



**Cleverson Flôr da Rosa**  
**João Dallamuta**  
**(Organizadores)**

---

**A Interface**  
**Essencial**  
**da Engenharia**  
**de Produção no**  
**Mundo Corporativo 4**

---

Cleverson Flôr da Rosa  
João Dallamuta  
(Organizadores)

# A Interface Essencial da Engenharia de Produção no Mundo Corporativo 4

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

#### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
l61	<p>A interface essencial da engenharia de produção no mundo corporativo 4 [recurso eletrônico] / Organizadores Cleverson Flôr da Rosa, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (A Interface Essencial da Engenharia de Produção no Mundo Corporativo; v. 4)</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-458-0 DOI 10.22533/at.ed.580190907</p> <p>1. Administração de produção. 2. Engenharia de produção. 3. Gestão da produção. I. Rosa, Cleverson Flôr da. II. Dallamuta, João. III. Série.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p>
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior   CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br



## APRESENTAÇÃO

Esta obra, organizada em múltiplos volumes, é composta por pesquisas realizadas por professores de cursos de engenharia e gestão. Optamos por uma abordagem multidisciplinar por acreditarmos que esta é a realidade da pesquisa em nossos dias.

A engenharia de produção é um ramo da engenharia industrial que estuda a tecnologia de processos de produção de natureza industriais, mas que acabam por serem estendidos a outras áreas como serviços e gestão pública. Dada a sua natureza orientada a resolução problemas, a engenharia de produção é fortemente baseada em situações práticas do setor produtivo, característica esta que exploramos nesta obra.

Todos os trabalhos com discussões de resultados e contribuições genuínas em suas áreas de conhecimento. Os organizadores gostariam de agradecer aos autores e editores pelo espírito de parceria e confiança.

Boa leitura

Cleverson Flor da Rosa

João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
GERENCIAMENTO DE RISCOS EM PROJETOS: UM ESTUDO DE CASO EM UMA MINERADORA	
Damerson Marcon Machado	
Ingrid Machado Silveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5801909071</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>14</b>
GESTÃO ESTRATÉGICA E PRODUTIVIDADE NA BETA DISTRIBUIDORA DE BEBIDAS	
Rhubens Ewald Moura Ribeiro	
Letícia Ibiapina Fortes	
Wesley Rodrigo Damasceno Torres	
Kaique Barbosa de Moura	
José Alberto Alencar Luz	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5801909072</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>27</b>
ILUMINAÇÃO PÚBLICA: MODERNIZAÇÃO E MANUTENÇÃO; OS RISCOS À SAÚDE, AO MEIO AMBIENTE E À SEGURANÇA DO TRABALHADOR	
José Fernando Mangili Júnior	
Carlos Alberto Mariotoni	
Alberto Luiz Francato	
Anderson Dionízio da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5801909073</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>43</b>
IMPLANTAÇÃO DO PROGRAMA 5S: UM ESTUDO DE CASO EM UMA MICROEMPRESA DO RAMO DE CONFECCÃO	
Guilherme Farias de Oliveira	
Fabiola Gomes Farias	
Roberta Dutra de Andrade	
Bárbara Sampaio de Menezes	
Emiliano Sousa Pontes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5801909074</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>55</b>
INTERDISCIPLINARIDADE NO ENSINO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: UM ESTUDO NUMA INSTITUIÇÃO PÚBLICA DE SANTA CATARINA	
Edina Elisangela Zellmer Fietz	
Liandra Pereira	
Delcio Pereira	
Nadir Radoll Cordeiro	
Ernesto Augusto Garbe	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5801909075</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>71</b>
INTERFACE COM FORNECEDOR: BENEFÍCIOS DA APLICAÇÃO DO SISTEMA <i>MILK RUN</i> , UMA PESQUISA-AÇÃO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA (TIER 1)	
Eduardo Villalba	
Alexandre Tadeu Simon	
Renan Stenico de Campos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5801909076</b>	

**CAPÍTULO 7 ..... 84**

INVESTIGANDO O RELACIONAMENTO DO FABRICANTE DE EQUIPAMENTOS E A USINA SUCROALCOOLEIRA NO ESTADO SÃO PAULO

Paulo Henrique Palota  
Manoel Fernando Martins  
Murilo Secchieri de Carvalho

**DOI 10.22533/at.ed.5801909077**

**CAPÍTULO 8 ..... 97**

MODELAGEM MATEMÁTICA E PROGRAMAÇÃO LINEAR: APLICAÇÕES EM SITUAÇÕES REAIS VISANDO AUMENTAR A QUALIDADE NA TOMADA DE DECISÃO

Jerson Leite Alves  
Ana Gabriela Lima Pacifico  
Jordan Gustavo da Silva  
Lucas Pereira Viana

**DOI 10.22533/at.ed.5801909078**

**CAPÍTULO 9 ..... 102**

PROPOSTA DE UM DISPOSITIVO *POKA YOKE* PARA PLATAFORMA DE CORTE DE COLHEITADEIRA

Carlos Henrique Haefliger  
Geniel de Mello Dias  
Ivete Linn Ruppenthal  
Loana Wolmman Taborda

**DOI 10.22533/at.ed.5801909079**

**CAPÍTULO 10 ..... 117**

REFLEXÕES SOBRE PRÁTICAS PEDAGÓGICAS PARA A ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Rafael Gonçalves Bezerra de Araújo  
Marcus Vinícius Americano da Costa Filho  
Sérgio Ricardo Xavier da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.58019090710**

**CAPÍTULO 11 ..... 130**

RELAÇÃO ENTRE FATORES HUMANOS E CAUSAS DE ACIDENTES DO TRABALHO RURAL

Maria Vitoria Bini Farias  
José Ilo Pereira Filho  
Danielle Bini

**DOI 10.22533/at.ed.58019090711**

**CAPÍTULO 12 ..... 145**

RESERVATÓRIO DE ÁGUA DA CHUVA COMO PARTE DO SISTEMA DE SUSTENTABILIDADE EM HORTAS URBANAS DA CIDADE DE UMUARAMA- PR

Milton da Silva Junior  
Edimar Pertelini  
Giovana Silva de Godoy  
Máx Emerson Rickli  
Alline de Lima Rodrigues

**DOI 10.22533/at.ed.58019090712**

**CAPÍTULO 13 ..... 152**

A RELEVÂNCIA DOS PROCESSOS DE CONTROLE DE INVENTÁRIO COM ACURÁCIA NOS ESTOQUES FOCANDO DESPERDÍCIOS E REDUÇÃO DE CUSTOS NA INDÚSTRIA MANUFATUREIRA

Sirnei César Kach  
Raquel Sassaro Veiga  
Dieimis Maicher Naujorks

**DOI 10.22533/at.ed.58019090713**

**CAPÍTULO 14 ..... 166**

SISTEMA DIDÁTICO DE CONTROLE UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO E UM CIRCUITO RC EMULANDO UM MOTOR CC

Paulo Roberto Brero de Campos  
Miguel Antonio Sovierzoski  
Carlos Alexandre Brero de Campos

**DOI 10.22533/at.ed.58019090714**

**CAPÍTULO 15 ..... 179**

UMA PROPOSTA DE APLICAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE ARMAZENAMENTO EM UMA EMPRESA SIDERÚRGICA

Samuel Martins Drei  
Carolina Lima Silva  
Kellen Núbia Monteiro Fagundes

**DOI 10.22533/at.ed.58019090715**

**CAPÍTULO 16 ..... 192**

ANÁLISE DA QUALIDADE DE VIDA NO TRABALHO DOS SURDOS EM EMPRESAS DO PARANÁ

Roger Maliski de Souza  
Antônio Carlos de Francisco  
Myller Augusto Santos Gomes

**DOI 10.22533/at.ed.58019090716**

**CAPÍTULO 17 ..... 204**

CONSTRUÇÃO DE JOGOS EDUCATIVOS NA APRENDIZAGEM DOS PROCESSOS PRODUTIVOS DE FUNDIÇÃO DE COMPONENTES METALÚRGICOS

Lisiane Trevisan  
Suzana Trevisan  
Daniel Antonio Kapper Fabricio

**DOI 10.22533/at.ed.58019090717**

**CAPÍTULO 18 ..... 211**

O PERFIL DAS INCUBADORAS DE EMPRESAS DE BASE TECNOLÓGICA (IEBT'S), UM ESTUDO NACIONAL

Adriana Queiroz Silva  
Sérgio Luis Dias Doliveira  
Felipe Queiroz Doliveira

**DOI 10.22533/at.ed.58019090718**



<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>222</b>
PERCEPÇÃO DO CLIMA ORGANIZACIONAL: UM ESTUDO APLICADO EM TRÊS ESCOLAS DE DIFERENTES SETORES DO RIO GRANDE DO SUL	
Natália Eloísa Sander	
Isadora Franck Naiditch	
Matheus Funck	
<b>DOI 10.22533/at.ed.58019090719</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>235</b>
SATISFAÇÃO DO TRABALHADOR: ESTUDO DE CASO EM UMA EMPRESA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS	
Sandra Martins Moreira	
Valéria Kucmanski	
Sandra Maria Coltre	
Luiz Alberto Pilatti	
Claudia Tania Picinin	
<b>DOI 10.22533/at.ed.58019090720</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>250</b>
O LETTERING COMO DIFERENCIAL NO MERCADO DE TRABALHO	
Kyane Godoi Passos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.58019090721</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>265</b>

## SISTEMA DIDÁTICO DE CONTROLE UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO E UM CIRCUITO RC EMULANDO UM MOTOR CC

### **Paulo Roberto Brero de Campos**

brerocampos@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Avenida Sete de Setembro, 3165  
CEP 80230-901 – Curitiba – Paraná

### **Miguel Antonio Sovierzoski**

miguelaso@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Avenida Sete de Setembro, 3165  
CEP 80230-901 – Curitiba – Paraná

### **Carlos Alexandre Brero de Campos**

carlosbrero@gmail.com

Instituto de Pesos e Medidas do Paraná – IPEM/  
PR  
Rua Estados Unidos, 135  
CEP 82.510-050 – Curitiba – Paraná

**RESUMO:** a teoria de controle é bastante abstrata, sendo por isso de difícil compreensão por parte dos alunos. Há um consenso que é muito importante utilizar recursos didáticos que facilitem a compreensão da teoria. Hoje em dia existem diversas plataformas de hardware e software desde as mais simples, mais baratas e com poucos recursos, até as mais completas, e por isso mais caras e complexas. O Arduino Uno é uma plataforma que pode ser utilizada com pouco conhecimento de software e de hardware. Neste artigo mostra-se a aplicação

de um sistema de controle utilizando o Arduino Uno. Mesmo o professor não tendo ao seu alcance um kit didático de controle, ele pode utilizar um circuito RC para emular um sistema de primeira ordem, como se fosse, por exemplo, um motor CC, que será controlado pelo Arduino Uno. Neste artigo um circuito RC é utilizado como planta e são mostrados os resultados para dois tipos de controladores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arduino Uno, Controle de processo, emulação com circuito RC, IMC.

### DIDACTIC CONTROL SYSTEM USING ARDUINO PLATFORM AND A RC CIRCUIT EMULATING A DC MOTOR

**ABSTRACT:** The theory of control, being abstract, is often difficult for students to understand. For this reason, it is very important to use didactic resources that facilitate the understanding of the subject. Nowadays there are several hardware and software platforms that can be used to test the theory of control in physical systems. Arduino is a platform that can be used with little knowledge of software and hardware. This article shows the application of a control system using Arduino. Even if the teacher does not have a didactic model at his disposal, he can use the Arduino to study the operation of a control system through a RC circuit emulating

a first order system, such as a DC motor. In this article an RC circuit is used as a plant and the results for two types of controllers are shown.

**KEYWORDS:** Arduino, Process control, emulation with RC circuit, IMC.

## 1 | INTRODUÇÃO

Existe uma concordância de que as simulações não podem substituir totalmente experimentos reais, (FEISEL & ROSA, 2005), mas a simulação é uma fase importante na formação dos alunos, pois permite que os alunos compreendam o funcionamento do sistema livre de interferências externas.

Em Fisher et al, (FISHER et al., 2000), foi realizado um estudo com ex-alunos que indicaram que o maior aprendizado ocorreu nas aulas de laboratório.

Segundo Bencomo, (BENCOMO, 2004), as leis de controle com dinâmicas complicadas e incertezas nas medições não são bem compreendidas pelos alunos, desta forma fica evidente a importância de fazer uso de sistemas de controle como auxílio didático.

A simulação é importante para o aprendizado, mas a falta de aplicação do conhecimento em plantas reais tem sido uma falha na formação dos alunos. A solução ideal seria integrar os dois laboratórios, simulação e físico, de forma que o aluno pudesse fazer simulações para entender o processo e projetar o compensador, para em seguida testar o compensador em um processo físico. Contudo, sistemas didáticos utilizados para o ensino de controle não são baratos e nem todas as universidades possuem equipamentos deste tipo.

Hoje em dia existem diversas plataformas de software e hardware que podem ser utilizadas para implementar o controle de sistemas físicos. Entre estas, a plataforma Arduino é umas das mais fáceis de usar e de menor custo.

Arduino é uma plataforma aberta de projetos de hardware que se tornou mundialmente popular. Ela foi criada em 2005 no Interaction Design Institute Ivrea, Itália, (ARDUINO1, 2017)

O Arduino Uno é baseado na utilização de placas de microcontrolador de baixo custo e oferece um ambiente de desenvolvimento de software. O ambiente utiliza a linguagem C/C++ para a programação.

Outra vantagem da utilização do Arduino Uno é que não é necessário o uso de equipamentos de medição. O próprio software pode capturar os resultados do experimento e desenhar os gráficos de resposta, ou ainda utilizar o Matlab para fazer a captura dos dados e desenhar os gráficos.

Neste artigo é mostrado um sistema de controle digital com o Arduino Uno, utilizando um circuito RC como planta.

Este artigo está dividido na seguinte forma: na secção 2 é mostrada a estrutura básica de um sistema de controle digital; na secção 3 faz-se o modelamento dos blocos do Arduino Uno; na secção 4 é mostrado o uso de um circuito RC emulando um

motor CC; na secção 5 são mostrados os resultados experimentais e finalmente na secção da conclusão são feitas considerações finais sobre o experimento apresentado neste artigo.

## 2 | ESTRUTURA BÁSICA DE UM SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL

Na Figura 1 é mostrada a estrutura básica de um sistema de controle digital, composta por um microcontrolador, um conversor A/D e um PWM. Normalmente os microcontroladores mais simples possuem conversores A/D e circuitos PWM incorporados no próprio circuito integrado.

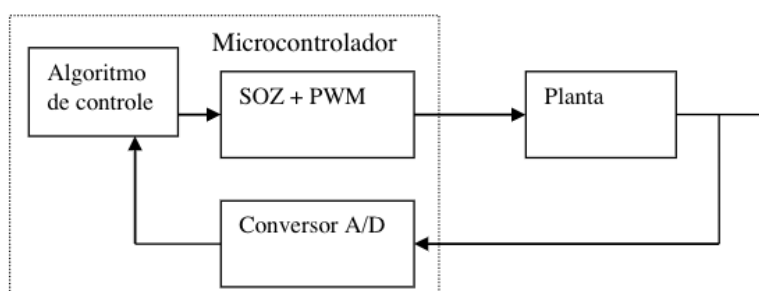


Figura 1 - Diagrama em blocos do sistema de controle

Fonte: os Autores (2017)

O microcontrolador trabalha sincronizado com um sinal de clock (relógio) interno. As ações acontecem a cada ciclo de clock.

A discretização do sinal contínuo é mostrada na figura 2. O amostrador, indicado no modelo por uma chave, transforma o sinal contínuo em um sinal com amplitude contínua e com tempo discreto, como mostrado na figura 2. O conversor A/D transforma o sinal de amplitude contínua em um sinal de amplitude discreta. O microcontrolador recebe estes sinais e faz o processamento conforme o algoritmo a ser executado. O sinal enviado pelo microcontrolador possui tempo discreto e amplitude discreta. Este sinal é aplicado ao registrador do PWM, atuando como um segurador de ordem zero (SOZ), mantendo o valor constante durante todo o período de amostragem para que o sinal possa ser reconhecido pela planta. O sinal em seguida é aplicado ao atuador (driver) que envia o sinal para a planta.



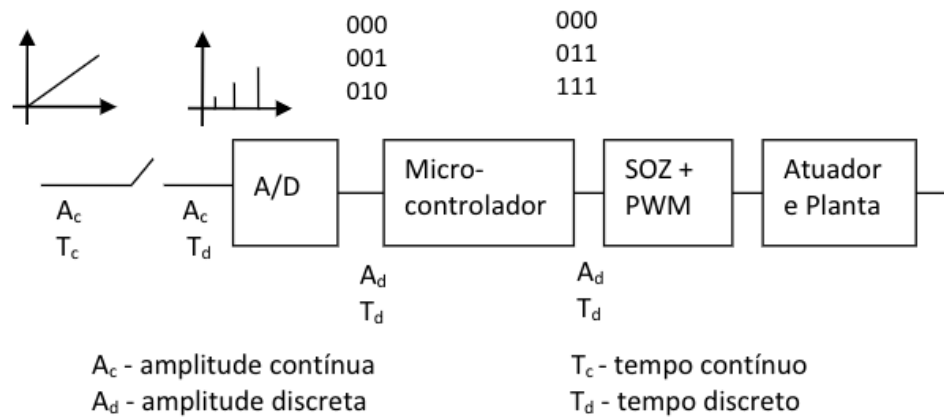


Figura 2 – Tipos de sinais de um sistema de controle digital

Fonte: os Autores (2017)

Para controlar o processo, o controlador (microcomputador ou microcontrolador) deve:

1. Receber as medidas do sistema (conversor A/D).
2. Processar estas medidas (algoritmo de controle).
3. Enviar os sinais de controle ao atuador, que envia o sinal de saída ao processo.

Na maioria dos sistemas físicos, a planta e o atuador são analógicos e o controlador é digital. Para que o sinal digital possa ser acoplado ao sistema analógico, é necessário manter esse sinal constante durante o período de amostragem. Para isso é utilizado um registrador. Por ter um registro interno, o PWM é modelado como um segurador de ordem zero, mais um ganho.

Devido ao fato do segurador de ordem zero (SOZ) estar presente na malha de controle, o seu modelo deve ser incluído no modelo do processo. O modelo do SOZ é mostrado na equação 1.

$$G_{SOZ} = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \quad (1)$$

Sistemas deste tipo possuem uma parte discreta, o microcontrolador, e uma parte contínua, a planta. A análise do sistema pode ser feita através do equivalente discreto do sistema. Para obter o equivalente discreto do sistema controlado pelo microcontrolador, é necessário calcular a transformada Z do produto das funções de transferência do SOZ e do processo contínuo, como mostrado na equação 2.

$$G(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{G(s)}{1} \right\} = (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} \quad (2)$$

### 3 | O ARDUINO UNO

O Arduino Uno é uma placa baseada no microcontrolador ATmega328P da ATMEL. Ele possui 14 pinos de entrada/saída (sendo que 6 podem ser utilizados como saídas de PWM), 6 entradas analógicas atuando como conversores A/D e uma conexão USB. Ele já possui internamente toda estrutura necessária para fazer qualquer tipo de controle, (ARDUINO2, 2017).

Para programá-lo basta instalar o ambiente Arduino no microcomputador pessoal (PC) e conectar a placa do Arduino Uno a uma entrada USB.

O programa é armazenado em uma EEPROM interna do próprio circuito integrado, de tal forma que uma vez programado ele pode trabalhar sozinho, sem necessidade de estar conectado ao microcomputador.

Para fazer o projeto de controle é necessário modelar cada um dos elementos envolvidos na malha do sistema. Assim, é necessário entender o que representam os blocos PWM e o conversor A/D para a modelagem do sistema.

#### 3.1 Modelamento do módulo PWM

A sigla PWM é o acrônimo de Pulse Width Modulation, que significa Modulação por Largura de Pulso, e é um bloco que fornece um sinal cujo valor médio é proporcional ao valor da contagem aplicada à entrada.

O Arduino Uno possui saídas PWM com frequência de 500 Hz (pinos 3, 9, 10, 11) e com frequência de 1000 Hz (pinos 5 e 6).

O valor máximo que pode ser aplicada na entrada do PWM é igual a 255 (equivalente a 8 bits).

Na figura 3 pode ser visto o resultado na saída do PWM em função do valor aplicado na entrada. Por exemplo, ao aplicar um valor igual a 127 na entrada, a largura de pulso (duty cycle) será igual à 50 por cento do ciclo total. Para um valor de 255, a largura de pulso será de 100 por cento. A tensão média de saída pode ser obtida como:  $v_{out} = (duty\ cycle/100) * V_{cc}$ .



Figura 3 – Característica de funcionamento do PWM

Fonte: os Autores (2017)

Por ter um registro interno mantendo a saída constante, o PWM será modelado como um ganho mais um segurador de ordem zero. Assim o ganho do PWM será igual ao valor médio de saída dividido pelo valor da contagem aplicado no registro do PWM. Isto é,  $K=V_o/(\text{valor do registro do PWM})$ . Um valor máximo no registro igual a 255 fornece 5V na saída, então  $K=5/255=19,6 \cdot 10^{-3}$ .

### 3.2 Modelo do conversor A/D

O conversor A/D possui 10 bits, tendo como resolução  $5/1024=4,88mV$ . Desta forma, o ganho do A/D é dado por  $G_{A/D}=1024/5$ .

Para ajustar o valor lido indicando a tensão na entrada, pode ser usada a relação:  $V_{dc}=V_{lido} \cdot 5/(1024)$ .

Se esta relação não for utilizada, será necessário acrescentar no modelo o ganho relativo ao A/D.

## 4 | USO DE UM CIRCUITO RC EMULANDO UM MOTOR CC

Muitas vezes o professor não dispõe de um modelo físico para testar as estratégias de controle, mas neste caso é possível utilizar um circuito RC emulando a planta física.

A grande vantagem é que este sistema pode ser levado para uma sala de aula teórica e os alunos podem testar sua estratégia de controle apenas alterando o programa do controlador.

Na figura 4 é mostrado o circuito RC acoplado ao Arduino Uno.

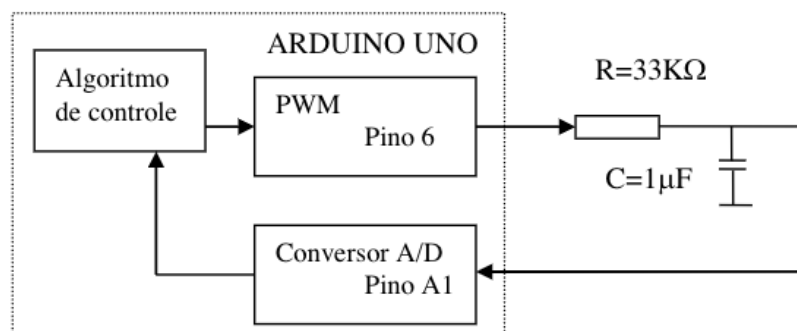


Figura 4 - Diagrama do sistema de controle com um circuito RC emulando um sistema de primeira ordem.

Fonte: os Autores (2017)

O Modelo do sistema é mostrado na figura 5

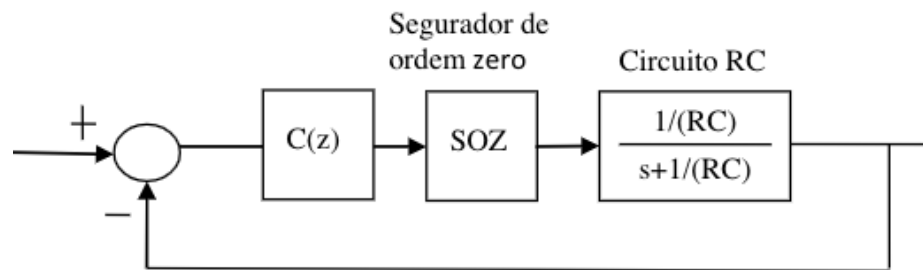


Figura 5 - Diagrama em blocos do sistema de controle

Fonte: os Autores (2017)

Neste artigo serão mostradas duas implementações de compensadores para o sistema de controle: uma com compensador proporcional e outra para o IMC (internal model control).

#### 4.1 Compensador proporcional

O compensador proporcional é implementado através de um programa em linguagem C. O programa básico a ser executado é o seguinte:

```
float vin= analogRead(1)* (5.0/1024.0); //ajusta a tensão lida entre 0 e 5V
float e=(ref - vin);
float u=K*e; // ganho proporcional
u=u*255.0/5.0; //ajusta tensão enviada para a saída
enviar "u" para saída
```

O comando `analogRead(pino)` é uma função do Arduino Uno que faz a leitura do conversor A/D, sendo o número da porta indicado na própria função (pino).

Para enviar o dado para a porta de saída (no caso o PWM), é usada a função `analogWrite(porta, dado)`, onde o pino de saída do PWM é indicado na porta, e o dado é enviado ao registro do PWM, definindo a largura do pulso.

Mas há uma limitação com relação ao que pode ser enviado para a saída. Como o PWM só aceita tensões positivas, e até o valor de 255, os valores que podem ser enviados estão na faixa entre 0 e 255. Assim é necessário acrescentar as seguintes linhas de código:

```
if (vout>255) {analogWrite(6, 255); vout=255;} else if (vout<0) {analogWrite(6, 0); vout=0;} else
{analogWrite(6, vout);}
```

O equivalente discreto da planta é calculado como  $G(z)$ , considerando tempo de amostragem  $T=1\text{ms}$ , como mostrado na equação 3.



$$G(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{G(s)}{1} \right\} = (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{30,3}{s(s + 30,3)} \right\} = \frac{0,02985}{z - 0,9702} \quad (3)$$

### Especificação do compensador proporcional

O compensador proporcional é representado por um ganho:  $C(z) = K$ .

Para este problema, é especificado que o sistema em malha fechada seja duas vezes mais rápido que o sistema em malha aberta. Isto é:  $t_{s5\%(MF)} = t_{s5\%(MA)} / 2$ .

Sendo  $t$  a constante de tempo e  $s$  o valor do pólo, o tempo de estabilização é dado por, (OGATA, 1998):  $t_{s(5\%)} = 3t = \frac{3}{s}$

Para o circuito RC (em malha aberta)  $t_{s(MA)} = 99ms$ . O valor desejado em malha fechada será  $t_{s(MF)} = 49,5ms$ .

O valor da constante de tempo em malha fechada será  $t = t_{s(MF)} / 3 = 49,5 / 3 = 16,5ms$ . A localização no plano S será dada por  $s = 1/t = 1/16,5ms = 60,6$ .

A relação de transformação do plano s para o plano z é dada por:  $z = e^{sT}$  × Sendo  $T = 1ms$ , para  $s = -60,6$  o valor de z será:  $z = 0,9414$ .

O polo em malha fechada é determinado pela equação característica, dada pela relação:  $1 + KG(z) = 0$ , cujo resultado é mostrado na equação 4.

$$z - 0,9702 + 0,02985.K = 0 \quad (4)$$

Para atender a especificação, a equação característica em malha fechada deverá resultar em um polo, como mostrado na equação 5.

$$z - 0,9414 = 0 \quad (5)$$

Comparando as equações 4 e 5, chega-se ao valor do ganho,  $k = 0,965$ .

## 4.2 Controle por modelo interno

As regras de sintonia IMC (*Internal Model Control*) têm se mostrado com características de desempenho e robustez aceitáveis para processos industriais, (CAMPOS & CAMPOS, 2014).

Na estrutura IMC uma cópia da planta é realimentada para a entrada, e é subtraída do sinal de saída (y), como mostrado na Figura 6. Esta configuração é denominada controle por modelo interno, pois um modelo da planta  $G_{INT}$  é colocado no laço de realimentação interno, ( $G_{INT} = G(z)$ ), (WOLOVICH, 1994).

Para uma planta de fase mínima, o compensador pode incluir o inverso da planta

mais um filtro, de forma que em malha fechada o equivalente resultante contenha apenas o termo do filtro. A estrutura do modelo interno é mostrada na figura 6.

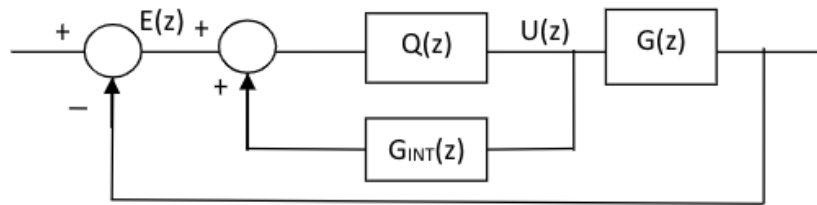


Figura 6 – controle por modelo interno

Fonte: os Autores (2017)

Deseja-se que o compensador tenha uma característica Proporcional-Integral, como mostrado na equação 6, para o período  $T=1ms$ .

$$G_{PI}(z) = \frac{Q(z)}{1 - Q(z)G_{INT}(z)} \quad (6)$$

$Q(z)$  é escolhido como sendo o inverso da planta vezes um polo e ganho, como mostrado na equação 7.

$$Q(z) = \frac{1}{G(z)} \frac{K}{z - a} \quad (7)$$

Assim o compensador denominado GPI possui a forma mostrada na equação 8.

$$G_{PI} = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(z - 0,9702)}{0,0197} \frac{K}{z - a - K} \quad (8)$$

Com visto no item anterior, para  $t_{s(MF)}=49,5ms$ , o polo em malha fechada deve estar em  $z=0,941$ . A função de transferência em malha fechada é dada pela equação 9.

$$G_{MF} = \frac{G_{PI}(z)G(z)}{1 + G_{PI}(z)G(z)} = \frac{K}{z - a} \quad (9)$$

Para ter comportamento integral, na equação  $G_{PI}$  impõe-se a condição  $a+K=1$  e para atender a resposta no tempo impõe-se  $a=0,941$ . Assim  $K=0,059$ .

A equação discreta a ser implementada no programa é mostrada na equação 10.

$$u_k = u_{k-1} + 2,994 * e_k - 2,91 * e_{k-1} \quad (10)$$

## 5 | RESULTADOS

A resposta do controlador proporcional é mostrada na figura 7. É possível notar que o tempo de estabilização,  $t_s$  16,5 ms, está dentro do especificado. O valor medido da saída resultou em 1,48V, possibilitando calcular o erro em regime prático como sendo igual a 1,52V. O erro em regime obtido pelo cálculo teórico resultou em 1,53V, confirmando a concordância entre teoria e prática.

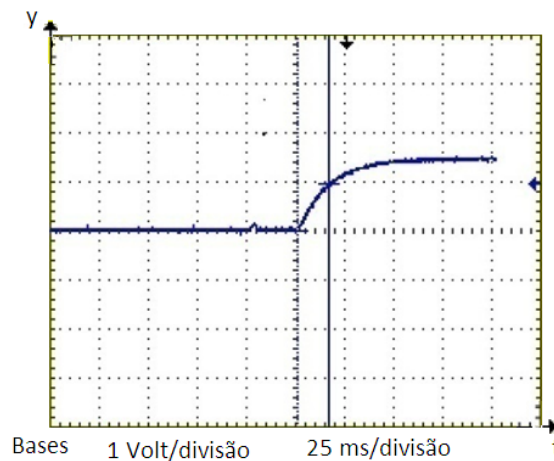


Figura 7 – Resposta temporal do compensador proporcional.

Fonte: os Autores (2017)

As respostas no tempo para o sistema IMC são mostradas nas figuras 8 e 9. Na figura 8, é possível ver que a constante de tempo do sistema compensado está dentro do especificado, aproximadamente  $t_s = 16,5ms$ .

Apesar da constante de tempo estar dentro do especificado, o sistema tem uma resposta mais lenta, como mostrado na figura 9, devido ao não cancelamento exato do polo da planta com o zero do compensador, resultando em um resíduo que deixa o sistema mais lento.

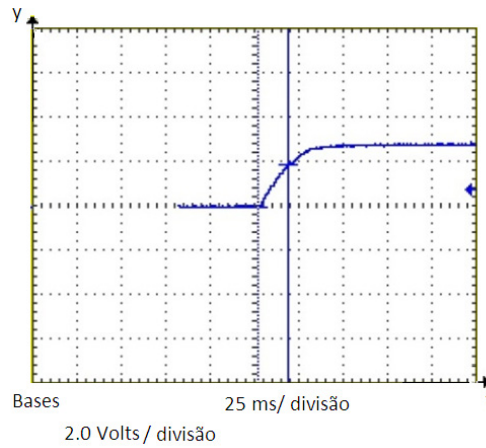


Figura 8 – Resposta temporal da estrutura IMC. Figura a: medição da constante de tempo.

Fonte: os Autores (2017)

Procurando entender o que poderia estar causando a diferença entre o modelo e o sistema real, foi medido o tempo de amostragem através da instrução millis() do Arduino Uno. Apesar de ter sido colocado um delay de  $1ms$ , o atraso real foi de  $3ms$ , diferente do qual foi feito o projeto.

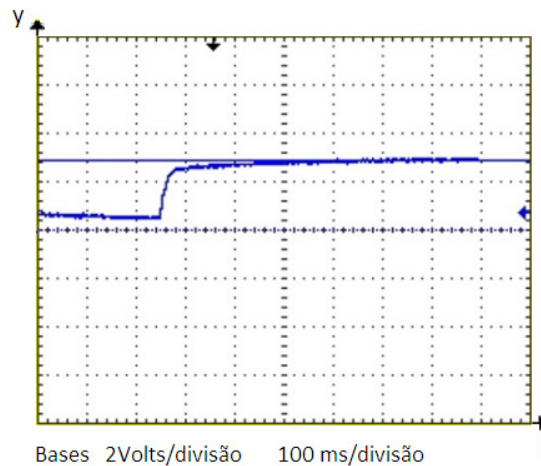


Figura 9 – Resposta temporal da estrutura IMC. Tempo de estabilização mais lento devido ao não cancelamento de polo e zero.

Fonte: os Autores (2017)

O projeto foi refeito para  $T=3ms$ , resultando no compensador mostrado na equação 11.

$$u_k = u_{k-1} + 1,9131 * e_k - 1,7475 * e_{k-1}$$

Este compensador foi testado e na figura 10 são mostradas as curvas de resposta para o novo compensador (período de amostragem de  $3ms$ ) e para o antigo

compensador (período de amostragem de  $1ms$ ). É possível notar que com o novo projeto para  $T=3ms$  o sistema comportou-se como o previsto. Estas curvas foram obtidas utilizando-se o Matlab para fazer a leitura em tempo real do sinal do Arduino Uno.

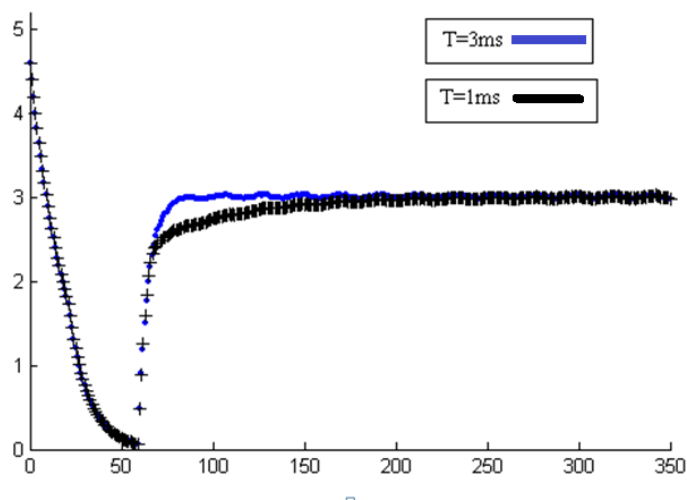


Figura 10 – Resposta temporal da estrutura IMC comparando o projeto para dois períodos de amostragem

Fonte: os Autores (2017)

## 6 | CONCLUSÕES

Neste artigo foi utilizada a plataforma Arduino Uno conectada a um circuito RC como auxílio didático para o ensino de controle digital.

Esta plataforma é bem simples de ser utilizada permitindo que o aluno, mesmo sem conhecimento de hardware de microcontroladores, possa utilizá-la rapidamente.

Neste artigo foram mostradas duas técnicas de projeto de compensadores que podem ser facilmente testadas, auxiliando no entendimento dos conceitos de sistemas de controle: a) Controle Proporcional e b) Controle por Modelo Interno. Estas técnicas foram implementadas e os resultados práticos obtidos foram condizentes com a teoria.

Foi possível notar que devido ao não conhecimento exato do período de amostragem, mesmo atendendo algumas especificações, o sistema apresentou uma resposta não adequada. Após o projeto ser refeito, utilizando-se o período de amostragem real, o sistema comportou-se segundo as especificações.

## REFERÊNCIAS

ARDUINO1. Disponível em <<https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>> acesso em 19/05/17

ARDUINO2. Disponível em <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>> acesso em 19/05/17

BENCOMO, S. D (2004). **Control learning: present and future**. Annual Reviews in Control, v. 28, n.



1, p. 115-136.

CAMPOS, P.R.B e CAMPOS, C.A.B. **Sintonia de controladores para processos didáticos sem atraso de transporte**, Anais: XLII – Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Juiz de Fora: UFJF, 2014. Disponível em <<http://198.136.59.239/~abengeorg/cobenge-2014/Artigos/128518.pdf>>

FEISEL, L. D. and ROSA, A. J. (2005). **The role of the laboratory in undergraduate engineering education**, Journal of Engineering Education 94(1): 121–130.

FISHER, P. D., FAIRWEATHE, J. S. and HASTON, L. A. (2000). **Establishing learning objectives and assessing outcomes in engineering service courses**, 30th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 3a ed., Rio de Janeiro: Editora Prentice Hall do Brasil, 1998.

WOLOVICH, W.A. **Automatic Control Systems**, Hartcourt Brace College Publishers, 1994.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-458-0

