralizado ou distribuído, e que se comunicam entre si e com outros níveis mais altos de controle através de uma rede. Este conjunto de sistemas que se intercomunicam horizontal e verticalmente pode ser representado graficamente por aquilo que ficou conhecido com a “Pirâmide da Automação” que é apresentada na figura 5, a seguir:

Figura 5 – Pirâmide da automação



Disponível em <<https://docplayer.com.br/59493227-Piramide-da-automacao.html>> Acesso em: 30 jan. 2019.

Matematicamente, a automação industrial conduziu ao desenvolvimento de novos formalismos capazes de tratar os sistemas a eventos discretos, que são sistemas a espaços de estado discreto e cuja dinâmica evolui através da ocorrência e eventos instantâneos, assim como os sistemas de dinâmica híbrida.

Nas últimas duas décadas, a engenharia passou por grandes transformações oriundas em parte pela adoção de novas tecnologias referentes à integração de sistemas que antes se

encontravam estanques e aparentemente desconectados.

Nesta evolução, a utilização de sistemas de controle e a ideia de realimentação começaram a ocupar lugar cada vez mais destacado em projetos de sistemas. Assim, surge a disciplina básica de controle e automação e posteriormente irão se iniciar os cursos de engenharia totalmente dedicados ao controle e automação.

A intensa e rápida evolução dos meios e comunicação ocorrida a partir da década de 70 do século passado permitiu a criação daquilo que seria denominada “a nova economia” onde as redes distribuídas, em particular a Internet, mudaram completamente o processo de trabalho. Neste novo cenário econômico e tecnológico os sistemas conversam entre si por meio de extensas redes de informação, sendo esta uma das características mais marcantes dessa nova realidade. São sistemas de diferentes origens e diferentes conceitos conversando e trocando informações entre si com a finalidade de agilizar processos de produção e de decisão. Nesta evolução surgiu uma série de problemas, como não poderia deixar de ser, principalmente problemas de integração de sistemas incluindo a comunicação entre plataformas e a integração de dados.

Atualmente, a pesquisa que envolve sistemas de controle caminha no sentido de se obter os biossistemas, os quais já estão em uso na indústria e nos laboratórios integrando sistemas vivos, como bactérias geneticamente modificadas, a sistemas de produção. Estão sob pesquisa sistemas integrados ao homem com interfaces homem-máquina cada vez mais sofisticadas.

1.3. Engenharia de Controle e Automação – Caracterização

A Engenharia de Controle e Automação caracteriza-se pela função que lhe é peculiar: projetar e construir equipamentos ou algoritmos que imponham automaticamente o comportamento de um objeto ou sistema. O funcionamento do sistema controlado deve ser autônomo, apenas o seu comportamento é especificado pelo operador humano dentro de parâmetros admissíveis. Os conceitos centrais neste sistema são os de realimentação da informação, filtragem, ou processamento de sinais, regulador e servomecanismo (ou sistema de controle) e autômatos.

Em menos de um século, estes conceitos foram ampliados ou modificados, a partir de inovações tecnológicas invenções científicas e mudanças sociais. Existem atualmente problemas onde o fluxo de informações é modificado pela realimentação ou pelo próprio fluxo de informações, onde o sistema original pode ou deve ser alterado, onde o sistema original pode ou deve ser alterado, onde sistemas de sistemas e sistemas conversando entre si

aparecem e estão no foco da técnica; onde a noção de comportamento foi ampliada até incluir algum tipo de aprendizado ou inteligência.

A engenharia de controle e automação

Uma especialidade da engenharia pode ser caracterizada por diferentes critérios:

- Pelo tipo de sistema ou de produto que considera;
- Pelo setor industrial que a emprega;
- Pelo problema específico de que trata;
- Pela tecnologia e conceituação que utiliza e desenvolve.

No caso da engenharia de controle e automação pode se afirmar que o que a caracteriza é o problema específico de que trata e uma tecnologia e conceituação próprias. A forma como a engenharia de controle e automação considera os sistemas a serem controlados é o que mais a caracteriza. Apesar de forte caráter técnico (controle de processos) é mais uma engenharia de métodos do que de máquinas.

Dada a complexidade atual dos sistemas a serem automatizados o engenheiro de controle e automação deve trabalhar em cooperação com especialistas de outras áreas da engenharia formando assim equipes multidisciplinares. Nestas condições diz-se que a função do engenheiro de controle é uma função de integrador de sistemas. Dessa forma, hoje se afirma que ele atua no encontro entre o fluxo de informação e o fluxo de energia.

Este profissional deve conhecer modelagem de sistemas dinâmicos, possuir um aprofundamento em matemática compatível ao menos, com o exigido de engenheiros elétricos, eletrônica analógica e digital, processamento de sinais, princípios de telecomunicações, computação, informática e redes.

1.3.1. Conceitos Fundamentais de Controle

Controlar um processo é, em termos essenciais, mantê-lo sob rigorosas condições pré-estabelecidas em um estudo de engenharia ou em uma folha de processos. Em outras palavras, se para se obter um bom produto, as condições físicas do processo de fabricação são fundamentais, então é necessário que haja rígido controle sobre essas condições a fim de se alcançar o objetivo. Para o estudo de desenvolvimento do Sistema de Controle, estas condições físicas serão denominadas variáveis de processo. Tome-se como exemplo uma indústria alimentícia do setor de pães e biscoitos. Todo o produto ali produzido deve passar por rígido controle de qualidade antes de ser entregue ao mercado consumidor. Desta forma, caso as condições de fabricação tais como temperatura de forno e umidade do ar quando da

preparação da massa não forem as adequadas, corre-se o risco de perda do produto fabricado por estar fora das especificações ideais prescritas na receita do produto. Assim, para que tais perdas não ocorram, faz-se necessária a implantação de sistemas de controle que permitirão manter o processo sempre em condições ideais de produção, obtendo-se assim um produto de alta qualidade e sem perdas de matéria-prima.

Durante a execução de qualquer processo industrial podem ocorrer oscilações das chamadas variáveis de processo. Estas oscilações constituem-se em alterações indesejáveis de parâmetros que, por afetarem diretamente a qualidade do processo em andamento, devem ser eliminadas por meio de correções.

No passado, tais correções eram introduzidas no processo pelos operadores que monitoravam constantemente o andamento do mesmo e nele intervinham quando necessário a fim de eliminar desvios. Com a evolução da ciência ligada ao controle de processos essa tarefa passou a ser missão dos controladores automáticos que, devidamente parametrizados, permitiam que o processo se mantivesse dentro de estreitos limites de variação de suas grandezas físicas, trazendo assim qualidade ao produto e confiabilidade no controle a ser executado. Exemplificando, suponha que um processo que dependa do rígido controle da temperatura, utilize fornos elétricos. Este tipo de forno depende da qualidade da energia elétrica fornecida pela rede elétrica que abastece a empresa. Como é fato conhecido, a tensão elétrica fornecida pela rede pode oscilar de maneira significativa ao longo do tempo, conforme a demanda varie. Dessa forma, esta oscilação repercute no forno fazendo com que o calor fornecido pelas resistências também oscile, gerando um efeito em cascata, que irá por fim se refletir na qualidade do produto, que poderá estar fora da especificação pela oscilação da rede de energia que abastece a empresa e por outros fatores. Ressalte-se que a qualidade da energia elétrica entregue é um fator externo à empresa e, portanto, fora de seu controle. Para que tal não ocorra, implanta-se um sistema de controle de temperatura cuja função será manter esta variável de processo sempre dentro de valores pré-estabelecidos, resultando em produtos dentro das especificações.

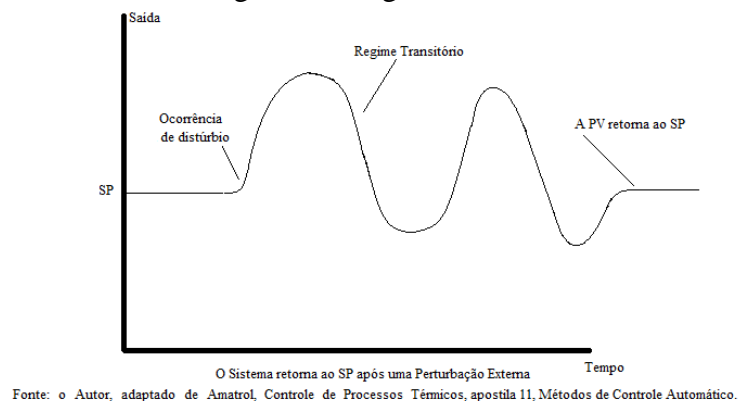
1.3.1.1. Métodos de Controle Automático

Para se compreender como o controle de processos é desenvolvido, implantado e mantido é necessário antes se conhecer alguns conceitos que fundamentam essa tecnologia.

1.3.1.1.1. Definições

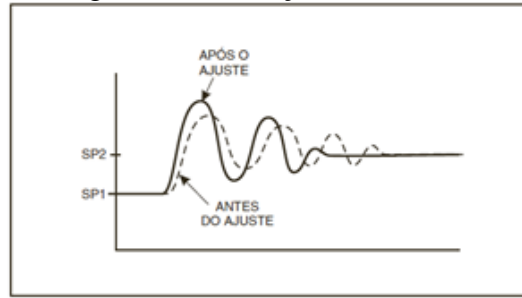
- Variável de processo (*process variable –PV*) – é a grandeza física ou química que deseja-se controlar para que o processo resulte em produtos dentro da especificação. Ex: pressão, vazão, nível, temperatura, Ph, acidez.
- *Set point (SP)* – Valor desejado da variável a ser controlada.
- Perturbação ou distúrbio – alteração indesejada do valor da PV por motivos externos ou internos ao processo.
- *Overshoot* – valor da PV que ultrapassa o *set point*.
- Regime de trabalho
 - Permanente – o regime é permanente quando o valor médio da saída permanece constante no tempo, ou seja, próximo ao *set-point*.
 - Transitório – Este regime ocorre quando o valor da saída muda constantemente ao longo do tempo. Isto ocorre quando surge um distúrbio (perturbação) no processo ou quando o *set point* é alterado. A figura 6 apresenta graficamente o que são estes dois regimes de trabalho.

Figura 6 – Regime transitório



No regime transitório o valor da saída deve voltar ao *set point* o mais rápido possível, com o mínimo de *overshoot* (ultrapassagem do *set point*).

Na figura 7 observa-se que ao se alterar o ajuste do sistema de controle, o tempo para voltar ao regime permanente pode ser menor, porém o *overshoot* pode ser maior.

Figura 7 – Alteração do *overshoot*

Resposta do Sistema Antes e Depois de um Ajuste no Controlador

Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

- Ganho – é a relação entre o valor de entrada e o valor de saída de uma variável. O ganho afeta o valor da variável de processo e a velocidade com que o sistema responde à mudança.

O ganho pode ser igual a 1, maior do que 1 ou menor do que 1. Ex: um dispositivo de controle tem ganho igual a 3. Isto significa que se a entrada for 2 mA, a saída será 6 mA. Veja a figura 8, a seguir.

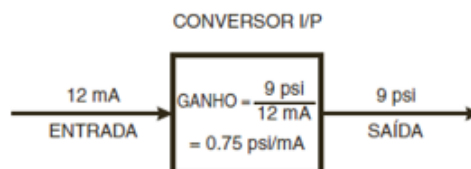
Figura 8 – Ganho



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O ganho é um número adimensional. Eventualmente, o ganho pode necessitar de dimensões. Isto acontece quando a grandeza de entrada é diferente da grandeza de saída. Observe a figura 9:

Figura 9 – Ganho com dimensões



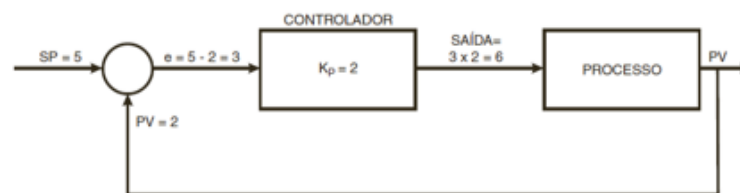
Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O ganho de cada componente do sistema se soma para se obter o ganho total. Portanto quanto maior o ganho de cada um, maior será o ganho do sistema. Um ganho alto resulta numa resposta mais rápida e, portanto, num regime transitório mais curto, porém se o ganho total for muito alto o sistema pode tornar-se instável e não mais retornar ao regime permanente.

1.3.1.1.2. Controle Proporcional

É o método fundamental utilizado para controlar um processo. Sua função é gerar a alteração imediata na saída assim que o sistema detectar o erro. O controle proporcional fornece uma saída que é igual ao valor do erro multiplicado pelo ganho. O ganho do controlador faz o sistema reagir mais rapidamente do que simplesmente corrigir o erro. O ganho é o que faz com que o controle adquira comportamento proporcional pois o ganho faz a saída variar como um múltiplo do erro. O ganho proporcional é indicado por K_p . Observe a figura 10:

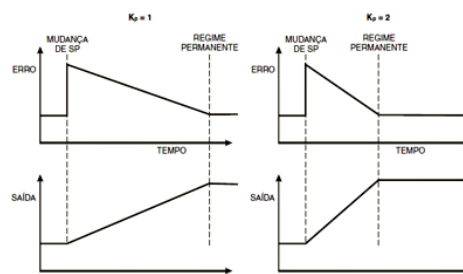
Figura 10 – Controle proporcional



Fonte: o Autor, adaptado de Amatról, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

A figura 11 apresenta duas situações. À esquerda o ganho é 1 e à direita o ganho é 2.

Figura 11 – Ganhos diferentes



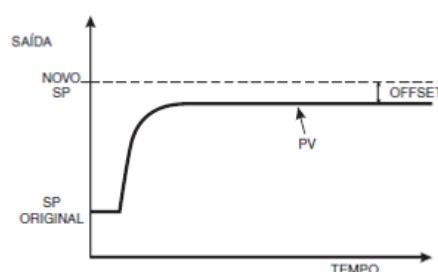
Fonte: o Autor, adaptado de Amatról, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

1.3.1.1.3. Offset

Para o sistema de controle proporcional, alcançar o regime permanente não significa que a PV vai se igualar ao SP. Neste tipo de sistema existe um erro de regime permanente chamado *offset*.

A figura 12 demonstra que o controle proporcional conduz a PV ao SP, porém sempre há uma diferença entre ambos.

Figura 12 – Offset



Fonte: o Autor, adaptado de Amatról, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O *offset* pode estar acima ou abaixo do SP.

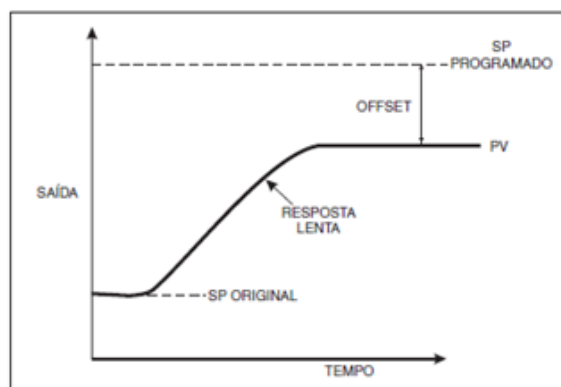
O *offset* é necessário pela forma como o controle proporcional trabalha. Se ele não existir, o erro, que é a diferença entre a PV e o SP e é utilizado para determinar a saída do controlador também será zero. Se esta diferença for zero, a saída também será zero e o controlador irá provocar a abertura ou o fechamento em 100% da válvula de controle, levando a PV para longe do SP.

1.3.1.1.4. Efeitos do ganho proporcional

O objetivo do controle proporcional é possibilitar uma resposta e alcançar o regime permanente com o mínimo de *offset*.

A quantidade de *offset* depende do ganho proporcional ajustado no controlador. Ganho baixo significa alcançar o SP sem grandes oscilações, porém lentamente e deixando no final um grande *offset*. Veja a figura 13:

Figura 13 – Ajuste proporcional com baixo ganho

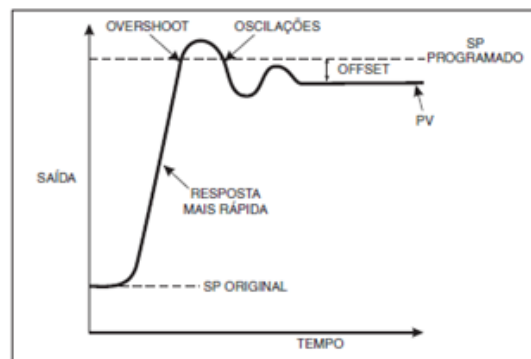


Resposta de um Processo com Ajuste de Ganho Baixo

Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático

Ajuste de ganho muito alto resulta em uma resposta mais rápida e em um *offset* menor, porém o sistema pode oscilar mais até alcançar o regime permanente, uma vez que o controlador tende a sobre corrigir o erro. Este efeito é apresentado na figura 14.

Figura 14 – Ajuste proporcional com alto ganho



Resposta de um Processo com Ajuste de Ganho Alto

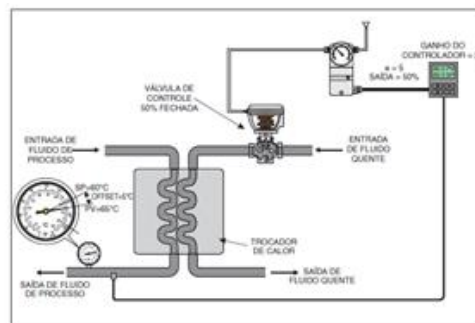
Fonte: o Autor, adaptado de AmatroI, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O ajuste do ganho, portanto, não pode ser o mais alto possível, sob o risco de o sistema tornar-se instável.

Conclusão: o ajuste de ganho ideal é aquele que permite ao sistema corrigir o erro com um mínimo de oscilação e no menor tempo possível.

1.3.1.1.5. Controle Proporcional – Integral

Na maioria dos processos o *offset* não é desejável. Mesmo que ele seja eliminado manualmente, o *offset* irá reaparecer quando as condições do processo mudarem. A figura 15 apresenta um sistema de controle de temperatura com *reset* manual.

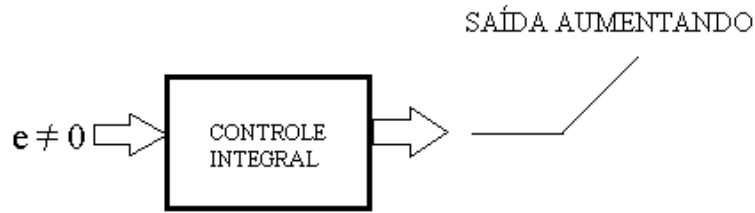
Figura 15 – Sistema de controle de temperatura com *reset* manual

Fonte: Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático, AmatroI Inc., 2007

O *offset* pode ser eliminado para todas as condições por meio da adição do controle integral ao controle proporcional. O controle integral pode ser adicionado ao proporcional por meio de um ajuste no ganho integral a ser feito no controlador PID. O controle integral também ajuda a eliminar o erro de regime permanente devido a outras causas como atrito mecânico numa válvula de controle.

O elemento de controle integral consegue eliminar o *offset* porque ele cria um sinal de saída crescente enquanto houver um erro. A saída é linear e a taxa de aumento é proporcional ao tamanho do erro. Veja a figura 16:

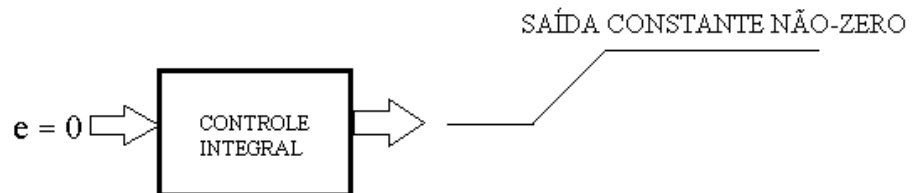
Figura 16 – Controle integral – saída linear com aumento constante



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Quando o erro for igual a zero, como mostra a figura 17, a saída permanece em um valor constante que vai manter o erro em zero. Esta característica difere do controle proporcional onde a saída é sempre zero (se não existir reset manual) se o erro for zero.

Figura 17 – Controle integral – Erro zero, saída constante

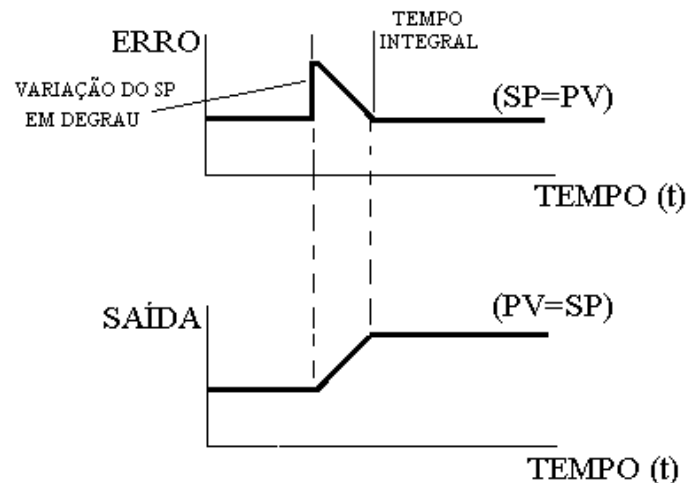


Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

A figura 18 apresenta a resposta de um controlador integral devido a um distúrbio. No início o erro é zero e a saída do controlador é constante, mas diferente de zero.

Quando ocorre o distúrbio, que neste caso é uma alteração do SP, o controle integral aumenta o sinal de saída do controlador em uma taxa constante enquanto o erro estiver presente. Quando o erro zerar, a saída do controlador volta a ficar constante, mantendo o sistema no novo SP.

Figura 18 – Resposta do controlador a um erro devido ao controle integral



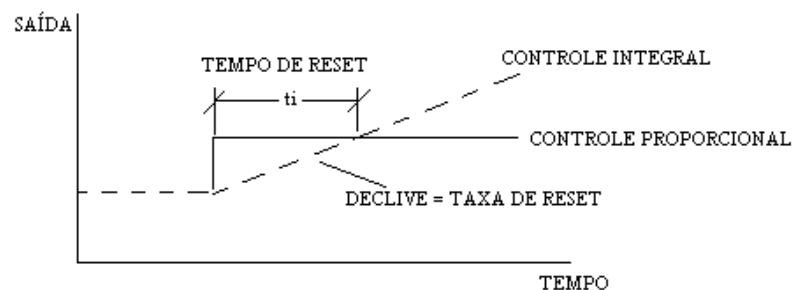
Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O controle integral sozinho tem uma desvantagem. Quando o erro for grande ele pode fazer uma válvula de controle abrir ou fechar 100% antes do erro ser eliminado, por exemplo. Se isto ocorrer a válvula permanecerá nesta posição porque o controle integral irá continuar aumentando a saída. Por este motivo ele não é utilizado sozinho, mas combinado com o controle proporcional.

1.3.1.1.6. Tempo de reset e taxa de reset

Tempo de reset é o tempo que o controle integral leva para provocar uma mudança na posição da válvula igual à que o controle proporcional provocaria após um distúrbio. Também é chamado de tempo integral. A figura 19 apresenta um exemplo:

Figura 19 – Tempo de reset e taxa de reset



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O tempo inicia quando ocorre o distúrbio e termina quando a saída criada pelo controle integral iguala a saída do controle proporcional. O declive da linha representa a taxa de reset. Este tempo deve ser o menor possível, já que o objetivo é fazer o processo voltar ao SP o mais rápido possível com um mínimo de oscilações.

A taxa de reset é o inverso do tempo de reset. Ela indica o número de vezes que o controlador ajusta a posição da válvula em um tempo. Ela deve ser alta o bastante, mas sem deixar o sistema instável. É dada em repetições por minuto (RPM).

TAXA DE RESET

$$RPM = \frac{1}{t_i}$$

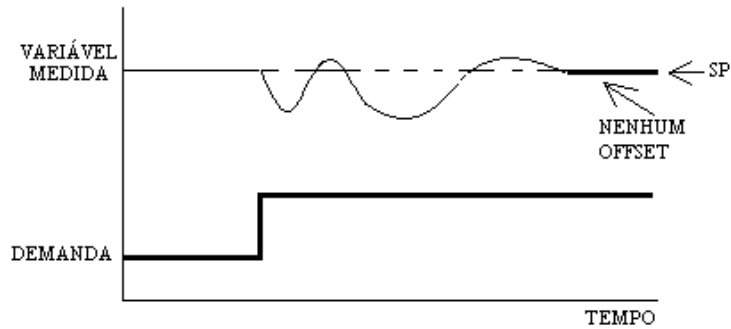
Onde:

RPM = Taxa de Reset em Repetições por Minuto

t_i = Tempo de Reset

O correto ajuste da ação integral elimina o *offset*. Veja a figura 20:

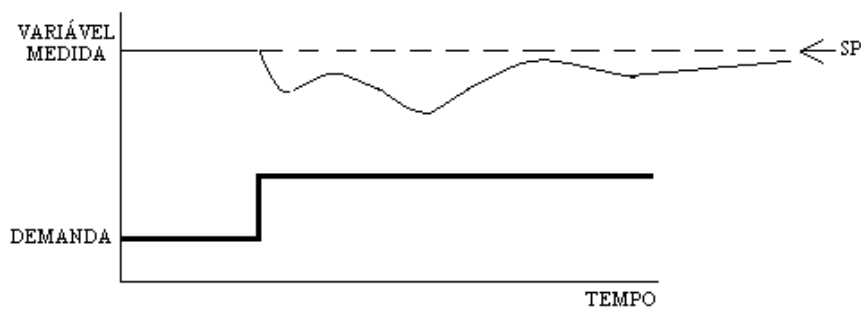
Figura 20 – Ajuste da ação integral



Fonte: o Autor, adaptado de Amatroi, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Um ajuste integral que seja muito alto ou muito baixo causa um efeito negativo no sistema. Caso o ajuste seja feito, alterando-se o tempo de reset e seu valor de ajuste for muito alto (taxa de reset baixa) teremos uma resposta lenta do sistema, pois o controlador leva mais tempo para ajustar a posição. A figura 21 apresenta o efeito de um ajuste e tempo integral alto (baixa taxa integral)

Figura 21 – Tempo integral alto

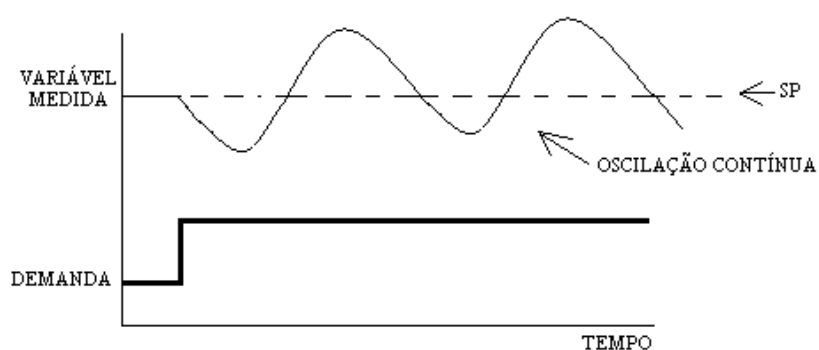


Fonte: o Autor, adaptado de Amatroi, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Se o tempo de reset for ajustado para um valor muito baixo, ou seja, se ele for ajustado para um tempo mais curto do que o processo consiga responder, o processo oscila porque o controlador sobre corrige o erro.

O mesmo ocorre se a taxa de reset for ajustada para um valor muito baixo. Observe a figura 22 onde é mostrado que uma taxa de reset alta ou um tempo de reset baixo resulta em um sistema instável.

Figura 22 – Taxa de reset alta

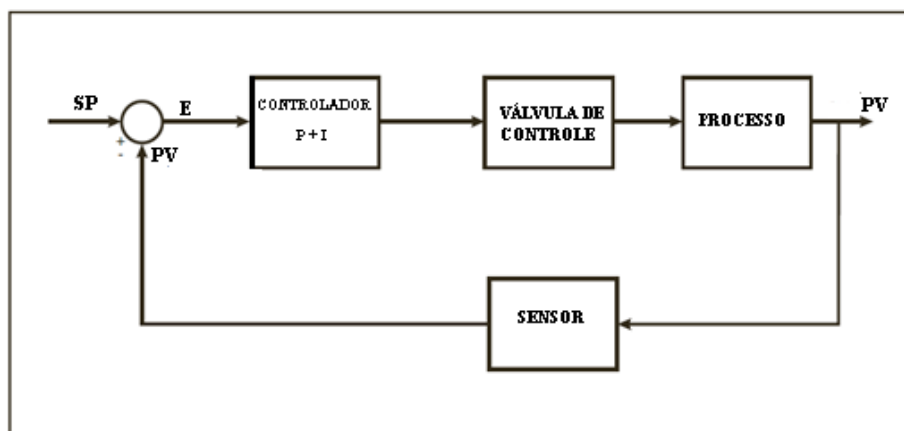


Fonte: o Autor, adaptado de Amatroi, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

1.3.1.1.7. Descrição da Operação do Controle Proporcional – Integral

O controle proporcional-integral (PI) combina os dois algoritmos para se obter uma resposta imediata a um erro sem nenhum *offset*. A figura 23 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de processo onde está sendo utilizado o controle PI. O controlador recebe o sinal de realimentação e decide a combinação ideal de controle proporcional e integral para eliminar o erro. A saída é enviada à válvula para controlar o processo.

Figura 23 – Diagrama de blocos de um controle PI

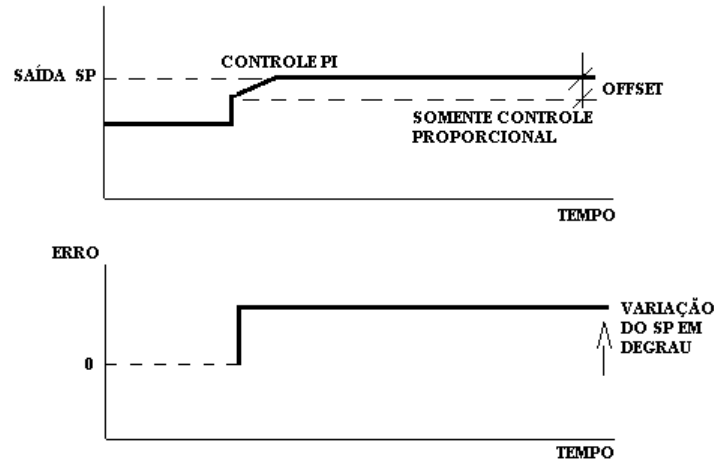


Fonte: o Autor, adaptado de Amatroi, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

A figura 24, a seguir, apresenta a resposta do controlador a uma mudança no SP utilizando o controle proporcional em comparação com o controle PI.

O controle proporcional apresenta uma resposta inicial ao erro antes do sistema estabilizar, resultando em *offset*. No controle PI há uma resposta imediata ao erro devido ao controle proporcional, mas após esta resposta inicial a ação integral permanece ativa para eliminar o *offset*. A figura 24 apresenta este fenômeno.

Figura 24 – Resposta do controlador vs controle proporcional x controle PI



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

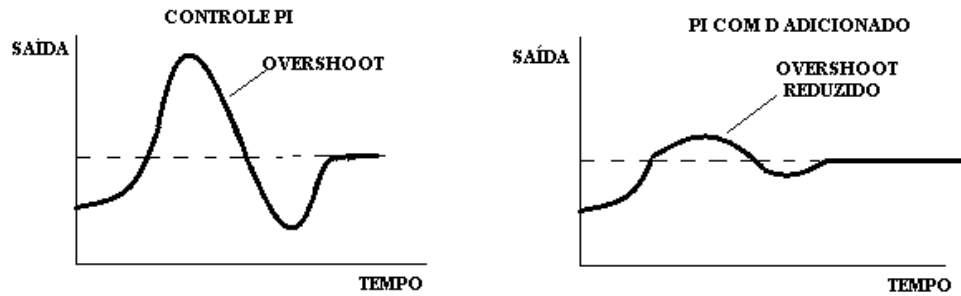
A programação de um controlador PI é mais difícil do que no controle proporcional puro, já que uma ação pode interferir na outra. Deve-se evitar acrescentar o controle integral a um controle inicialmente projetado para trabalhar no modo proporcional, sem antes reduzir o ganho proporcional. Lembre-se que para um controle apenas proporcional o ganho deve ser ajustado o mais alto possível sem deixar o sistema instável. A adição do controle integral aumenta o ganho total do controlador, portanto se o ganho proporcional não for reduzido, o sistema poderá ficar instável.

1.3.1.1.8. Controle Derivativo ou Controle de Taxa

O controle derivativo ou controle de taxa ajusta a saída do controlador de acordo com a taxa (velocidade) de variação do erro. Ele faz o controlador se antecipar ao erro e dessa forma, evitá-lo. Ele é muito útil em sistemas de controle de temperatura onde o sistema tende a responder lentamente.

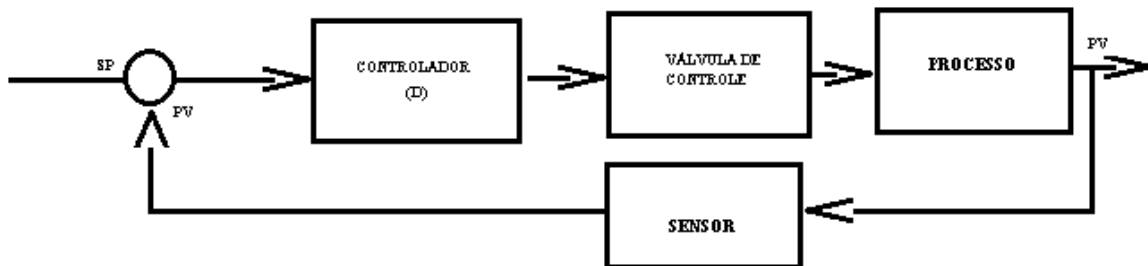
Este tipo de controle é adicionado ao controle proporcional e proporcional – integral para reduzir o *overshoot* e amortecer as oscilações. Ele reduz o *overshoot* porque se antecipa ao erro e aplica a correção necessária antes do erro se tornar maior. Observe a figura 25:

Figura 25 – Controle PI vs PID



A figura 26 apresenta um diagrama de blocos de um processo operando somente com o controle derivativo. Quando o controlador recebe um sinal de um erro variável (que não mantém o valor ao longo do tempo) o ganho derivativo aumenta a saída do controlador de acordo com a velocidade em que o erro está variando.

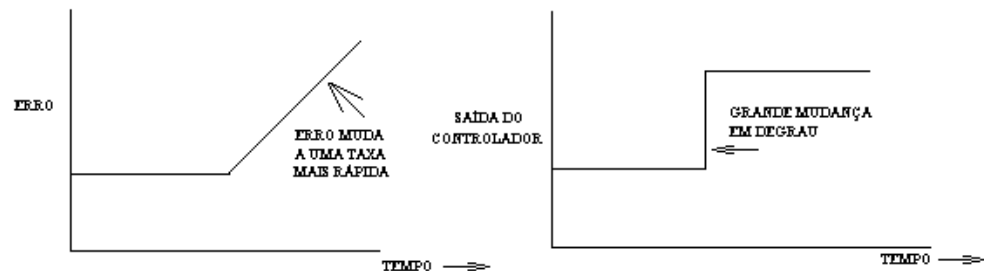
Figura 26 – Controle derivativo



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Se o sinal de erro estiver variando rapidamente o ganho derivativo, o elemento derivativo provoca um grande aumento na saída do controlador. Veja a figura 27:

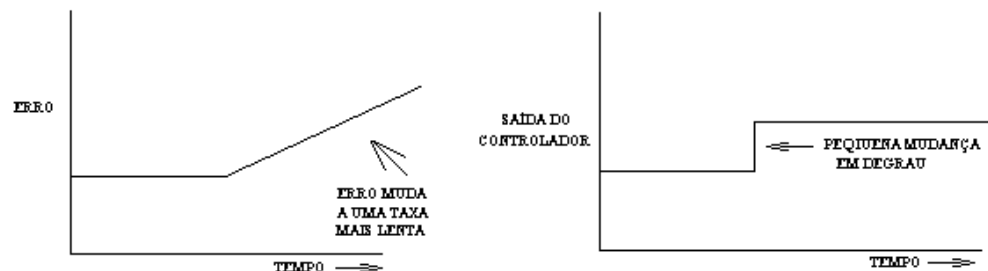
Figura 27 – Resposta derivativa a uma alta taxa de variação do erro



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Caso contrário a taxa de saída do controlador muda mais lentamente como mostra a figura 28:

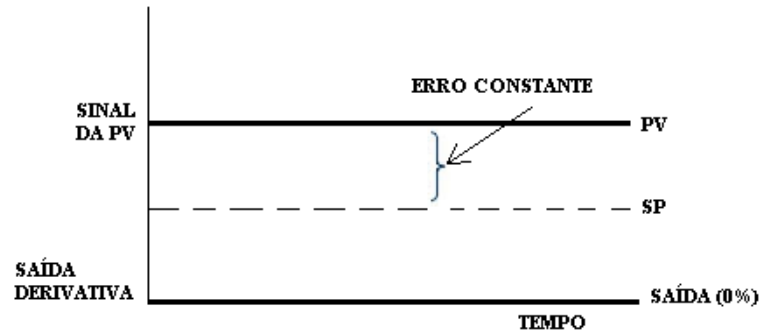
Figura 28 – Resposta derivativa a um sinal de erro



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Este controle não é utilizado sozinho, pois ele exige que o erro varie para atuar. Se o erro permanecer constante o controle não irá atuar, independentemente do tamanho do erro. A figura 29 apresenta este comportamento do sistema.

Figura 29 – Resposta derivativa a um erro constante

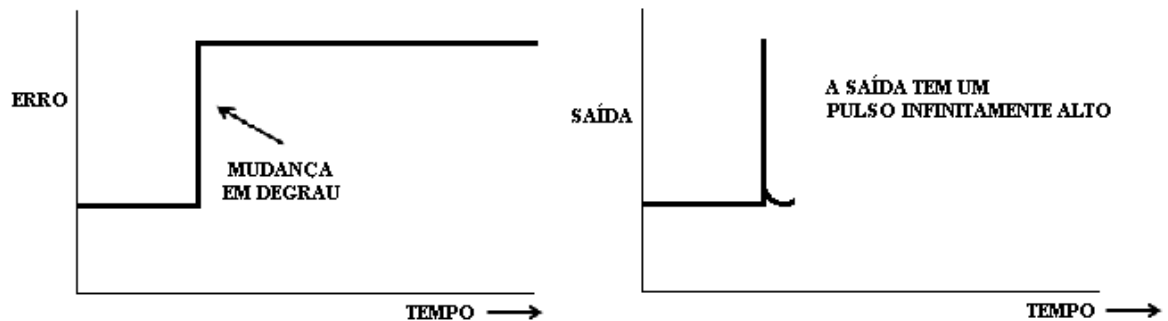


Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Resposta Derivativa Com Filtro

Como a resposta derivativa aumenta à medida que a taxa de variação do erro também aumenta, caso a mudança no SP seja abrupta (em degrau) isto provocaria uma resposta infinitamente alta e um retorno imediato a zero como mostra a figura 30:

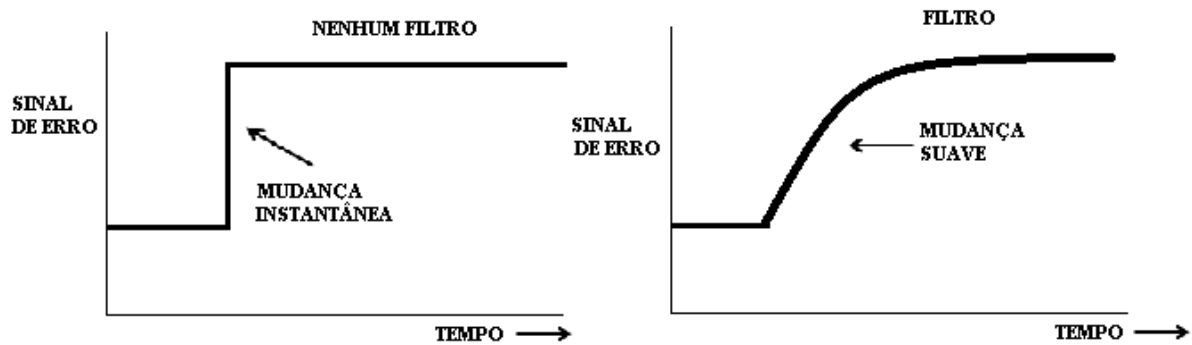
Figura 30 – Resposta derivativa a uma mudança em degrau no erro



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Para suavizar este problema a maioria dos controladores inclui um filtro que atenua as mudanças em degrau do erro. A figura 31 apresenta as duas situações, com e sem filtro.

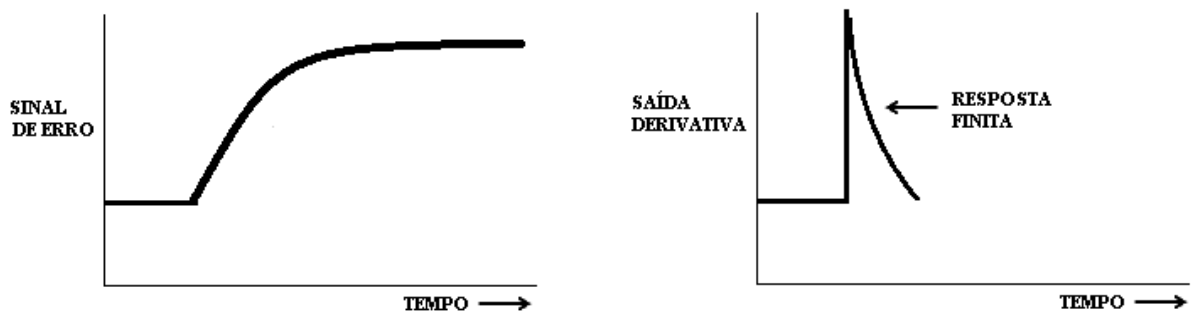
Figura 31 – Mudança em degrau com e sem filtro



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

A figura 32 apresenta a resposta derivativa a uma variação em degrau com filtro.

Figura 32 – Resposta derivativa a uma mudança em degrau com filtro

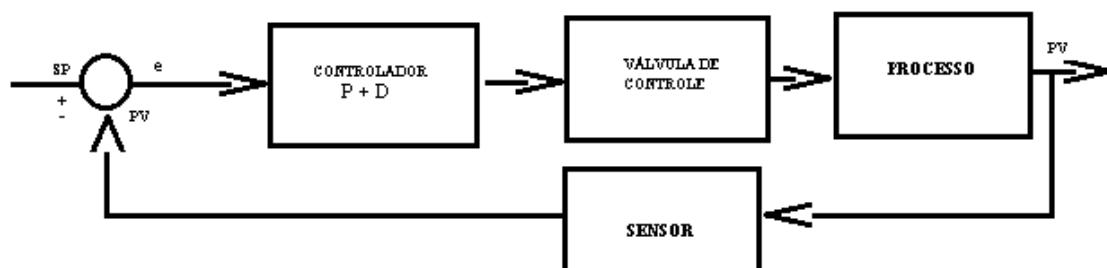


Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

1.3.1.1.9. Operação do Controle Proporcional-Derivativo

Este tipo de controle provê uma resposta que não apenas é proporcional ao erro, mas que também se antecipa ao erro com base na velocidade em que este varia. A figura 33 apresenta o diagrama de blocos do controle PD.

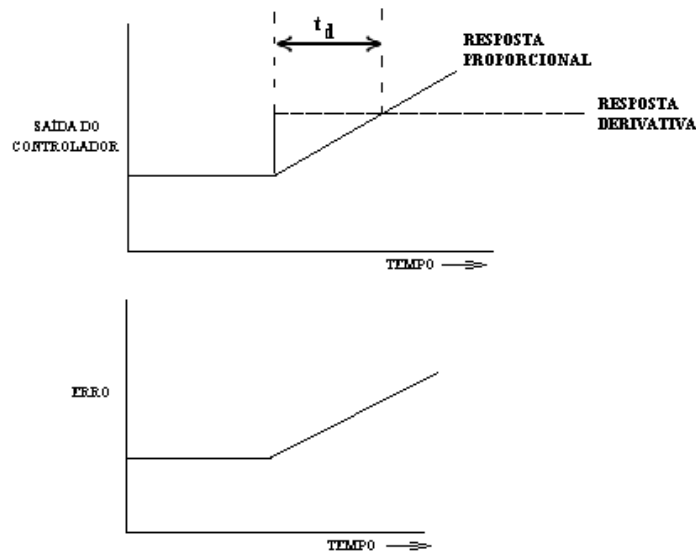
Figura 33 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de processos



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Durante a operação, o controle derivativo antecede a ação do controle proporcional por certo tempo chamado tempo derivativo (t_d). Este tempo é programado no controlador e define o quanto de ação derivativa deve ocorrer. À medida que o t_d aumenta a ação derivativa também aumenta. Observe a figura 34:

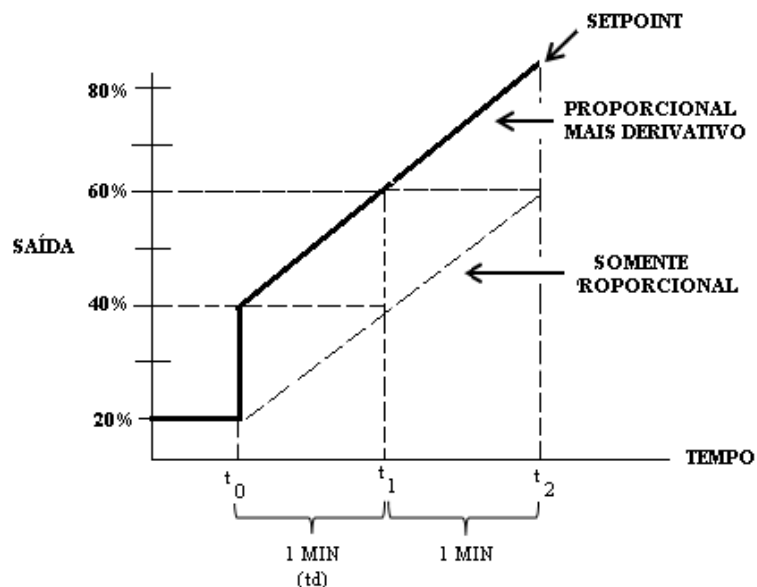
Figura 34 – Gráfico de resposta proporcional e derivativa a um erro



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

A adição do controle derivativo ao controle proporcional permite uma reação a um erro mais rápida quando comparada a um controle proporcional puro. Observe a figura 35. A saída inicial do controlador utilizando o controle PD aumenta a resposta do sistema em 20%. Ela permite que o sistema responda mais rápido ao erro. Observe que o t_d é de 1 minuto. Portanto, veja que um sistema proporcional puro exigiria um minuto a mais para alcançar o SP.

Figura 35 – Resposta P x Resposta PD

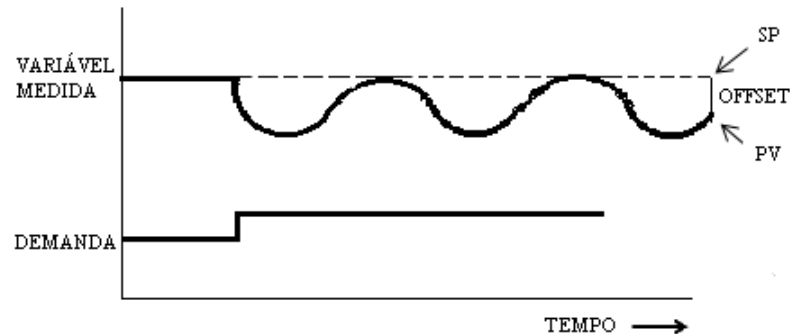


Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O tempo derivativo deve ser ajustado alto o suficiente de forma a ajustar a saída do controlador assim que o erro ocorrer. Porém, se a ação for ajustada em um valor muito alto o sistema ficará instável, pois a resposta sobre corrigirá o erro como mostra a figura 36.

Observe também que o controle derivativo não elimina o *offset*.

Figura 36 – Resposta do processo para um ajuste derivativo



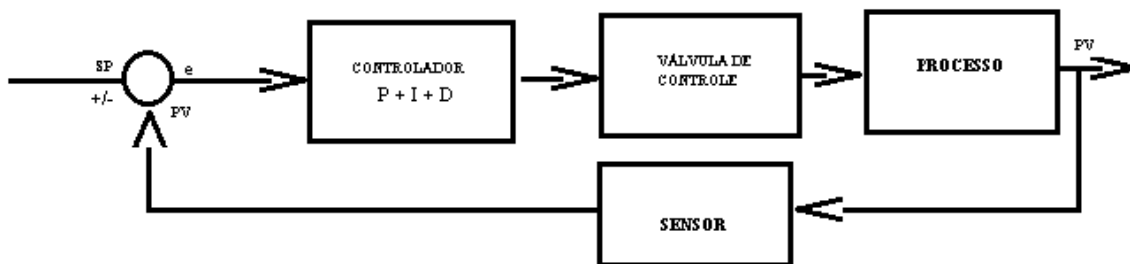
Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

O controle PD é normalmente usado em processos onde ocorram súbitas mudanças de carga ou em processos que tenham um longo atraso entre a aplicação da ação corretiva pelo controlador e a resposta do sistema a esta ação. Alguns sistemas de controle de temperatura aplicam o controle PD porque sua reação é muito lenta, em particular quando se eleva a temperatura do processo. (Amatrol, 2007, p. 48)

2. Operação do Controle Proporcional-Integral-Derivativo

O controle proporcional-integral-derivativo combina os três métodos de controle de forma que a resposta se antecipa ao erro, é proporcional e imediata e continua corrigindo o erro até zerar. A figura 37 apresenta o diagrama de blocos do controle PID. O controlador combina as três ações de controle para produzir o sinal de saída. A válvula recebe o sinal de saída e controla a vazão adequadamente.

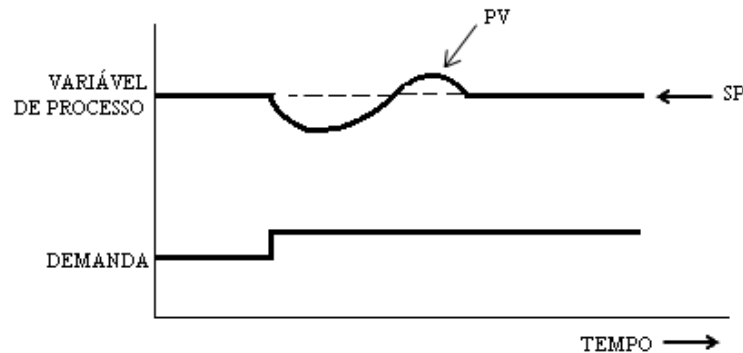
Figura 37 – Diagrama de blocos de um PID



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Quando bem programado, o controle PID mantém o processo em regime permanente no SP. Qualquer oscilação que ocorra terá duração e amplitude pequenas. Observe a figura 38:

Figura 38 – Retorno ao SP utilizando PID



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

As vantagens do controle PID são: reação imediata ao erro, resposta proporcional e nenhum *offset*. Por outro lado, é muito mais difícil programar um controlador para que os três métodos trabalhem juntos operando em seu melhor desempenho. Isto porque há situações em que um método colaborará mais do que outro para corrigir o erro. A figura 39 mostra como os três métodos atuam juntos. Primeiramente a ação derivativa aplica uma ação corretiva imediata. Em seguida a ação proporcional contribui para criar uma resposta proporcional. Finalmente a ação integral elimina o *offset*. Para fazer os três controles trabalharem juntos, de forma a obter uma resposta suave e estável, muitas vezes é necessário ajustar o controlador diversas vezes. (Amatrol, 2007, p. 34)

Figura 39 – Retorno do processo ao controle PID



Fonte: o Autor, adaptado de Amatrol, Controle de Processos Térmicos, apostila 11, Métodos de Controle Automático.

Em muitos casos não vale a pena o esforço de enfrentar o desafio de programar um controlador para usar o algoritmo PID. Muitas vezes o algoritmo P, PI ou PD é suficiente para controlar o processo dentro de limites aceitáveis.

1.4 Ensino de controle e automação

A engenharia de controle e automação é antes de tudo engenharia e, portanto, não deve ser confundida com o fazer científico puro, uma vez que em engenharia todo constructo tem finalidade prática. Pode se afirmar, portanto, que a engenharia é teleológica, no sentido de que identifica a presença de metas, fins ou objetivos últimos guiando a natureza e a humanidade, considerando a finalidade como o princípio explicativo fundamental na organização e nas transformações de todos os seres da realidade. Neste sentido deve-se diferenciar a engenharia de ciência em termos absolutos, uma vez que a ciência nem sempre é teleológica no sentido *strictu sensu* do termo.

Cabe, no entanto, mencionar que os conhecimentos científicos são essenciais para a solução de problemas típicos da engenharia. Neste sentido, ciência e engenharia estão diretamente ligadas, uma realimentando a outra, uma vez que novas descobertas científicas levam a novas aplicações tecnológicas e estas por sua vez provocam a necessidade de novos desenvolvimentos científicos.

Considerando apenas a área da Engenharia de Controle e Automação, é importante salientar que os conceitos tecnológicos que surgiram ao longo de seu desenvolvimento possibilitaram o estudo de modelos explicativos em outras áreas como a biologia, por exemplo.

1.5 - Engenharia de Controle e Automação no Brasil

Os primeiros sistemas de controle ainda no século XIX eram equipamentos baseados no movimento girante, o único que demonstrou aceitação universal naquele momento do desenvolvimento tecnológico. Desta forma, por volta do início do século XX a tecnologia do controle automático permaneceu como um braço da engenharia mecânica. Por essa época, o desenvolvimento da tecnologia elétrica possibilitou a implantação de controles com maior precisão para os casos de aplicações envolvendo velocidade, nível e temperatura. Além disso, o princípio da realimentação mostrou-se particularmente útil nas aplicações da área de telecomunicações. Nos Estados Unidos e na Europa Ocidental essas disciplinas foram incluídas nos currículos de engenharia elétrica, ocorrendo o mesmo no Brasil, onde os primeiros cursos de controle automático foram ministrados no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) por professores americanos, por volta de 1953. Alguns anos depois, em 1960, é ministrado o primeiro curso de controle por professores brasileiros na Escola Politécnica da USP, na cadeira de Eletrônica. Em 1969 é publicado o primeiro livro

abordando o tema Controle, denominado Controle Automático – Teoria e Projeto, de autoria do Professor Plínio B. L. Castrucci.

Nesta linha do tempo, mencione-se que foi a partir da década de 60 que surgiram os primeiros cursos de mestrado e mais para o final da mesma década, iniciaram-se os primeiros cursos de doutorado. A partir de meados da década de 80, com a criação da Sociedade Brasileira de Automática (SBA) e a organização dos primeiros congressos da área verificou-se a necessidade de se reestruturarem os cursos visando à formação adequada de profissionais voltados à tecnologia de controle. Nesta perspectiva surge o primeiro curso de Engenharia de Controle e Automação no final da década de 80. Deste primeiro passo até a devida regulamentação desta nova especialidade da engenharia iriam transcorrer oito anos, pois foi somente em meados da década de 90 que esta formação obteve seu marco regulatório e o devido reconhecimento por parte dos órgãos fiscalizadores da profissão. Os documentos de regulamentação deixam claro que a Engenharia de Controle e Automação está inserida no campo da Engenharia Elétrica.

O crescimento da Engenharia de Controle e Automação se deve principalmente a três fatores:

- Redução vertiginosa de custos e popularização de sistemas microprocessados;
- Disseminação das redes de comunicação com e sem fio;
- Necessidade imperiosa de utilização racional de recursos naturais.

A necessidade de se atender às leis ambientais cada vez mais severas torna necessário um controle cada vez maior sobre todos os estágios da cadeia produtiva e isto faz com que a aplicação de sistemas de controle em todas as etapas, desde a extração dos insumos até o descarte dos rejeitos, seja fundamental.

Segundo Antsaklis, 2000, *“a tecnologia de sistemas de controle é a semente da nova revolução em automação que ocorre em diferentes áreas, como por exemplo, sistemas automotivos e aeroespaciais, sistemas de manufatura, sistemas de transporte e outros”*.

Um aspecto fundamental no tocante a esta formação é o que se refere ao perfil e à área de atuação do profissional de controle e automação. Conforme comentado anteriormente, o engenheiro de controle e automação deve integrar uma equipe multidisciplinar juntamente com profissionais de outras áreas (mecânicos, elétricos, químicos, etc.) e dominar a eletrônica,

a matemática discreta e a teoria dos sistemas lineares e não lineares. Observe-se que está se referindo a um profissional com formação multidisciplinar.

Segundo a Resolução 11/CNE/2002 do Conselho Nacional de Educação, o engenheiro de controle e automação deverá adquirir durante a sua formação as seguintes capacidades:

- I. Equacionar problemas da área utilizando conhecimentos matemáticos, científicos, tecnológicos e instrumentais, com propostas adequadas e eficientes;
- II. Criar e usar modelos de dispositivos e sistemas de qualquer natureza;
- III. Coordenar, planejar, operar e manter sistemas na área de Engenharia de Controle e Automação;
- IV. Conceber, projetar e analisar sistemas, produtos e processos e sua viabilidade econômica;
- V. Identificar, formular e resolver problemas novos, desenvolvendo e aplicando ferramentas e técnicas;
- VI. Aplicar conhecimentos teóricos de Engenharia de Controle e Automação a questões gerais encontradas em outras áreas;
- VII. Comunicar-se eficientemente nas formas oral, escrita e gráfica;
- VIII. Ser consciente do impacto das atividades da Engenharia de Controle e Automação no contexto social e ambiental;
- IX. Atuar em equipes multidisciplinares;
- X. Ter postura ética; responsável e de permanente busca de atualização profissional.

O mercado de trabalho para este profissional possui amplo leque de alternativas, entre elas:

- a. Setor industrial, comercial, residencial e de serviços, sendo responsável pela modernização, automação e otimização de processos;
- b. Empresas de engenharia, projetando e integrando sistemas de automação industrial, hospitalar e predial;
- c. Ministrando treinamentos de recursos humanos em empresas e instituições de ensino;

- d. Executar projetos de engenharia básica visando planejar a expansão e automação a longo prazo;
 - a. Desenvolver produtos de instrumentação, controle, operação e supervisão de processos industriais, comerciais e residenciais.

1.6. Formação em Controle e Automação

A formação em Controle e Automação enfrenta uma série de desafios, alguns inerentes a toda a área da engenharia, outros específicos desta formação. Mencionem-se entre eles as rápidas mudanças tecnológicas, motivação dos alunos e a necessária ênfase na relação teoria – prática.

Além dos desafios mencionados, outro tão ou mais importante é a questão da falta de preparo do aluno nas áreas básicas, principalmente em matemática, cálculo e física para poder acompanhar e compreender os conceitos presentes na Teoria de Controle de Sistemas.

Existem várias iniciativas que buscam equacionar os problemas mencionados, incluindo experimentos e kits didáticos, ampliando o uso de recursos tecnológicos para ensino como ambientes virtuais e com disciplinas introdutórias que aproximem os alunos do fazer do engenheiro e abordagens voltadas para projetos. CAMPOS Campinas, 2016.

As iniciativas pedagógicas que buscam incentivar a prática de execução de projetos e construção de experimentos e laboratórios são importantes, pois aliam a teoria e a prática, equilibrando o caráter teleológico da engenharia e a abstração presente na Teoria de Controle.

Estas abordagens possibilitam ainda a criação de um espaço multidisciplinar e permitir o desenvolvimento de capacidades sociais e metodológicas como trabalhar em equipe e resolver problemas complexos, redigir relatórios etc.

Cabe salientar que os docentes responsáveis pela disciplina de Teoria de Controle devem fazer um trabalho de reflexão para superar eventuais limitações materiais e estruturais.

1.7. A Indústria 4.0 e o Ensino de Sistemas de Controle

O advento da Indústria 4.0 trouxe vários desafios para todos os profissionais que estão envolvidos com o mundo da tecnologia no segmento industrial. Entre estes desafios está a falta de mão de obra qualificada.

No Brasil este cenário também se faz presente de forma muito contundente, pois segundo dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI), em torno de 48% das indústrias

aplica alguma tecnologia do composto da Indústria 4.0. Portanto, torna-se evidente que haverá falta de profissionais qualificados quando este percentual se elevar.

A Indústria 4.0 traz consigo a própria evolução dos sistemas e evidencia de forma muito mais gritante o problema da escassez de mão de obra qualificada, uma vez que apresenta tecnologias de aprendizado de máquinas para tomada de decisões automáticas, sem a necessidade de intervenção humana. Embora os conceitos da indústria 4.0 estejam mais diretamente ligados à indústria de manufatura, a indústria de processos contínuos também se beneficiará destes conceitos uma vez que determinadas necessidades são inerentes aos dois tipos de sistemas produtivos. A indústria 4.0 se assenta em nove pilares que são:

- Análise de dados
- Robótica
- Simulação
- Integração de sistemas
- Internet das Coisas (IoT)
- Cibersegurança
- *Cloud computing*
- Manufatura aditiva
- Realidade aumentada

Fonte: <https://materiais.inovacaoindustrial.com.br>, acesso em 31/07/2020

Destes, cabe destacar a análise de dados, a Integração de Sistemas, a Cibersegurança e a *Cloud Computing* como sendo os aspectos que se encaixam mais diretamente também na Indústria de Processos.

Um dos aspectos mais disruptivos presentes na revolução que vem ocorrendo pelo advento da Indústria 4.0 está o fato de que as máquinas estão “aprendendo” tudo o que se refere a tarefas conhecidas e repetitivas, consequentemente em breve as máquinas tomarão decisões baseadas em dados de alto volume e criticidade.

O homem atuará somente em novas situações, tarefas as quais as máquinas não podem aprender, em profissões que exigem abstração, e é nesse enfoque que se insere o ensino de Controle de Processos. Portanto, a formação de futuros profissionais que irão atuar em um cenário de consolidação das propostas da indústria 4.0 envolve necessariamente o ensino de Sistemas de Controle uma vez que este campo está diretamente ligado às inovações trazidas pela Indústria.

As principais mudanças para o novo profissional de Controle e Automação é que ele deverá ter um perfil analítico de todo o processo produtivo, pois tarefas repetitivas serão feitas pelas máquinas que o apoiarão a tomar decisões, devendo ser conhecedor de ferramentas de análise de dados e ainda ser capaz de criar novos modelos, de processo, de negócios e tecnologias.

1.8. Experimentos e laboratórios

Nesta subseção tratar-se-á das questões relativas à aplicação de equipamentos didáticos para o ensino da Teoria de Controle e sua contribuição ao aprendizado deste tema.

Em primeiro lugar é primordial destacar que a tecnologia dos sistemas de controle está presente atualmente nos mais diversos campos do conhecimento, com aplicações práticas que vão de eletrodomésticos a astronaves, passando por muitos setores produtivos industriais e até mesmo sistemas biológicos e econômicos. Conclui-se, portanto, que o profissional que for especializar-se neste campo do conhecimento deve possuir uma visão ampla dos processos e ter capacidade de trabalhar com sistemas os mais diversos possíveis.

Portanto, é necessário que a formação em controle forneça as bases para um aprendizado contínuo, que possibilite ao profissional lidar com problemas de complexidade e abrangência crescentes. Outro foco importante é que a educação em controle deve possibilitar ao aluno continuar aprendendo continuamente. Neste sentido, deve-se destacar quatro pontos fundamentais, que devem sempre permear a formação neste campo, são eles:

- O entendimento da noção de sistemas dinâmicos, associando as respostas das plantas e sistemas controlados a uma evolução no tempo, com memória;
- O estudo da estabilidade, entendida tanto como um conceito como também uma exigência para os diferentes sistemas, sem a qual todos falharão;
- A noção de realimentação, talvez a mais distintiva de controle, com a necessária compreensão do custo-benefício;
- O conceito de compensação dinâmica, com a compreensão de que dinâmicas adicionais à malha realimentada possibilitam alcançar os limites das especificações impostas pelas propriedades físicas dos componentes utilizados.

Neste ponto surge uma questão que se faz presente quando se ensina Sistemas de Controle. Há que se buscar um equilíbrio entre teoria e prática, uma vez que sempre que se controla algo está se atuando no campo concreto, pois quando se aplica controle está se controlando algo real, enquanto que os conceitos matemáticos que alicerçam as teorias de controle estão no campo da abstração.

Esta situação faz com que se considere que as atividades práticas no ensino de controle não são práticas complementares, mas sim estratégias fundamentais que possibilitam além de uma aprendizagem robusta, ampliar a visão do aluno nesta área e estabelecer novos paradigmas.

Os cursos de Sistemas de Controle que possuem carga horária laboratorial podem ser basicamente de três tipos: autônomo, concorrente ou complementar. No primeiro caso trata-se de um curso onde a base conceitual e a aplicação laboratorial ocorrem de forma concomitante, uma contribuindo para alicerçar a outra, promovendo assim um círculo virtuoso de crescimento no conhecimento do assunto. No segundo caso, os experimentos são intercalados às aulas laboratoriais possibilitando a colocação de questões conceituais que poderão ser aprofundadas em seus aspectos teóricos.

A terceira alternativa poderia ser enquadrada nos chamados cursos de educação continuada, uma vez que têm a função de complementar os conhecimentos adquiridos quando do aprendizado inicial, onde o aluno deve adquirir toda a base conceitual.

Qualquer que seja a modalidade de curso é importante mencionar que os ambientes de laboratório devem buscar a interdisciplinaridade, ou seja, é conveniente que um mesmo ambiente atenda a mais de um curso, facilitando assim que os alunos obtenham uma visão mais sistêmica do mundo do trabalho onde todas as formações se inter-relacionam e nenhuma delas é um universo estanque. A integração laboratorial traz diversas vantagens, entre elas, a utilização mais racional do espaço físico, dos equipamentos e dos recursos humanos, elimina a redundância de funções e permite integração curricular entre as disciplinas.

Além da importância da estrutura oferecida para o desenvolvimento da disciplina de Sistemas de Controle, outro ponto com igual importância é referente às metodologias aplicadas no ensino de engenharia em geral e, em particular, em Controle e Automação. O ensino de Controle e Automação insere-se no contexto das mudanças ocorridas nos processos de ensino e aprendizagem nos últimos tempos e, portanto, não apenas não está imune a estas mudanças como em alguns casos pode até se posicionar como um protagonista de tais

mudanças. As metodologias de ensino têm sido uma das áreas mais afetadas pela revolução tecnológica trazida pelas Tecnologias de Informação e Comunicação. Portanto, remete-se aqui ao aprendizado flexível, onde por meio da tecnologia podem ser adotados procedimentos pedagógicos alternativos, possibilitando uma intervenção do docente que permite a interação com o aluno de forma não presencial, estimulando o autoaprendizado privilegiando assim as posturas exploratórias e a solução de problemas.

Do ponto de vista do docente, este deve procurar adaptar suas estratégias de ensino a este novo cenário, dividindo a carga de trabalho presencial e não presencial de maneira a otimizar o tempo, sempre escasso, para o esclarecimento de dúvidas e aprofundamento dos temas estudados fora do ambiente de ensino.

Neste aspecto, saliente-se a importância do aprendizado prático (aprender fazendo) que possibilita ao aluno mobilizar o conhecimento, as habilidades e as atitudes necessárias à compreensão e intervenção em Sistemas de Controle.

1.9. Laboratórios de Controle

Ao se planejar a instalação de um laboratório voltado a objetivos educacionais, algumas questões básicas devem ser respondidas: quais modelos e equipamento devem ser utilizados e com que finalidade? Quais são os objetivos das práticas laboratoriais? Qualquer que seja a visão pedagógica, alguns pontos são consensuais sobre as finalidades de cada ambiente:

- Motivar o conhecimento, a demonstração e a validação de conceitos teóricos;
- Introduzir problemas do mundo real associados ao controle e modelagem, como saturação, ruídos, dinâmica de sensores/atuadores, atritos, histereses e imprecisões;
- Fornecer estruturas que permitam procedimentos associados ao uso da instrumentação e à aquisição e tratamento de sinais;
- Expor os estudantes a situações integradas no desenvolvimento de projetos, iniciando com especificações dos problemas e chegando a aspectos de implementação prática e considerações econômicas;
- Confrontar os estudantes com as necessidades práticas profissionais, tais como elaboração de memórias de cálculo e relatórios técnicos;
- Desenvolver trabalhos em equipe e direcionados à solução de problemas.

A implantação de laboratórios é tarefa complexa uma vez que envolve o planejamento da utilização de recursos financeiros e humanos além de fazer uso de espaço físico e da necessidade de implantação de infraestrutura elétrica e hidráulica. Para orientar a montagem de um laboratório voltado ao Controle e Automação devem se considerar os seguintes aspectos, segundo Balchen (Balchen, Handlykken e Tyss, 1981), que são:

- Demonstrar os conceitos teóricos importantes de engenharia de controle e automação;
- Refletir os problemas fundamentais associados às situações reais e que são encontrados na vida prática;
- Apresentar riscos mínimos à segurança dos usuários;
- Possuir custos acessíveis de aquisição, operação e manutenção;
- Apresentar dinâmicas de fácil compreensão, com definição clara de objetivos, associados a procedimentos operacionais simples.

A montagem de laboratórios deve privilegiar o equilíbrio entre as características e os objetivos almejados para o ensino. Normalmente, os laboratórios possuem características de sistemas e plantas industriais ou características mais acadêmicas como módulos padrões deslocáveis pelo ambiente proporcionando certa flexibilidade e melhor aproveitamento do espaço físico.

Quanto aos experimentos aplicados nas práticas laboratoriais, há que se considerar vários critérios, entre eles:

- Especificidade do curso;
- Carga horária da disciplina;
- Conteúdo programático;
- Objetivos pedagógicos.

Os dois tipos mais presentes de laboratórios em instituições de ensino superior (IES) são basicamente uma reprodução em escala de modelos físicos presentes em aplicações reais e o outro são sistemas com características industriais. Este segundo tipo atende com mais realismo as aplicações às necessidades do aprendizado em controle na engenharia de processos como, por exemplo, a engenharia química.

No caso dos modelos físicos em escala existem soluções consagradas e que são oferecidas por diversas empresas estabelecidas no mercado de equipamentos didáticos. Na subseção 2.2 apresentam-se, como exemplo, algumas bancadas para a execução de experimentos em sistemas de controle.

As soluções laboratoriais ofertadas pelo mercado têm aspectos favoráveis e desfavoráveis. Como ponto positivo pode-se citar que o laboratório que está equipado com este tipo de equipamento possui aquilo que é o estado da arte em equipamentos didáticos uma vez que se trata de equipamentos importados e, portanto, oriundos de países industrializados, o que significa que é o que de melhor a tecnologia pode oferecer. Por outro lado, também há outros pontos a serem considerados, como o alto custo de aquisição, a recorrente falta de componentes de reposição, problemas com manutenção além do desconhecimento por parte do representante local dos problemas que podem ocorrer com o equipamento e como resolvê-los.

A montagem de um laboratório não exige necessariamente a disponibilização de muitos equipamentos e kits didáticos. Pode se colocar à disposição dos docentes e alunos um único sistema que possibilite a execução de diferentes experimentos e que os conduzam a adquirirem as competências necessárias ao engenheiro de controle e automação.

A engenharia, talvez mais do que outras áreas do conhecimento, passou e ainda passa por grandes transformações e o com o seu ensino não poderia ser diferente. Nas últimas duas décadas ocorreram grandes mudanças nas formas de ensinar e aprender engenharia. Lugar de destaque nestas transformações deve ser reservado às tecnologias de informação e comunicação.

1.10.Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE)

Segundo o Ranking Universitário Folha (RUF) de 2017, elaborado pelo Jornal Folha de São Paulo e pelo site UOL, existem no Brasil 142 instituições de ensino superior que oferecem o curso de Engenharia de Controle e Automação, no qual estavam matriculados 29.712 alunos, segundo o Censo do Ensino Superior de 2017, elaborado pelo INEP.

Uma forma de aferir a importância do tema “Sistemas de Controle” no contexto do ensino de engenharia é verificar a presença de questões relativas a este tema nas edições do ENADE, cuja função é avaliar a qualidade do ensino superior no Brasil em todas as áreas. Colocando em segundo plano as questões suscitadas quanto a esta métrica utilizada pelo Ministério da Educação e Cultura (MEC) por meio do seu órgão responsável pela avaliação da qualidade da educação em todos os níveis e em todo o país, o Instituto Nacional de Estudos

e Pesquisas “Anísio Teixeira” (INEP), fato é que o ENADE é a única métrica disponível para que todas as instituições de ensino superior se referenciem e busquem melhorar seus indicadores. No tocante ao tema deste trabalho, as questões referentes a Sistemas de Controle estiveram presentes em todas as cinco edições do ENADE para os cursos de engenharia, entre 2005 e 2014, com maior ou menor intensidade, conforme a edição do exame. A tabela 1 apresenta os dados relativos à presença de questões relativas a Sistemas de Controle nas cinco edições do ENADE.

TABELA 1 - PRESENÇA DE QUESTÕES RELATIVAS A SISTEMAS DE CONTROLE NO ENADE 2005 - 2019

EDIÇÃO	CURSO	Total de questões discursivas	Quantidade de questões discursivas sobre Sistemas de Controle	% DO TOTAL DE QUESTÕES DISCURSIVAS	Total de questões objetivas (Múltipla escolha)	Quantidade de questões objetivas sobre Sistemas de Controle	% DO TOTAL DE QUESTÕES OBJETIVAS
2005	ENGENHARIA GRUPO II*	3	1	33	12	1	8,3
2008	ENGENHARIA GRUPO II	4	2	50	13	3	23
2011	ENGENHARIA GRUPO II	4	0	0	22	2	9
2014	CONTROLE E AUTOMAÇÃO ELÉTRICA**	3	2	67	17	4	23,5
		3	0	0	13	2	15,4
2017	CONTROLE E AUTOMAÇÃO ELÉTRICA**	3	2	67	27	5	18,5
		3	1	33	27	1	3,7
2019	CONTROLE E AUTOMAÇÃO ELÉTRICA	3	1	33	27	7	26
		3	0	0	27	3	11,1

* Eng. Elétrica, Eletrônica, Controle e Automação e Telecomunicações

** Não foram incluídas no cômputo, 4 questões que ofereciam ao aluno a escolha entre diferentes áreas da engenharia elétrica, incluindo Sistemas de Controle

1.11. Design Science

Para o desenvolvimento deste trabalho decidiu-se pela utilização de *Design Science Research* como método de trabalho. A escolha foi feita a partir da conclusão de que este é o método que mais se adequa aos objetivos do trabalho.

Design Science Research é um método de pesquisa cujo paradigma é ter sido desenvolvido como uma “tecnologia orientada” em contrapartida às ciências naturais (March & Smith, 1995; Simon, 1996; Gregor & Jones, 2007). Seu objetivo é o *design* de artefatos que servem aos seres humanos.

Tendo o projeto como atividade principal, esta metodologia se preocupa com questões do tipo como um artefato pode ser construído e avaliado. Tem suas raízes primárias em áreas como arquitetura, engenharia e planejamento urbano (Schön, 1983).

A atividade dos pesquisadores de *design* é fundamentalmente diferente do trabalho de cientistas que estudam a natureza. Em vez de desenvolver novos conhecimentos, procurando explicações causais dos fenômenos do mundo real, os pesquisadores de *design* aplicam conhecimentos existentes enquanto procuram soluções inovadoras para problemas práticos. Os artefatos criados nesses processos de *design* são tão diversos quanto os campos em que a *Design Science* é aplicada. Embora inicialmente, a pesquisa em *design* fosse apenas uma força

importante nas disciplinas de engenharia (Hubka & Eder, 1987; Roozenburg & Eekels, 1995), foi recentemente defendida por campos que trabalham com resultados mais intangíveis. Por exemplo, a pesquisa em *design* ganhou uma posição nas ciências da educação (Cobb, Confrey, Disessa, Lehrer e Schauble, 2003; Wittmann, 1995), em ciência política (Bobrow & Dryzek, 1987; Linder & Peters, 1984) e nas disciplinas de sistemas de informação. Nesta última, identificou-se o paradigma do *design* como uma ferramenta particularmente adequada para embasamento teórico de sua pesquisa prescritiva, pois promete credibilidade e legitimidade de uma metodologia de pesquisa bem fundamentada, porém pragmática.

A pesquisa em design é tradicionalmente delineada a partir de métodos naturais ou comportamentais clássicos enfatizando sua orientação para os problemas e sua alta relevância para a prática. Ao mesmo tempo, as disciplinas orientadas para a teoria estipulam o rigor como principal critério de qualidade. No início, a pesquisa em design frequentemente carecia de credibilidade e legitimidade fornecida por métodos rigorosos. O alegado rigor versus a relevância gerou uma dicotomia que foi uma grande preocupação para os estudiosos desde o início do surgimento do *Design Science*. Em seu artigo seminal, Hevner et al. (2004) procuram combinar as práticas relevantes da pesquisa em *Design Science* com rigor científico. Para esse fim, Hevner *et al.* propõem um conjunto de diretrizes para qualquer projeto de Design Science. Um de seus princípios fundamentais é que a pesquisa em design deve sempre partir de um importante problema prático, mas deve seguir métodos de pesquisa estabelecidos para construir e avaliar uma solução; o respeito a esse princípio garante relevância aliada ao rigor.

1.11.1. Características do Conhecimento Gerado

Uma das mais importantes características dos trabalhos desenvolvidos segundo este método é a capacidade de transferência a outros contextos, além daquele de aplicação imediata utilizado para o seu desenvolvimento.

Outro aspecto importante é que este tipo de pesquisa não pode ser prescritivo do tipo literatura comercial (aplicações amplas, porém sem acurácia/justificativa), tão rejeitada pelos acadêmicos. Daí a aplicação do termo “*desing-oriented*” ao invés de “prescritivo”. Segundo Van Aken:

The core mission of a Design Science, on the other hand, is to develop knowledge that can be used by professionals in the field in question to design solutions to their field problems.

Não é a solução pronta (ferramenta) para o profissional, mas uma orientação para se chegar até ela. Além da possibilidade de transferência para outros contextos, a abordagem em *Design Science* possui algumas peculiaridades importantes, entre elas:

- *research questions are driven by field problems (as opposed to pure knowledge problems); PRAGMÁTICA*
- *there is an emphasis on solution-oriented knowledge, linking interventions or systems to outcomes, as the key to solve field problems; INTERVENCIONISTA*
- *the justification of research products is largely based on pragmatic validity (do the actions, based on this knowledge indeed produce the intended outcomes?).*

COMPROVADA PELOS PRATICANTES

Fonte: VAN AKEN, J.; ROMME, G. *Reinventing the future: adding design science to the repertoire of organization and management studies. Organization Management Journal*, v.6, n.1, p.2-12, Spring 2009.

As peculiaridades acima citadas aumentam as chances de aplicação do conhecimento gerado, assim como da percepção de relevância deste conhecimento.

O processo é composto de cinco fases ou atividades (com realimentação), incluindo:

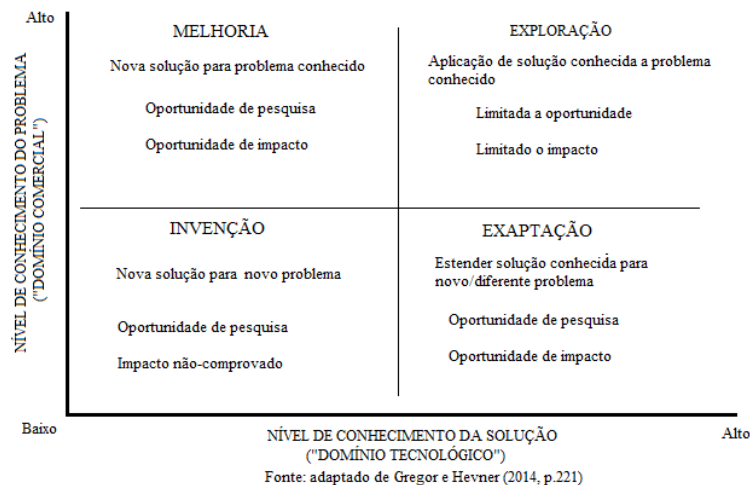
- (1) construção de um quadro conceitual,
- (2) desenvolvimento de uma arquitetura de sistema,
- (3) análise e concepção do sistema,
- (4) construção do sistema (protótipo) e
- (5) observação e avaliação do sistema

Deve se diferenciar o que é *Design Science* e *Design Science Research*. Enquanto *Design Science*, refere-se a princípios da fundamentação conceitual e epistemológica associados à compreensão do paradigma de pesquisa, *Design Science Research* (DSR) é um conjunto de técnicas e atividades (método) associadas ao desenvolvimento do conhecimento científico a partir de ciclos iterativos envolvendo a construção e teste de um artefato.

O paradigma da ciência comportamental procura desenvolver e verificar teorias que explicam ou predizem o comportamento humano ou organizacional. O paradigma do *Design Science* procura estender os limites das capacidades humanas e organizacionais, criando artefatos novos e inovadores. O foco principal deste método é desenvolver um artefato. Este deve ser inovador em algum sentido e constituído por técnicas cientificamente válidas, ou seja, geradas na academia ou pela ciência. Se não se consegue indicar a inovação em termos da(s) técnica(s) empregada(s) e como ela(s) inova(m) ou colabora(m) com o ambiente alvo

(que também pode ser novo para aquele artefato, caso em que será denominado *exaptation*), está-se apenas agindo como praticantes repetidores (“aplicando o já conhecido”). Neste sentido, existe uma clara diferenciação entre o que é *Design Science* e o que é desenvolvimento industrial. Enquanto a indústria busca ampliar resultados já obtidos, desenvolvendo o conhecimento existente, a pesquisa em *Design Science* traz sempre algo inédito em termos de utilização no campo de conhecimento considerado ou até mesmo em outros campos do conhecimento, quando então passa a ser denominada *exaptação* (*exaptation*). A figura 40 apresenta as quatro vertentes que podem ocorrer quando da aplicação do método *Design Science Research*.

Figura 40 – As quatro vertentes do *Design science*



Além disso, Hevner *et al.* apelam a uma clara contribuição ao organismo científico do conhecimento que pode estar - mas não precisa estar - relacionado à solução. Outras contribuições podem ser a extensão da base de conhecimento do *Design Science* (por exemplo, novos algoritmos de design) ou o desenvolvimento de novas metodologias (por exemplo, o desenvolvimento de novas métricas de avaliação). Hevner *et al.* explicitamente apontam que o *design* do artefato pode e deve ser informado pelo corpo teórico existente de conhecimento que possa fornecer conhecimentos e metodologias fundamentais para realização de pesquisas de design (teorias, ferramentas, estruturas, métodos etc.). Este *insight* é de particular importância, pois sublinha que o projeto de pesquisa e pesquisas comportamentais rigorosas não são mutuamente exclusivas - elas estão enraizadas na mesma tradição teórica e metodológica e se complementam.

O *design* se apresenta como um processo de pesquisa em permanente construção, onde ocorrem o ajuste, refinamento e avaliação contínuos do artefato produto da pesquisa.

Essa visão é compartilhada por muitos pesquisadores e é bem ilustrada por vários projetos de pesquisa em *design* (Van Aken, 1994). No final do processo de *design*, o artefato é

documentado e disponibilizado para aplicação prática. Além de publicar o artefato, os processos de *design* devem, idealmente, também contribuir para a ampliação do conhecimento científico e do domínio da base de conhecimento. Esse retorno de *insights* ilustra o potencial teórico inerente à pesquisa em *design*.

Embora os acadêmicos tenham sublinhado a importância das atividades de avaliação como parte do processo geral de projeto e tenham proposto vários métodos para esse fim (por exemplo, estudo de caso, pesquisa de campo, experimentos controlados e simulações), as diretrizes iniciais sobre boas práticas de *design* eram muito abstratas. Isso mudou consideravelmente ao longo dos anos; atualmente, os pesquisadores podem recorrer a vários procedimentos aprovados para o projeto e teste de soluções de problemas. Por exemplo, Van Aken (2004) propõe testes alfa e beta baseados em casos - o primeiro permitindo a aplicação da solução em seu contexto original e a última para uma tradução cuidadosa de uma solução para contextos novos e estendidos. Os estudiosos também fizeram progressos na adaptação dos métodos estabelecidos às necessidades específicas da pesquisa em design, assim como Sein et al. (2011) fizeram com o método de pesquisa-ação.

Na disciplina de pesquisa de design, há um debate em andamento sobre a questão de como os artefatos podem ser documentados, pois os estudiosos estão enfrentando dois grandes desafios nesse sentido: Primeiro, o próprio artefato geralmente não é interessante, porque resolve um problema específico relacionado a um contexto muito específico. Por esse motivo, geralmente é útil procurar uma descrição da solução mais abstrata que possa servir como solução para uma classe de problemas, ou seja, para uma classe de contextos (ligeiramente) diferentes. Segundo, a utilidade de um artefato para prática em ciência é muito limitada quando é apresentada em sua forma simples, sem nenhuma informação adicional (e formalizada) sobre, por exemplo, seu objetivo, escopo e / ou resultados pretendidos. Essas informações são necessárias para a aplicação adequada de um artefato e o uso para pesquisas cumulativas futuras.

Na tentativa de resolver esse problema, vários pesquisadores fizeram sugestões e propuseram estruturas para formatar e apresentar os resultados da pesquisa prescritiva orientada ao design. A proposta mais influente foi feita na década de 1990 por Walls et al. (1992), que definiu uma estrutura para especificar soluções para uma classe de problemas, considerando explicitamente um processo de adaptação do artefato a contextos específicos. Eles chamaram essa estrutura de 'teoria do design' porque também incluía bases teóricas do artefato ('teorias do kernel') e proposições que refletem como o artefato funciona. Walls et al. (1992) foi posteriormente aperfeiçoado por Gregor e Jones (2007), que propõem uma

especificação avançada dos elementos constituintes de uma teoria de design, incluindo escopo e mutabilidade de artefatos. Em um fluxo de pesquisa paralelo, Van Aken (2004, 2005) estabeleceu o termo de 'regras tecnológicas' como conhecimento geral que vincula uma intervenção ou artefato a um resultado ou desempenho desejado em um determinado campo de aplicação. Baseado nesta definição, ele explora como esse conhecimento praticamente relevante pode ser desenvolvido e testado.

Nos últimos anos, o paradigma do *Design Science* experimentou um crescimento notável nas disciplinas orientadas para a ação nas quais se estabeleceu. Tanto a investigação do próprio processo de design quanto a pesquisa aplicada de design amadureceram significativamente e encontraram legitimidade como um paradigma de pesquisa reconhecido. O paradigma do *Design Science* oferece várias lições que são relevantes para a pesquisa prescritiva de Gerenciamento de Projetos (*Project Management-PM*):

1. Fundamentação teórica de artefatos: As teorias podem informar o design de artefatos, fornecendo explicações sobre como e por que um artefato produz certo resultado desejado, melhorando assim a 'validade' de um artefato. A fundamentação teórica também vincula a pesquisa orientada à prática com o corpo existente de conhecimento científico, impedindo que uma disciplina desenvolva duas tradições de pesquisa diferentes.
2. Artefatos testáveis: Os artefatos precisam ser testáveis em termos de viabilidade e desempenho, buscando o melhor artefato para uma classe específica de problemas. Para permitir esses exames, são necessárias proposições testáveis.
3. Design como um processo de pesquisa cíclico: O desenvolvimento de artefato envolve atividades cíclicas de construção e avaliação que terminam quando o artefato não pode mais ser aprimorado e / ou é melhor que os artefatos existentes. Durante esse processo, o pesquisador considera projetos alternativos e refina os projetos existentes.
4. Pluralismo metodológico: Os pesquisadores podem recorrer a uma infinidade de métodos diferentes para o design e avaliação de seus artefatos. Cada método tem suas vantagens e desvantagens particulares em termos dos *insights* que pode gerar potencialmente. Por esse motivo, é aconselhável seguir uma abordagem multimétodo que aplique contextos diferentes.
5. Mutabilidade e instanciação de artefatos: somente em casos muito raros os artefatos podem ser usados 'fora da caixa'. Devido às alterações das condições contextuais de uso, os artefatos exigem uma instanciação, que inclui extensão ou modificação.

Isso requer que o designer de artefato pense em como um artefato pode ser adaptado a situações específicas.

2. METODOLOGIA

2.1 Pesquisa bibliográfica

Para a construção metodológica deste trabalho optou-se pela pesquisa bibliográfica como método de busca e levantamento da literatura sobre o tema ensino de sistemas de controle a fim de se obter as informações sobre o atual estado da arte neste campo de conhecimento.

Para a busca nas bases científicas foram utilizadas as palavras-chave: Ensino; Sistemas Produtivos; Controle de processos e Processos industriais.

A principal característica da pesquisa bibliográfica é ser elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de: livros, revistas, publicações em periódicos e artigos científicos, jornais, boletins, monografias, dissertações, teses, material cartográfico, internet, com o objetivo de colocar o pesquisador em contato direto com todo material já escrito sobre o assunto da pesquisa. Na pesquisa bibliográfica, é importante que o pesquisador verifique a veracidade dos dados obtidos, observando as possíveis incoerências ou contradições que as obras possam apresentar.

Para a aquisição dos dados foram aplicados os conceitos aprendidos sobre bibliometria tomando como referência as expressões “controle automático”; “controle de processos”; “ensino de controle de processos” e “PID”. As bases consultadas foram a *Web of Science*, *Research Gate*, *Elsevier* e *Google Scholar*.

O resultado da busca trouxe um total de 61 artigos, os quais foram analisados e que resultaram em uma seleção de 15 artigos que poderiam contribuir de forma significativa com o desenvolvimento deste trabalho.

A seguir são apresentados os resultados de alguns destes artigos que trazem concepções semelhantes para fins de comparação com o que será proposto neste trabalho.

- **Abordagem Didática Com Controle Adaptativo** – Este artigo, apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Elétrica (COBENGE), edição de 2006, de autoria de três pesquisadores da Universidade Federal de Campina Grande, propõe o desenvolvimento de uma plataforma programável baseada em microcontrolador ADuC como kit didático, para estudos de teoria de controle e sistemas embarcados. Segundo os autores, tal plataforma pode ser usada para implementar teorias de controle tanto convencionais (On/Off, P, PI, PID) quanto não-convencionais (Lógica Fuzzy, Controle Adaptativo), de maneira que o estudante possa observar o comportamento dinâmico de um sistema de controle real.

- Aplicação de métodos típicos industriais de sintonia de controladores PID em um protótipo de sistema térmico de baixo custo para ensino de sistemas de controle – Esta segunda experiência foi desenvolvida por três pesquisadores da Universidade Federal de São João Del Rei em Minas Gerais e também tem como propósito o desenvolvimento de uma plataforma didática que possibilite o ensino dos temas referentes a Sistemas de Controle por meio do controle da variável temperatura em um ambiente fechado. Em ambos os casos foi utilizada uma Plataforma Arduino para exercer a função de controlador do sistema.
- Metodologia Ativa Baseada em Projeto (ABPj) no ensino de engenharia: relato de experiência na disciplina de Sistemas de Controle I no Instituto de Engenharia da UFMT (Universidade Federal de Mato Grosso) – Neste trabalho os autores propuseram o desenvolvimento de uma plataforma para controle de um motor de corrente contínua, também utilizando uma plataforma Arduino.
- “*Low-cost platforms used in Control Education: An educational case study*”, este artigo, de autoria de E. Irigoyen, a, E. Larzabal e R. Priego, todos pertencentes aos quadros da *University of the Basque Country (UPV/EHU)*, foi apresentado por ocasião do 10th IFAC *Symposium Advances in Control Education*, promovido pela IFAC (*The International Federation of Automatic Control*), em agosto/2013 na localidade de Sheffield, Reino Unido. Neste artigo os autores abordam as principais alternativas que têm sido objeto de escolha por parte de pesquisadores para o desenvolvimento de soluções para projetos de controle. São mencionados os sistemas de ensino LEGO(R), MINDSTORM(R) NXT e Plataforma Arduino. Além da abordagem sobre os produtos em si, os autores ainda relatam duas experiências didáticas executadas com alunos de Engenharia Industrial, Automação e Eletrônica, utilizando as plataformas descritas. Nos resultados apresentados, os autores mencionam o maior envolvimento dos alunos que tiveram a oportunidade de vivenciar esta proposta, em comparação com estudantes que optaram por não realizar esta oficina ou que cursaram a mesma disciplina em anos anteriores e que não tiveram a mesma oportunidade. Além da vantagem relatada outro fato importante é que o trabalho realizado pelos alunos participantes gerou uma solução integrada usando várias soluções de baixo custo a partir de plataformas disponíveis na instituição.

2.2. Produtos oferecidos pelo mercado

O mercado de kits didáticos para o ensino profissional é bastante amplo, tendo um número significativo de empresas que se dedicam ao fornecimento de dispositivos de ensino voltados a praticamente todas as áreas tecnológicas. Com o segmento de Controle de Processos não é diferente. Há diversas empresas que oferecem em seu portfólio, produtos que têm como finalidade o ensino das técnicas fundamentais presentes em Sistemas de Controle tais como controle em malha aberta e fechada de pressão, vazão, nível e temperatura. A seguir são apresentadas algumas dessas alternativas disponíveis para instituições de ensino.

2.2.1. Didatech

Figura 41



Unidade de Controle de
Processo de Temperatura
com Controlador PID e
Software SCADA – Ref. DT-
CP054

Disponível em: <<https://didatech.com.br/unidade-de-controle-de-processo-de-temperatura-com-controlador-pid-e-software-scada-ref-dt-cp054/>>. acesso em 10/03/2020

O texto abaixo consta no site da empresa:

Esta unidade compacta de fácil manuseio permite executar vários testes de controle de temperatura em um circuito fechado de água quente. Uma bomba centrífuga faz a água recircular do tanque de aquecimento para um trocador do tipo placa, resfriado por água da rede. A temperatura é medida por uma termoresistência, e é controlada por uma válvula pneumática inserida na linha de entrada de água fria; um tubo de retardo pode ser inserido no circuito, para variar o tempo morto do sistema.

Programa didático

- Controle proporcional, integral e derivativo.
- Controle em malha aberta.
- Controle em malha fechada.
- Técnicas de configuração de um controlador.
- Resposta a ruído.
- Efeito do tempo morto sobre os parâmetros de controle.

2.2.2. Exsto

Kit Didático para Controle de Nível, Vazão e Temperatura XC229

Figura 42



Disponível em: <<https://exsto.com.br/kitdidatico/automacao-ind/x229-nivel-vazao-temperatura>>, acesso em 10/03/2020

A empresa informa em seu site o seguinte:

O kit possui malhas fechadas de controle de nível, vazão e temperatura. O controle de nível é realizado no tanque superior através de sensor de nível e da variação do fluxo que alimenta este tanque. O controle de temperatura também ocorre no tanque superior, onde uma resistência elétrica por ser controlada por PWM através de um relé de estado sólido. Um intertravamento de segurança impede que a resistência seja ligada sem um nível mínimo de água. Estas duas malhas podem ser combinadas para atuação simultânea de nível e temperatura. A malha de controle de vazão é feita com a circulação do líquido do tanque inferior, através da medida de fluxo na saída da bomba.

2.2.3. Solis

Figura 43 – Bancada Solis



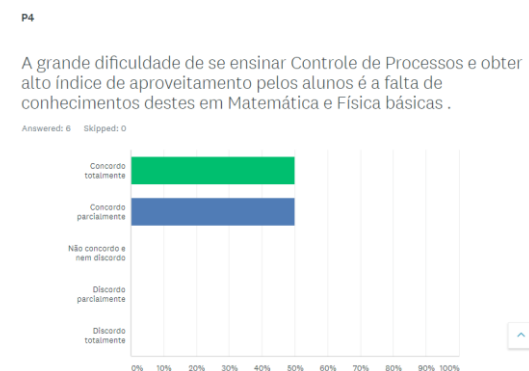
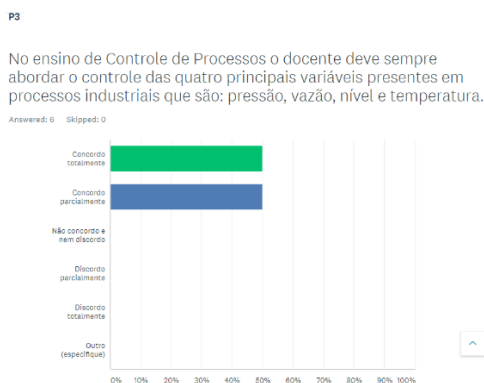
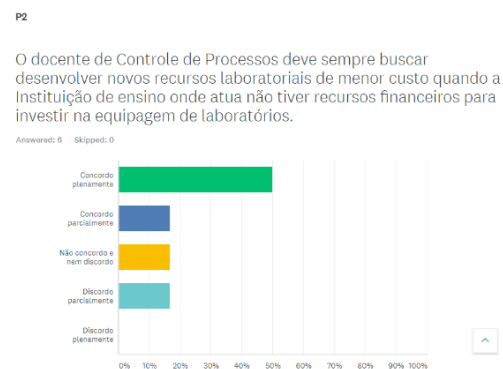
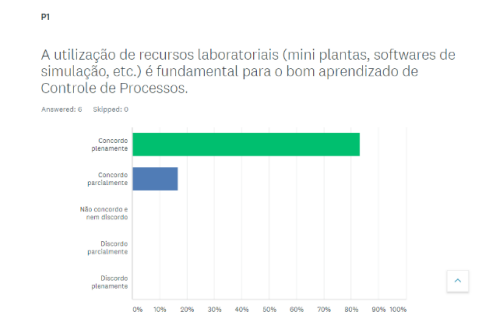
Disponível em: <<http://www.solistecnologia.com.br>>, acesso em 19/04/2019.

Na página do fabricante consta o seguinte texto:

A planta de treinamento Estação Compacta de Instrumentação e Controle de Processos, atua no âmbito industrial sobre as variáveis de controle de nível, vazão, temperatura e pressão, através de dispositivos e equipamentos de uso profissional da indústria. A Estação Compacta com suas 4 variáveis de controle é a solução ideal para treinamentos em processos típicos de produção nas mais diversas indústrias atualizadas com a realidade mundial. Os requisitos de modularidade do sistema permitem várias configurações de funcionamento, as quais podem ser implementadas com segurança através de programação e simulação por meio de testes práticos.

2.3. Pesquisa aplicada junto a docentes da área de Controle e Automação

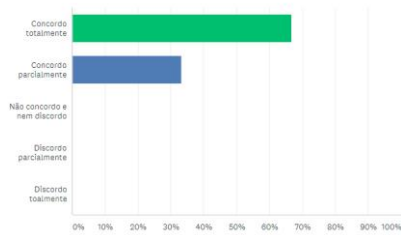
Para buscar melhor fundamentação à proposta foi elaborado um questionário com dez perguntas sobre o ensino de Sistemas de Controle e a infraestrutura necessária para o alcance dos objetivos pedagógicos neste campo de ensino. A pesquisa foi enviada a docentes de Controle e Automação pertencentes aos quadros de instituições públicas e privadas. O principal objetivo foi saber se os pressupostos que geraram este trabalho também ocupam espaço nas preocupações da comunidade acadêmica em geral e qual seria a significância desta proposição para os demais docentes da área. Para viabilizar o envio e a tabulação dos resultados a pesquisa foi criada e inserida no site *Survey Monkey* (<https://pt.surveymonkey.com/>). Os resultados obtidos foram os seguintes:



P5

A utilização de Metodologias Ativas de Aprendizagem, como por exemplo a PBL (Problem Based Learning), aplica-se perfeitamente às necessidades do ensino de Sistemas de Controle de Processos.

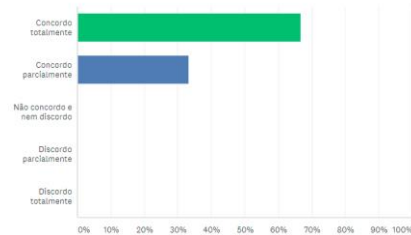
Answered: 6 Skipped: 0



P6

O docente deve sempre exigir que os alunos façam exercícios extra aula, uma vez que via de regra o tempo de aula é insuficiente para o completo aprendizado de Controle de Processos.

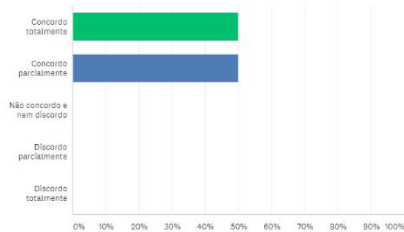
Answered: 6 Skipped: 0



P7

Um recurso de aprendizagem desenvolvido internamente na instituição de ensino pode ter a mesma eficácia que os recursos laboratoriais adquiridos no mercado.

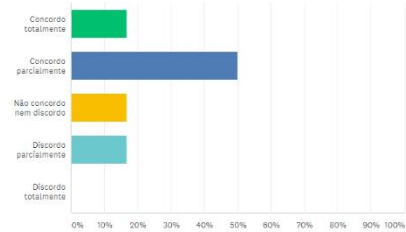
Answered: 6 Skipped: 0



P8

O (A) docente de Controle de Processos está melhor preparado (a) para ministrar este conhecimento quanto maior for sua experiência profissional no mercado industrial.

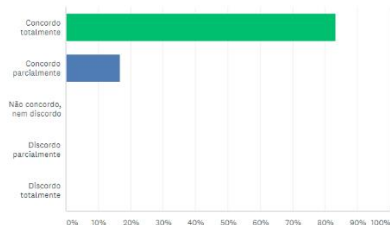
Answered: 6 Skipped: 0



P9

A maior contribuição de um laboratório bem equipado para a aprendizagem dos alunos é desenvolver experiências práticas que permitem sedimentar os conhecimentos adquiridos em sala de aula.

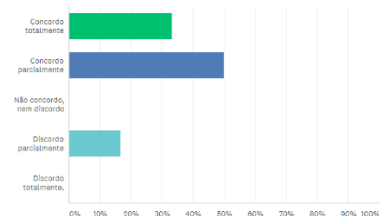
Answered: 6 Skipped: 0



P10

A aprendizagem eficaz de Controle de Processos é altamente dependente da infraestrutura laboratorial, caso esta infraestrutura não exista é impossível adquirir este conhecimento de forma plena.

Answered: 6 Skipped: 0



A análise das respostas acima permite observar que a maioria dos docentes consultados considera a infraestrutura fator preponderante de sucesso para o bom resultado de aprendizagem em Sistemas de Controle. Outro aspecto importante, onde parece haver consenso diz respeito a visão que os docentes têm sobre a formação básica dos alunos nas áreas da matemática e da física. Os resultados apontam que mesmo em universidades públicas renomadas, os docentes percebem a falta de base dos alunos para que se possa desenvolver plenamente os temas referentes a Controle de Processos.

Algumas respostas tiveram maior distribuição entre as alternativas. É o caso da pergunta 2, por exemplo, onde as respostas se apresentaram de forma menos concentrada, entre as alternativas propostas, o que mostra que nem todos os docentes concordam com a

proposta de eles próprios desenvolverem os recursos didáticos necessários, caso a IES não tenha possibilidade de adquiri-los no mercado. A causa para esta maior distribuição provavelmente está ligada ao fato de que muitos docentes não se dispõem a entregar para a IES um número de horas de trabalho maior do que aquela que reza em contrato de trabalho, coisa que seria necessária para desenvolvimento de novos recursos didáticos, além de terem que buscar recursos financeiros para viabilizar os projetos.

Cabe ainda um olhar mais apurado sobre as respostas à pergunta 8. Esta questão há muito ocupa espaço em debates acadêmicos e que envolvem outras áreas, em particular, o mercado corporativo. Ao observarem-se as respostas também nesta questão vê-se certa distribuição entre as alternativas. Pode se depreender que alguns docentes consultados entendem que a experiência mercadológica do corpo docente não é tão significativa para a qualidade do curso ministrado, sendo mais importante a vivência acadêmica. Esta questão tem como pano de fundo o propalado distanciamento entre o mundo acadêmico e o mundo corporativo. Os exemplos vindos de países desenvolvidos mostram que quando estes dois importantes agentes do conhecimento e da economia se aproximam ambos têm a ganhar e assim o país como um todo também acaba usufruindo dos resultados desta aproximação. A academia necessita estar próxima do mundo corporativo, pois as empresas, dadas as condições de alta competitividade em que estão envolvidas, são os agentes de desenvolvimento tecnológico onde a velocidade da pesquisa pode ser o fator chave para definir o sucesso ou o fracasso. Em função dessa necessidade as empresas tornam-se muitas vezes os principais vetores de desenvolvimento. Já estas também necessitam das contribuições oriundas do mundo acadêmico, pois não existe tecnologia sem antes ter existido ciência. Desta forma, aproximando-se do mundo acadêmico, as empresas usufruem dos resultados de trabalhos de pesquisa científica, que poderão ditar a regra em determinados segmentos de mercado a curto ou médio prazo. Portanto, ambos os segmentos da sociedade têm a ganhar com a aproximação mútua.

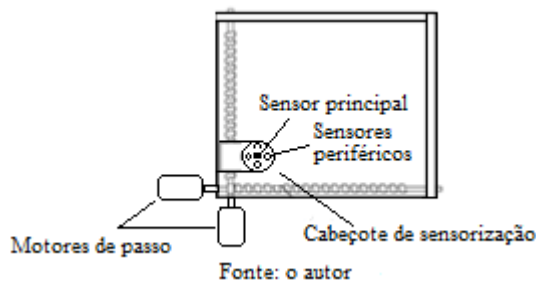
2.4.A proposta de artefato deste trabalho

Nos trabalhos pesquisados observaram-se algumas semelhanças e diferenças. Entre as semelhanças mais presentes, a utilização da plataforma Arduino foi a mais observada. Já as diferenças se apresentaram principalmente em termos de conceito construtivo dos diferentes artefatos. Alguns autores priorizaram a utilização de um sistema que emulasse a realidade de forma a possibilitar que o aluno encontre no laboratório situações semelhantes às que irá encontrar no ambiente de produção, enquanto outros autores buscaram apenas construir um

artefato que possibilitasse a execução de experimentos de aprendizagem sem necessariamente reproduzirem o ambiente real.

A proposta deste trabalho busca uma abordagem diferente das anteriormente citadas. A principal característica desta proposta é que o aluno possa fazer os experimentos de controle automático num contexto eletromecânico e que possa observar os resultados de sua intervenção de maneira rápida e direta. Para alcançar este objetivo foi proposta a construção de um artefato baseado em uma mesa de duas coordenadas (X-Y), sobre a qual serão feitos os experimentos propostos. Esta mesa tem a função de executar os movimentos previstos pelo controle do sistema. Para que o sistema se movimente em direções previstas foi projetado um componente denominado cabeçote de sensorização. Este componente irá suportar um conjunto de sensores ópticos, cuja função é dar a direção correta à mesa. A figura 44 apresenta a proposta original do sistema.

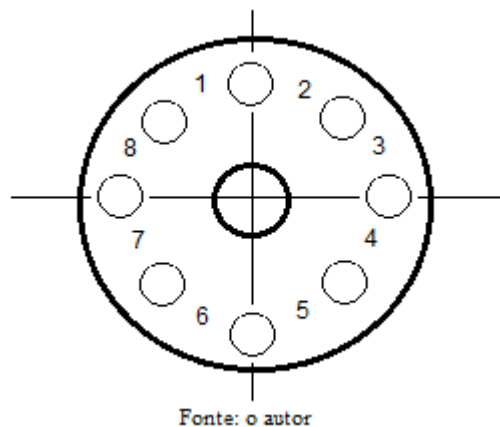
Figura 44 – Projeto original



Nesta proposta, o principal componente é aquele denominado cabeçote de sensorização. A sua função é servir de apoio a um conjunto de sensores ópticos. Estes sensores ópticos, por sua vez, deverão orientar o movimento da mesa conforme a direção do distúrbio aplicado ao sistema. Sobre a mesa será colocado um elemento refletor do sinal emitido pelos sensores. Quando o sensor principal, localizado no centro do cabeçote de sensorização, perceber a ausência do sinal, ele irá emitir a informação para um controlador lógico programável (CLP) que por sua vez irá processar esta informação e emitir o sinal de saída para o movimento dos motores, com a função de restabelecer o equilíbrio do sistema. Desta forma, se busca apresentar aos alunos como funciona um sistema de controle automático por meio de uma malha de controle fechada cujo sinal segue um algoritmo que tem sempre a função de repor o processo em seus parâmetros ideais de funcionamento, denominado *set point*. Os sensores localizados no cabeçote de sensorização denominados periféricos têm como função orientar o CLP para que este saiba qual é a direção tomada pelo distúrbio e assim poder acionar os motores de maneira a executar a correção do distúrbio de maneira eficaz.

A figura 45 demonstra a proposta desta parte do sistema. O sensor principal está localizado no furo central do cabeçote de sensorização. Quando for induzido um distúrbio no processo, este deverá tomar uma das oito possíveis direções conforme a posição dos sensores periféricos. Mediante a direção tomada pelo distúrbio e informada ao CLP, os motores farão com que a mesa se movimente de maneira a repor o processo em seu ponto de equilíbrio. A direção tomada pelo distúrbio poderá fazer com que seja acionado apenas um dos motores ou ambos.

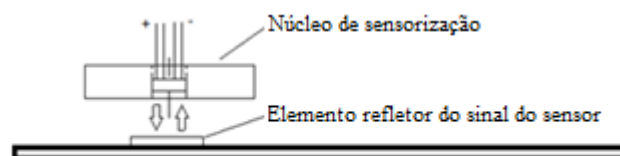
Figura 45 – Cabeçote de sensorização



Fonte: o autor

A figura 46 a seguir apresenta o cabeçote de sensorização posicionado sobre o elemento refletor do sinal, ou seja, o sinal refletido indica ao controlador do processo que a grandeza controlada está no seu valor ideal, ou seja, no *set point*.

Figura 46 – Cabeçote de sensorização



Fonte: o autor

Quando o elemento refletor do sinal do sensor deixar a posição dita ideal e se deslocar em uma das direções monitoradas pelos sensores periféricos, o CLP irá disparar a ordem que colocará em movimento os motores de passo que trarão de volta o processo ao *set point*. Como exemplo de funcionamento, suponha-se que o processo se desvie do *set point* na direção 2. Caso isto ocorra, o CLP deve comandar os dois motores à mesma velocidade para que o resultado do movimento seja de 45 graus, que é a direção 2. Desta forma, o processo será trazido ao ponto ideal, restabelecendo os parâmetros ideais de funcionamento.

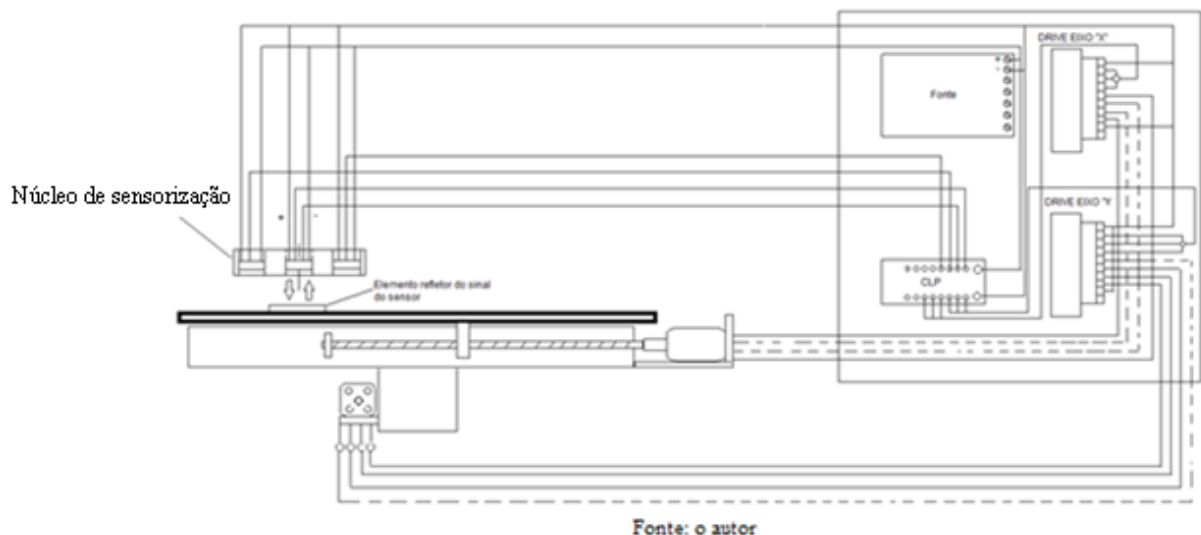
A geração do distúrbio poderá ser induzida no processo por meios manuais ou magnéticos, simbolizando a alteração dos parâmetros ideais em um processo real. Desta forma, tem-se a observação direta da reação de um sistema de malha fechada em busca da recolocação de um processo em seu estado ideal de funcionamento.

A forma de geração do distúrbio também pode ser induzida de diferentes maneiras. Existem basicamente cinco diferentes tipos de sinais de tempo contínuo, os quais representam as formas mais comuns com que os distúrbios podem afetar um processo que está estabilizado. Como se observou à figura 2, na página 21.

Dos cinco tipos de sinais representados, o sinal em degrau e o sinal em rampa são os mais apropriados para serem simulados no dispositivo proposto. Estes sinais representam variações de grandezas físicas como pressão, temperatura, vazão e nível que podem ocorrer em processos contínuos de maneira a alterar os parâmetros de produção, podendo causar diferentes tipos de problemas e de perdas produtivas. Na proposição deste trabalho buscou-se demonstrar de maneira prática e didática como um determinado tipo de distúrbio afeta um processo que está em estado de equilíbrio.

O sistema completo é composto pelo quadro de comando e a mesa de coordenadas e o núcleo de sensoriamento. A figura 47 apresenta o sistema em sua forma final.

Figura 47 – Sistema completo



2.3. O funcionamento

A proposta aqui apresentada procura emular um distúrbio que pode eventualmente surgir durante a execução de um processo produtivo e a cadeia de reações que devem ocorrer para eliminar este distúrbio, recolocando o processo em seus parâmetros ideais. Assim, a ocorrência do distúrbio será representada pela desestabilização do processo provocada pela retirada do elemento refletor do sinal do sensor de sua posição original e ideal, isto é, sob o sensor principal do cabeçote de sensorização. Neste momento os sensores periféricos mostram a sua função direcionando o movimento dos motores de maneira a repor o sistema em sua posição original, o que representa o processo voltando ao seu estado ideal de funcionamento. O elemento processador é o CLP que deve emitir as ordens de movimento para os *drives* dos motores e estes por sua vez irão acionar os motores de maneira a repor o processo em sua condição ideal, conforme comentado. O CLP estará programado para cumprir sua função por meio de linguagem de diagramas de contatos (*ladder*), linguagem esta bastante utilizada em projetos de automação industrial.

Dentro desta construção encontram-se presentes todos os elementos que compõem um processo automatizado ou com automação incorporada. Em primeiro lugar o processador, neste caso um CLP cuja função é controlar o processo, recebendo sinais provenientes do processo, processando-os e emitindo os sinais de saída com vistas a se obter o resultado desejado. Entenda-se aqui resultado desejado como sendo a reposição do processo em suas condições ideais que foram perdidas em virtude de fatores alheios e sobre os quais não se tem controle.

Em segundo lugar, os atuadores, neste caso representados pelos motores de passo cuja função é movimentar a mesa nas direções X e/ou Y, seguindo as ordens do controlador.

Em terceiro lugar os sensores, que neste caso são ópticos reflexivos e têm a função de enviar os sinais ao CLP para o devido processamento.

2.6. A construção do artefato

O artefato proposto foi construído a partir de itens comerciais de baixo custo. A sua composição mecânica se baseia em elementos de perfis estruturais de alumínio e trilhos deslizantes que permitem a movimentação relativa entre a base fixa e a mesa de apoio do elemento refletor de luz.

Junto aos trilhos deslizantes, um em cada sentido, está montado um fuso que recebe o movimento giratório de um motor de passo, cuja função é gerar o movimento linear da mesa.

Sobre os perfis de alumínio é montada a mesa, que se trata de uma chapa também de aço e tem por função apoiar o elemento refletor dos sensores ópticos montados no cabeçote além de, sendo ferro—magnética, mantê-lo fixo em um ponto para que o sistema possa trazê-lo de volta ao ponto ideal (*set point*).

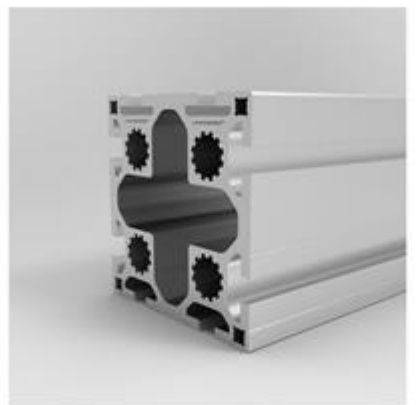
Acima da mesa está o cabeçote dos sensores cuja função é dar apoio a estes e direcioná-los à superfície da mesa. Este suporte pode ser regulado ao longo do comprimento de uma coluna metálica de sustentação, aumentando ou reduzindo a distância até a mesa.

O sistema de controle é montado ao lado da mesa em uma placa de alumínio e é composto por uma fonte de 24 Vcc, pelo CLP e pelos *drives* dos motores de passo. Esta placa de comando recebe, processa e emite sinais digitais advindos da mesa. Portanto, o sistema completo compõe-se de duas partes e suas interligações elétricas. Para fins de transporte o sistema pode ter suas duas partes desconectadas e transportadas separadamente. A seguir são apresentados os dados técnicos dos componentes do sistema.

2.6.1. Perfis estruturais de alumínio

Os perfis estruturais de alumínio formam a base do conjunto mecânico. Neste projeto foram utilizados dois tamanhos diferentes de perfis para reduzir o tamanho do conjunto mecânico. A figura 48 apresenta as características dos perfis utilizados.

Figura 48 – Perfil estrutural de alumínio



Disponível em: <<https://www.lojaforestsolucoes.com.br/FF40-01/>>, acesso em 26/02/2020

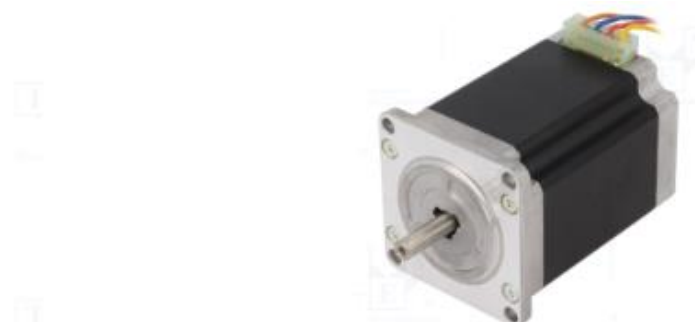
2.6.2. Motor de passo

Os motores de passo são aplicados quando um componente ou sistema necessita ser posicionado muito precisamente ou rodado de um ângulo exato.

Neste tipo de motor, a rotação é controlada por uma série de campos eletromagnéticos que são ativados e desativados eletronicamente.

Um motor de passo possui um número fixo de polos magnéticos e estes determinam o número de passos por revolução. Os motores de passo mais comuns possuem de 3 a 72 passos/revolução, significando que leva de 3 a 72 passos para completar uma volta. A figura 49 apresenta o motor de passo utilizado neste projeto.

Figura 49 – Motor de passo



Disponível em: <<https://www.tme.com/br/pt/details/103h7126-1740/motores-eletricos/sanyo-denki/>>, acesso em 26/02/2020

Os principais dados técnicos desse motor são apresentados na tabela 2:

Tabela 2 – Dados técnicos do motor de passo aplicado ao projeto

Dados técnicos	
Corrente	DC
Número de fases	2
Método	passo-a-passo
Tensão	24VDC
Passo	1,8°
Torque	1,47Nm
Corrente	4A

2.6.3. Drives dos motores de passo

O drive do motor de passo é uma interface de controle simples de passo e direção. Um motor de passo pode ter resoluções de passo diferentes: passo cheio, meio passo, um quarto, um oitavo e um dezesseis avos.

Um dos controles é a corrente ajustável, que permite a marcação de corrente máxima de

saída com um potenciômetro ou selecionando a corrente desejada por meio de chaves binárias denominadas *deep switches*. Esse recurso possibilita o uso de voltagens superiores ao suportado pelo motor para alcançar maiores taxas de passos.

Outro recurso possível é o controle de alteração inteligente que seleciona automaticamente o modo de decaimento de corrente (rápido ou lento)

O equipamento possibilita o desligamento por superaquecimento, travamento por sub-voltagem e proteção contra corrente cruzada.

Existe ainda a proteção contra curto ao terra e curto à alimentação. A figura 50 apresenta o Drive WD - 2404, utilizado no projeto.

Figura 50 – Drive do motor de passo



Os dados técnicos do drive são apresentados na tabela 3:

Tabela 3 – Dados técnicos do drive do motor de passo aplicado ao projeto

Dados técnicos	
Tensão de Alimentação	9 ~ 42Vdc
Corrente de Saída	4A
Compatibilidade de Fases	Duas e Quatro fases
Proteção	Sobretensão, Sobrecorrente e Curto-Circuito
Garantia	6 meses

2.6.4. Controlador Lógico Programável

Este componente é o principal item do projeto em termos de automação. O CLP sempre ocupa lugar de destaque em qualquer projeto de automação em que seja aplicado, uma vez que ele é o elemento processador, presente no ciclo da automação (Figura 3). O

CLP utilizado neste projeto é fabricado pela empresa Proxsys, de Campinas, SP, e a referência do modelo é CP-WS13-8DI8DO2AI2AO. A figura 51 apresenta o equipamento:

Figura 51 – CLP Proxsys



Disponível em: <<https://proxsys.com.br/cp-ws13-8di8do2ai2ao>>, acesso em 26/02/2020

Os principais dados técnicos deste equipamento são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Dados técnicos do drive do CLP aplicado ao projeto

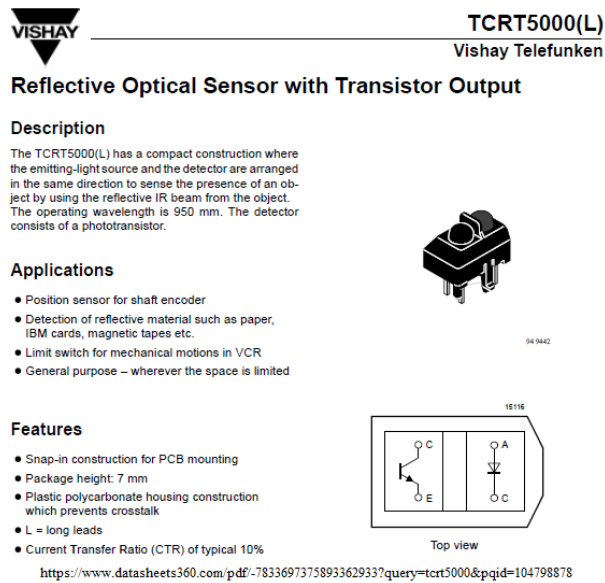
- Oito (08) saídas digitais a transistor tipo PNP
- Oito (08) entradas digitais a transistor tipo PNP
- Duas (02) saídas analógicas 4-20 mA
- Duas (02) entradas analógicas 1-5Vcc/4-20 mA(especificar)
- Porta de comunicação RS 485
- Porta de comunicação/gravação USB

A empresa Proxsys, de Campinas, SP, é uma empresa de pequeno porte, fabricante de Controladores Lógicos Programáveis para aplicações de automação industrial cuja linha de produtos abrange desde pequenos projetos até aplicações de porte médio. Dentre as características mais significativas dos produtos oferecidos por esta empresa destacam-se o baixo custo, a simplicidade de programação e o suporte técnico que a empresa oferece aos seus clientes do meio acadêmico ou industrial.

2.6.5 Sensor óptico

O sensor óptico aplicado neste projeto é um foto transistor e sua função é captar a mudança de estado no reflexo do elemento de referência e informar o controlador de que houve uma mudança de estado no processo. A partir dessa informação o controlador toma a ação necessária para repor o processo no estado original. A figura 52 apresenta o sensor e os dados técnicos.

Figura 52 – Sensor óptico



2.7. Custos de Construção do artefato

O fator custo foi um dos destaques por ocasião da apresentação desta proposta. Por esta razão, descrevem-se na tabela 5 os valores investidos na aquisição de itens comerciais e na fabricação de itens específicos:

Tabela 5: Custos de materiais e serviços

Item no	Descrição	QTD	Valor Unit.	Valor Total
1	CLP Proxsys CP-WS13-8DI8DO2AI2AO OEM	1	325,00	325,00
2	Motor de Passo Sanyo Denki 103h 7126-7140	2	680,00	1340,00
3	Drive Para Motor de Passo WD -2404	2	72,00	144,00
4	Fonte 24 Vcc ZX - MS 400 - 24 Vcc	1	80,00	80,00
5	Sensor Óptico Reflexivo Tcrt5000	9	1,50	13,50
6	Cabeçote de sensorização	1	75,00	75,00
7	Perfil estrutural de alumínio 80 x 80, comprimento 500 mm	1	142,00	142,00
8	Perfil estrutural de alumínio 40 x 80, comprimento 400 mm	2	57,00	114,00
9	Chapa retangular de alumínio 1,0 mm 40 x 70 cm	1	50,00	50,00
10	Fuso Trapezoidal TR14 com 500 mm	1	57,00	57,00
11	Fuso Trapezoidal TR18 com 300mm Passo 4mm	1	85,00	85,00
12	Corrediça telescópica para gaveta	4	8,00	32,00
13	Tubos de sustentação do cabeçote de sensorização (diam 3/4"x 1000 mm)	1	32,00	32,00
14	Chapa de alumínio para fixação dos componentes elétricos (40 x 60 mm)	1	85,00	85,00
15	Elementos de apoio dos fusos e motores	4	30,00	120,00
16	Mão de obra de usinagem e montagem	1	750,00	750,00
	Total			3444,50

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do dispositivo chega em sua fase final com os testes de funcionamento e interligação do painel elétrico e da mesa de coordenadas executados. Após esta fase algumas avaliações e considerações podem ser feitas: a proposta inicial de construção do artefato mostrou-se técnica e economicamente viável, uma vez que não houve grandes dificuldades técnicas em termos construtivos na parte mecânica. Porém no que tange às interligações elétricas e às tarefas de programação e parametrização do CLP, a construção do artefato tornou claro que são tarefas de maior nível de complexidade e que exigem mais tempo e maior profundidade de análise de funcionamento. A primeira constatação foi de que o equipamento escolhido para executar o comando não dispõe de recursos de programação que permitam alcançar toda a proposta inicialmente pensada. Desta maneira, a solução foi reduzir as alternativas de programação de forma a possibilitar que o artefato apresente ao menos uma situação de execução de uma ação de controle por malha fechada para que os alunos possam a partir daí apreender os conceitos que norteiam esta área do conhecimento dentro da engenharia.

Outra constatação muito importante diz respeito à própria ideia inicialmente apresentada como sendo uma alternativa eletromecânica aos equipamentos disponíveis no mercado para exercer as mesmas funções em ambientes de ensino voltados a Sistemas de Controle. Nestes equipamentos de mercado a ênfase é dada no controle de nível ou temperatura, principalmente. No caso do presente artefato, a ênfase é eletromecânica, ou seja, é um artefato que simula de modo muito próximo à realidade como é feita a correção de qualquer desvio dimensional que se apresente em um processo de fabricação que tenha base em processos de manufatura e não em processos contínuos, como pensado inicialmente. No entanto, o mundo dos processos contínuos e o dos processos de manufatura não estão tão distantes assim. Os processos produtivos de manufatura caracterizam-se principalmente por movimentos mecânicos quando são automatizados, enquanto os processos contínuos caracterizam-se pelo fluxo de produtos líquidos e ou gasosos em dutos com a finalidade de se misturarem e reagirem entre si levando a novos produtos ou compostos. Desta forma, quando em movimento durante o processo esses produtos fluem por dutos e válvulas, sendo que estas são elementos mecânicos que, para cumprirem suas funções, executam movimentos mecânicos tal qual ocorre nos processos de manufatura. Como exemplo, a figura 53 apresenta uma válvula de processos cujo funcionamento baseia-se na ação de um motor e este por sua

vez gera um movimento mecânico no núcleo da válvula proporcionando assim o deslocamento mecânico.

Figura 53 – Válvula de processos automatizada



Disponível em <<https://www.mhbrasil.com.br/artigos/valvulas-de-processo.php>>, acesso em 01/04/2020

Desta forma, o dispositivo tem sua aplicabilidade muito mais voltada ao mundo da manufatura do que ao mundo dos processos contínuos.

Outro aspecto importante que foi observado na fase de testes é que a reação do dispositivo a uma mudança nas condições do processo é acompanhada de um atraso (*delay*) até que o sistema inicie a correção do erro. Este fato se deve ao processamento da informação pelo CLP até que o programa emita a ordem de correção.

A inclusão do erro no sistema para que se observe a sua reação pode ser feita de diferentes maneiras, sendo a principal a movimentação manual do refletor, de forma a permitir a análise de diversas situações presentes em problemas de controle.

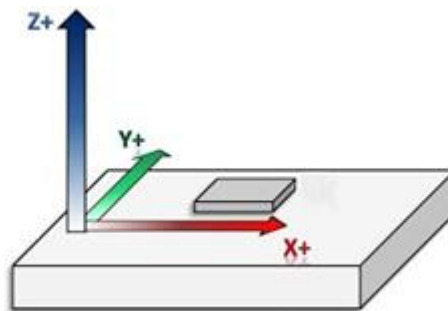
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONTINUIDADE DO TRABALHO

Como proposta de continuidade do trabalho é válido analisar a possibilidade de se implantar um sistema de controle que permita a programação de diferentes experiências, indo ao encontro das situações de ensino e aprendizagem pensadas quando da concepção do projeto. Ao longo do desenvolvimento do artefato, constatou-se que o controlador lógico programável utilizado tem limitações quanto à capacidade de programação de diferentes rotinas onde o resultado da saída é função da combinação de várias entradas.

No entanto, cabe mencionar que esta alteração no *hardware* do artefato não necessariamente significa aumento de custo, podendo, inclusive, redundar em redução deste, após avaliação das alternativas disponíveis no mercado.

Uma alternativa que merece ser considerada é implantar o terceiro eixo, fazendo com que a mesa de coordenadas se torne tridimensional. Observe-se a figura 54.

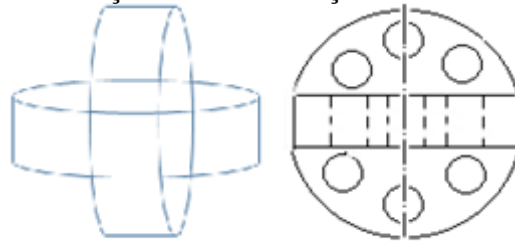
Figura 54 – Mesa de coordenadas tridimensional



Disponível em <<http://www.domingosdeazevedo.com/cam/ling5>>, acesso em 20/03/2020

Para esta implantação, será necessário o desenvolvimento de um novo cabeçote de sensorização uma vez que o distúrbio pode ocorrer em qualquer uma das três direções, ou ainda numa direção qualquer, composta pelas três coordenadas, dentro espaço de trabalho do artefato. Para superar o desafio de se produzir um novo cabeçote de sensorização, a proposta que se coloca é a fabricação de dois discos montados ortogonalmente um em relação ao outro, de maneira a cobrir praticamente 100% das possibilidades em termos de direções que o artefato possa tomar. A figura 55 apresenta de forma preliminar esta proposta.

Figura 55 – Cabeçote de sensorização tridimensional



Fonte: o autor

Tornando-se viável esta proposta, o artefato ganharia em flexibilidade e possibilidades de aplicação. Para se introduzir esta modificação há diversos obstáculos a serem superados: em primeiro lugar, surge a questão do custo que foi desde o início da proposta um fator considerado primordial para o alcance dos objetivos. Caso se implante o terceiro eixo, os custos evidentemente subirão em termos de motorização, estrutura mecânica e de processamento de dados. Por outro lado obter-se-á a possibilidade de utilização do artefato em aplicações novas, abrindo-se alternativas que poderão atender a necessidades de diferentes setores tanto educacionais, conforme pensado inicialmente, como também setores industriais.

Ainda dentro da configuração atual em duas dimensões existe a possibilidade de se construir diversos dispositivos úteis em diferentes segmentos. Um exemplo de aplicação em duas dimensões seria uma mesa pantográfica conforme se descreve a seguir: o artefato originalmente pensado continha a motorização a partir de duas coordenadas (X e Y). Mantendo-se a mesma configuração mecânica é possível fazer deste artefato um sistema que comande outro semelhante, porém com dimensões diferentes, de maneira a que os movimentos executados pelo artefato “mestre” sejam seguidos pelo artefato “escravo” seguindo os mesmos conceitos construtivos.

Outro aspecto importante é desenvolver um recurso de transporte eficaz e de baixo custo, uma vez que o artefato depois de concluído atingiu um peso que impossibilita o transporte manual.

Um dos aspectos mais importante é avaliar o resultado didático-pedagógico da aplicação desta proposta no ambiente de ensino. Para o alcance deste objetivo, o artefato será apresentado em vídeo aos alunos para que se possa avaliar seu real impacto.

Cumprando também citar que este trabalho pode ser reproduzido por outros docentes da área de Sistemas de Controle e a partir daí ser modificado ou aperfeiçoado buscando-se aliar o custo baixo à funcionalidade.

5. REFERÊNCIAS

AGUIRRE, H. A. R. **Implementação de Controle Digital de Posição de Motor CC em tempo real utilizando MATLAB e Simulink**, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

AMATROL, **Controle de Processos Térmicos – Métodos de Controle Automático**, Amatrol, Jeffersonville, Indiana, USA, 2007.

ANTSAKLIS, Panos J. *New Directions In Control Engineering Education: A North American Perspective*, University of Notre Dame, Department of Electrical Engineering, Notre Dame, Indiana, USA, 2000.

Assis, W. O.; Coelho, A. D.; Lima, F. R. G. de **Um Programa Didático Para Ensino de Sistemas de Controle em Laboratório do Curso de Engenharia**.

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, sem data.

CAMPOS, Mário Cesar M. M. de; TEIXEIRA Herbert C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. 2ª ed., São Paulo: Blucher, 2010.

CAMPOS, W. F. **Projeto de planta química didática para desenvolvimento de diferentes estratégias de controle de processos e automação industrial**. 2016. 101 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2016.

CRUZ D. M.; Gomes A. C. F.; **Metodologia Ativa Baseada em Projeto (ABPj) no ensino de engenharia: relato de experiência na disciplina de Sistemas de Controle I no Instituto de Engenharia da Universidade Federal do Mato Grosso**, UFMT, Brasil, 2018.

GAIJUTIS, O. dos S., **Análise de Métodos Práticos de Ensino de Automação para Processos Industriais: Equipamento Físico e Simulação Computacional**. 2018. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2018.

GREGOR, S.; HEVNER, A. **The Knowledge Innovation Matrix (KIM): A clarifying lens for innovation**. Informing Science: The International Journal of an Emerging Transdiscipline, v.17, p.217-239, 2014

GOMES Y. C., ARAÚJO T. V. G. P., LIMA A. M. N. **Abordagem Didática Com Controle Adaptativo**, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande – PB, 2006.

KESHAV, S. *How to Read a Paper*, David R. Cheriton School of Computer Science, University of Waterloo, ON, Canada, 2007.

LOBO Felipe M. **Contribuições ao Ensino de Controle Usando Matlab, Arduino e Hardware de Baixo Custo**. 2017. 84 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, 2016.

MAGALHÃES, E. P.; *et al*, **Aplicação de Métodos Típicos Industriais de Sintonia de Controladores PID em um Protótipo de Sistema Térmico de Baixo Custo para Ensino de Sistemas de Controle**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (UFSJ/CEFET) UFSJ - Universidade Federal de São João del-Rei.

NISE, Normas S.; **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6ª ed., São Paulo, LTC, 2012.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SCHAF, F.D. **Arquitetura para Ambiente de Ensino de Controle e Automação Utilizando Experimentos Remotos de Realidade Mista**. 2006. 207 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2006.

SILVEIRA, A. dos S.; MACHADO, E.; SOUZA, J. A.; **Construção de uma bancada didática de baixo custo para ensino de sistemas de controle**. Braz. Ap. Sci. Rev., Curitiba, v. 3, n. 1, p. 133-144, jan./fev. 2019.

SILVEIRA, P. M. da; RIBEIRO, P. F.; **Introdução do Conceito de Redes Elétricas Inteligentes no Currículo do Engenheiro Eletricista Brasileiro**, XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém do Pará, 03 a 06/09/2012.

SILVEIRA, Marcos A. da. Controle e Automação: história e caracterização. In: **Enciclopédia de Automática Controle & Automação**. São Paulo: Blucher, 2007.

URSULET, S. e GILLET, D. *Introducing flexibility in traditional engineering education by providing dedicated on-line experimentation and tutoring resources*, *International Conference on Engineering Education*, number 18-21, Manchester, United Kingdom, 2002.

YU, R; CHANG, Z.; ZHAN, C.; **Research on ways to improve electrical engineering and its automation**, *Academic Journal of Engineering and Technology Science* ISSN 2616-5767 Vol. 2, Issue 1: 210-214, DOI: 10.25236/AJETS.020034, *College of Electrical Engineering & New Energy China Three Gorges University , Hubei, China*,

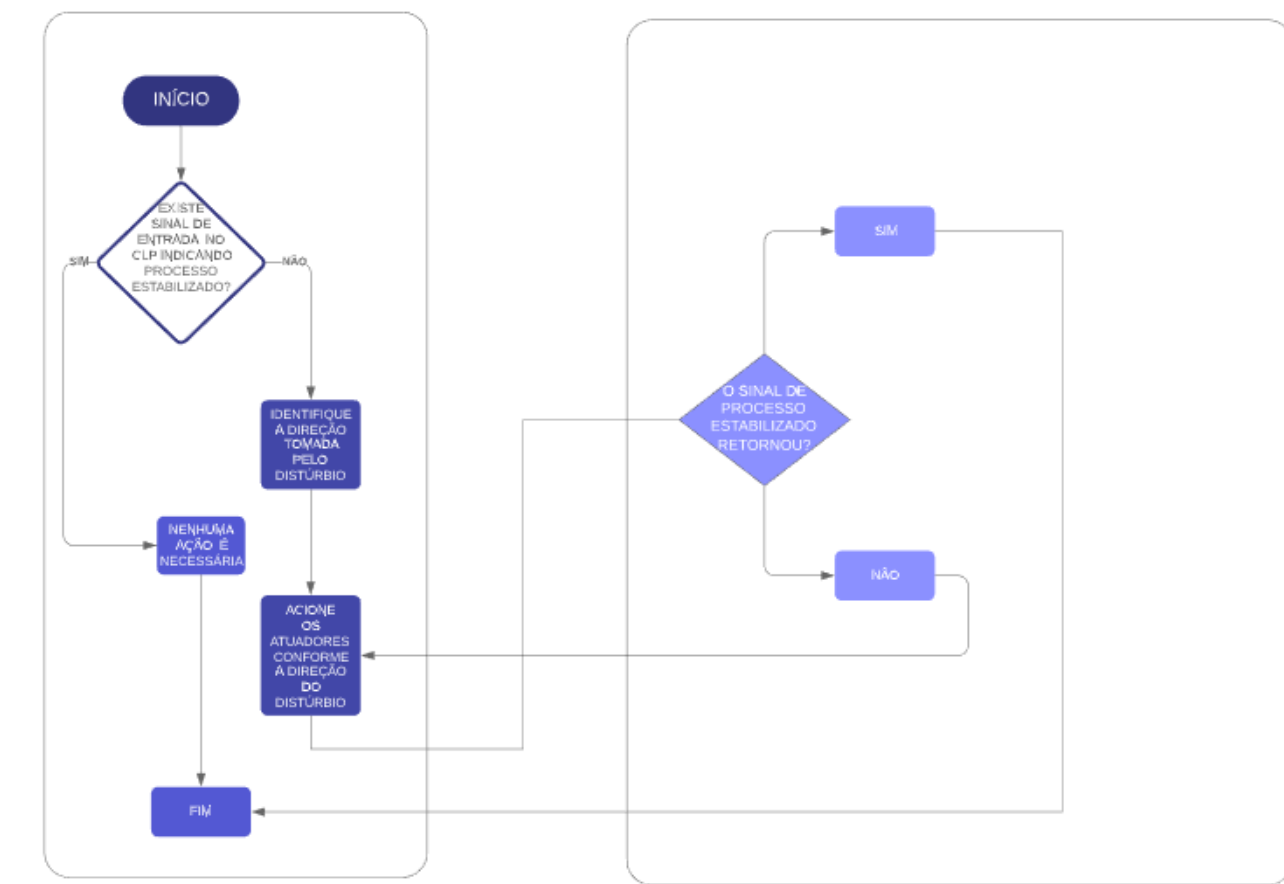
<https://www.google.com/search?q=teleologia+significado&oq=teleologia&aqs=chrome.1.69j57j0l5.5248j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

6. APÊNDICES

APÊNDICE I - ALGORITMO

O algoritmo para a execução da sequência de funcionamento do sistema pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Ligar o sistema
2. Posicionar o elemento refletor de sinais sob o sensor principal.
3. Elemento de reflexão do sensor principal reflete o sinal vindo do sensor?
4. Em caso positivo o sistema se mantém inerte, já que a reflexão do sinal emitido pelo sensor indica que a posição está correta, isto é, que o processo está no ponto ideal (*set point*).
5. Em caso negativo, é indicativo de que o processo não está em sua condição ideal.
6. Neste caso um dos sensores periféricos, emite um sinal para o processador.
7. O processador ao receber o sinal proveniente do sensor periférico, identifica a direção do desvio.
8. Ao identificar a direção do desvio, o processador emite o sinal de saída acionando os atuadores para que tragam o processo ao seu ponto de equilíbrio, restabelecendo as condições ideais.
9. Quando o sinal indicativo de reposição do refletor na posição correta, sob o sensor principal, é enviado ao processador, este interrompe o sinal de saída fazendo com que o processo seja restabelecido ao seu valor ideal.

APÊNDICE II - FLUXOGRAMA

APÊNDICE III – DIAGRAMA *LADDER*

