



As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

Henrique Ajuz Holzmann
(Organizador)

As Engenharias frente a Sociedade, a
Economia e o Meio Ambiente 3

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^a Dr^a 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^a Dr^a 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^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a 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^a Dr^a 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^a Dr^a 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.^a Dr.^a 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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E57	As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3 [recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-432-0 DOI 10.22533/at.ed.320192506 1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Série. CDD 658.5
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e águas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compendio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio Maria do Carmo de Andrade Nono José Vitor Cândido de Souza Sergio Luiz Mineiro Daniel Alessandro Nono	
DOI 10.22533/at.ed.3201925061	
CAPÍTULO 2	10
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos Daniel Araújo Farias de Melo Marinésio Pinheiro de Lima Tiago de Freitas Viana Igor Fernandes Gomes Leonardo José do Nascimento Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.3201925062	
CAPÍTULO 3	26
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.3201925063	
CAPÍTULO 4	42
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo Aline Castilho Rodrigues Andres Cuña Nestor Tancredi Eduardo Mendez Heide Heloise Bernardi Mauricio Ribeiro Baldan	
DOI 10.22533/at.ed.3201925064	
CAPÍTULO 5	55
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado Antônio Viana da Fonseca Eduardo Fortunato Daniela Raquel Ferreira Coelho	
DOI 10.22533/at.ed.3201925065	

CAPÍTULO 6	71
CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA	
Ingrid Ariani Belineli Barbosa	
Heide Heloise Bernardi	
William Marcos Muniz Menezes	
DOI 10.22533/at.ed.3201925066	
CAPÍTULO 7	80
ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM	
Luís Henrique Pires da Silva	
Alex Sander Chaves da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.3201925067	
CAPÍTULO 8	92
ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA	
Eduardo Pires Bonhin	
Sarah David Müzel	
Marcel Yuzo Kondo	
Lúcia de Almeida Ribeiro	
José Vitor Candido de Souza	
Marcos Valério Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.3201925068	
CAPÍTULO 9	100
CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117	
Leonardo de Souza Coutinho	
Alexandre Alvarenga Palmeira	
DOI 10.22533/at.ed.3201925069	
CAPÍTULO 10	111
MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS	
Filipi José Arantes Lemos	
João Mario Mendes de Freitas	
DOI 10.22533/at.ed.32019250610	
CAPÍTULO 11	127
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES	
Jamile Maria Araujo Tavares	
Rejane Martins Fernandes Canha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250611	
CAPÍTULO 12	142
ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM	
Eduardo Dal Piva Schuch	
Magaiver Gabriel Lamp	
Conrado Mendes Morais	
Ângela Beatrice Dewes Moura	
DOI 10.22533/at.ed.32019250612	

CAPÍTULO 13	153
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
DOI 10.22533/at.ed.32019250613	
CAPÍTULO 14	156
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
DOI 10.22533/at.ed.32019250614	
CAPÍTULO 15	168
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
DOI 10.22533/at.ed.32019250615	
CAPÍTULO 16	183
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250616	
CAPÍTULO 17	198
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.32019250617	
CAPÍTULO 18	207
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
DOI 10.22533/at.ed.32019250618	

CAPÍTULO 19	215
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO	
Rosberguer de Almeida Camargo	
Mauren Costa da Silva	
Rafael Beltrame	
Darci Alberto Gatto	
Antônio Carlos da Silva Ramos	
DOI 10.22533/at.ed.32019250619	
CAPÍTULO 20	223
AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL	
Giovanni Polette Dalla Libera	
Victor Moreira Leão	
Vitor Augusto de Sousa	
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza	
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira	
Marcelo Eduardo de Oliveira	
Adriano Rogério Bruno Tech	
DOI 10.22533/at.ed.32019250620	
CAPÍTULO 21	230
CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	
Lenon Diniz Seixas	
Diego Solak Castanho	
Hugo Valadares Siqueira	
Fernanda Cristina Corrêa	
DOI 10.22533/at.ed.32019250621	
CAPÍTULO 22	243
CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC	
Luiz Otávio Limurci dos Santos	
Luiz Antonio Maccari Junior	
DOI 10.22533/at.ed.32019250622	
CAPÍTULO 23	261
PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6	
Marcos José de Moraes Filho	
Luciano Coutinho Gomes	
Darizon Alves de Andrade	
Josemar Alves dos Santos Junior	
Wanberton Gabriel de Souza	
Cássio Alves de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.32019250623	

CAPÍTULO 24	275
ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROME CÂNICOS	
Pedro Henrique Aquino Barra Arnaldo José Pereira Rosentino Junior Antônio Carlos Delaiba	
DOI 10.22533/at.ed.32019250624	
CAPÍTULO 25	287
PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA	
Vitor Hörbe Pereira Da Costa Antônio Flavio Licarião Nogueira Leonardo José Amador Salas Maldonado	
DOI 10.22533/at.ed.32019250625	
CAPÍTULO 26	294
SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS	
Guilherme Brasil Pintarelli Afrânio de Castro Antonio Jr. Raul Guedert Sandra Cossul Daniela Ota Hisayasu Suzuki	
DOI 10.22533/at.ed.32019250626	
CAPÍTULO 27	307
SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA	
Giovani Formaggio Mateus Ricardo Barroso Leite	
DOI 10.22533/at.ed.32019250627	
CAPÍTULO 28	322
SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4	
Jobson De Araújo Nascimento José Moraes Gurgel Neto Alexsandro Aleixo Pereira da Silva Regina Maria de Lima Neta	
DOI 10.22533/at.ed.32019250628	
CAPÍTULO 29	333
ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO	
Rideci Farias Tiago Matias Lino Haroldo da Silva Paranhos Itamar de Souza Bezerra Ranieri Araújo Farias Dias Alexsandra Maiberg Hausser	
DOI 10.22533/at.ed.32019250629	
SOBRE O ORGANIZADOR	346

MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM

Gabriel Queiroz

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Elétrica
Uberlândia - MG

Marcelo Barros de Almeida

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Elétrica
Uberlândia - MG

Márcio Jose da Cunha

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Elétrica
Uberlândia - MG

ABSTRACT: The aim of this paper is to present a strategy for modeling a heating process where it is necessary to follow specific temperature slopes with focus on mashing tuns for nano brewers. In this situation, the heating element is generally represented by electric heaters or gas, both on/off, demanding a specific strategy for delivering the amount of power calculated by the PID controller, also described and analyzed in this work. For creating the model, data were empirically obtained by heating proportional volumes of water using an electric boiler.

KEYWORDS: Brewing controller, modeling, PID

RESUMO: O objetivo deste artigo é apresentar uma estratégia capaz de realizar a modelagem de um processo de aquecimento e manutenção de rampas de temperatura com foco em tinas de brassagem de nanocervejarias. Nessas situações, o elemento de aquecimento é geralmente representado por resistências elétricas ou chamas a gás, ambos do tipo ligado/desligado, demandando também uma estratégia específica para entrega da potência calculada pelo controlador PID, descrita e analisada neste trabalho. Foram empregados dados obtidos empiricamente através do aquecimento de volumes proporcionais de água e ebulidores elétricos para a criação do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Controlador de brassagem, modelagem, PID

1 | INTRODUÇÃO

Durante o processo de brassagens, realizados em cervejarias de qualquer porte, é preciso executar uma série crescente de rampas controladas de temperatura, atuando nas diversas fases do processo de extração da maltose [1]. Ações enzimáticas bem controladas, em determinadas temperaturas e faixas de pH, promovem uma boa sacarificação do mostro, aumentando a eficiência do processo [2]. Assim, é importante a precisão no controle das rampas de temperaturas nas diversas fases, sendo uma aplicação adequada para controle automatizado.

A proposta deste trabalho é apresentar o

processo de modelagem de um controlador PID digital [3] assim como uma proposta de discretização da saída do PID para acionamento de um elemento de aquecimento do tipo liga- do/desligado (ou *on/off*, em Inglês) visando o controle das rampas de temperatura em processo cervejeiros.

Trabalhos similares podem ser encontrados na literatura. Por exemplo, em [4], é discutido um controlador microprocessador de baixo custo, também empregando estratégias com PID. No entanto, este trabalho não menciona formas de modelagem, como a descrita aqui, além de possuir uma estratégia de acionamento do elemento de aquecimento baseado em bandas de erro, mantendo, no fundo um controle puramente *on/off*.

Discussão parecida é apresentada em [5], onde são propostos três algoritmos de controle PID e o uso de um processador digital de sinal (DSP). Não são discutidas formas de aplicação da saída de controle no elemento de aquecimento, sendo apresentados apenas dados de simulação, o que sai do escopo deste presente trabalho.

Finalmente, trabalhos com maior corpo podem ser encontrados nas referências [6], [7], com um resultado bastante aplicado na execução de múltiplas rampas de temperatura. Um controle do tipo *Bang-Bang*, onde o sistema deve sair de um ponto de operação (*set point*) para outro com a menor resposta temporal possível é apresentado. A este modelo é acoplado um modelo preditivo de controle, gerando uma estratégia denominada pelos autores de *Compound Optimal Control*, com promessas de menor *overshoot* e tempo de acomodação curto. Este artigo, apesar de não discutir também a forma de entrega de potência, apresenta-se como uma referência futura importante para este trabalho.

2 | MODELO EMPÍRICO DE TINA DE BRASSAGEM

Para o desenvolvimento do modelo, será usada uma tina pequena com água e com volume de quatro litros, aquecida por uma resistência elétrica com potência de 1kW. Equipamentos comerciais apresentam relações de volume/potência (4L/1kW) similares, sendo essa a razão da escolha destes valores.

É sabido que, no processo real, a existência de grãos embebidos na água (mostura) muda a dinâmica do processo por apresentar uma capacidade térmica diferente. Também é possível que a forma de aquecimento utilizada seja diferente, podendo ser um controle automatizado de gás do tipo liga/desliga ou uma caldeira. No entanto, isto não invalida a estratégia proposta, uma vez que basta refazer o experimento de aquisição de valores para posterior modelagem do PID e talvez realizar pequenas mudanças na forma proposta de entrega de potência.

Um ponto importante nessa modelagem é a uniformização da temperatura da mistura. Durante todo o ensaio, o líquido é misturado, deixando sempre a temperatura uniforme e evitando aquecimentos exagerados para volumes próximos do elemento

de aquecimento. Em processos reais isso também é sempre feito, evitando que o malte perto do elemento de aquecimento seja queimado [2]. Neste modelo, a agitação será feita de forma manual.

O sistema usado para coleta de dados é apresentado na Figura 1, composto de um elemento de aquecimento representado por uma resistência elétrica de 1kW de potência controlada por um relé. Um sensor de temperatura DS18B20 [8], da Maxim, também foi empregado, com $\pm 0.5^\circ \text{C}$ de precisão na faixa de -10°C to $+85^\circ \text{C}$. Tanto o sensor quanto o relé foram interligados em um microcontrolador ATmega328P, via uma placa Arduino Uno [9].

Foi escolhida a rampa de 62°C para a análise e modelagem do sistema. A escolha foi baseada no processo cervejeiro, onde é comum o emprego de rampas por volta de 62°C para a ação da proteína beta amilase, assim com rampas de 68° (proteína alfa amilase) e 50°C (parada proteica) [2].

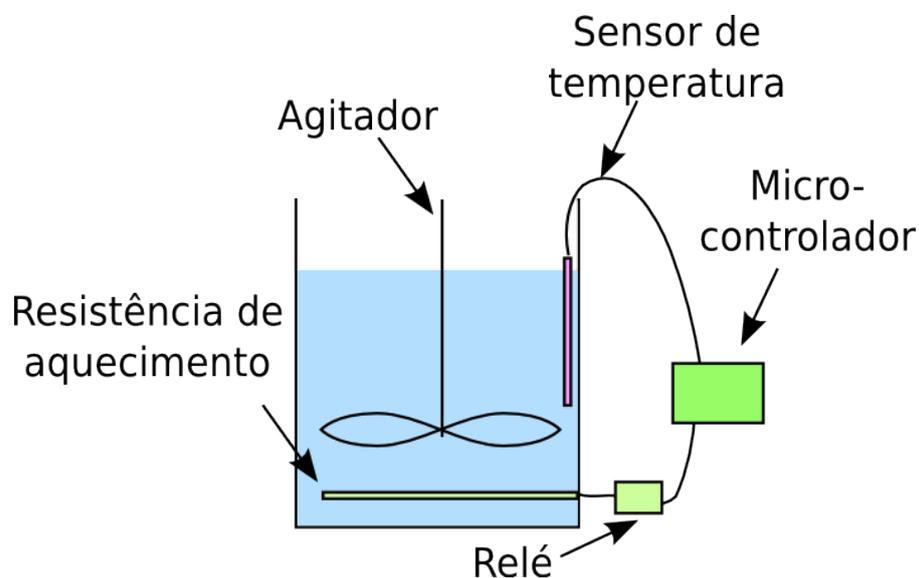


Fig. 1: Protótipo para coleta de dados.

Nesse sistema, foi definida uma taxa de amostragem de temperatura de um segundo, adequada para a dinâmica do processo. O microcontrolador realizava então a programação da rampa, ligando a resistência através do relé até que a temperatura fosse superior ao valor da rampa. Nesse momento, o relé era desligado, criando uma curva de temperatura em resposta ao degrau de aquecimento (Figura 2).

Os dados provenientes da temperatura amostrada e do estado do relé (ligado ou não) eram então registrados, sendo a base para a identificação e modelagem posterior do PID. No ensaio realizado foram coletadas 364 amostras.

3 | MODELAGEM PID

Apartir dos resultados recolhidos na amostragem da rampa de 62°C , foi empregada a ferramenta Matlab para auxiliar na extração do modelo do sistema representativo da

rampa de temperatura e no posterior cálculo do controlador PID.

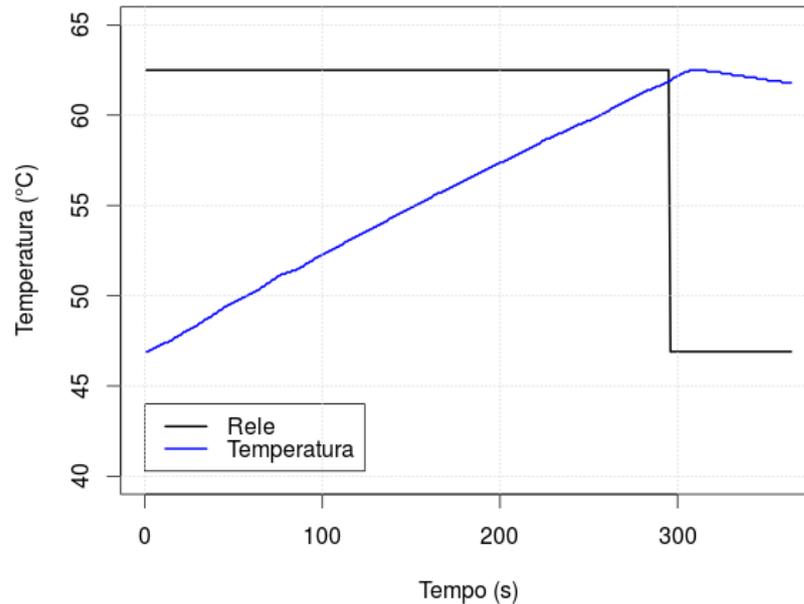


Fig. 2: Dados obtidos (azul) em resposta ao acionamento do relé (preto)

Os dados foram armazenados em um arquivo texto com duas colunas, onde a primeira coluna é o estado do relé (0 ou 1, para ligado ou desligado, respectivamente) e a segunda é o valor da temperatura. Essas colunas são separadas por ponto e vírgula.

É possível obter um modelo do sistema (Listagem 1), cuja função de transferência é dada na Equação 1. No caso, foi estimada uma função com dois pólos e um zero após verificação empírica de que ordens maiores não necessariamente geravam resultados melhores.

O resultado obtido pode ser contrastado com os dados originais (Figura 3), evidenciando um ajuste de 94,66% da função gerada aos dados amostrados.

```
dados = dlmread('dados.txt',';')
x = dados(:,1)
y = dados(:,2)
sysdata = iddata(y,x,1)
sys = tfest(sysdata,2,1,nan)
compare(sysdata,sys)
```

Listagem 1: Estimação da função de transferência

$$sys(s) = e^{-12s} \frac{-0,2559s + 0,04376}{s^2 + 0,5326s + 0,0002843} \quad (1)$$

A Equação 1 pode ser simplificada, evitando o termo exponencial e gerando apenas uma expressão com dois polinômios para numerador e denominador. Isso

facilita a discretização do sistema através da transformada Z [3] e também criação de equações diferenças. Vale lembrar que essa exponencial é geralmente a representação de um tempo morto existente no sistema.

A simplificação pode ser realizada através da aplicação do “Método dos aproximantes de Padé” [10], como apresentado na Listagem 2. A Equação 2 é o resultado desta operação e o valor do novo ajuste, entre os dados e o sistema aproximado por Padé, é de 95,24% (ver Figura 4). Esta nova expressão será a utilizada deste ponto em diante.

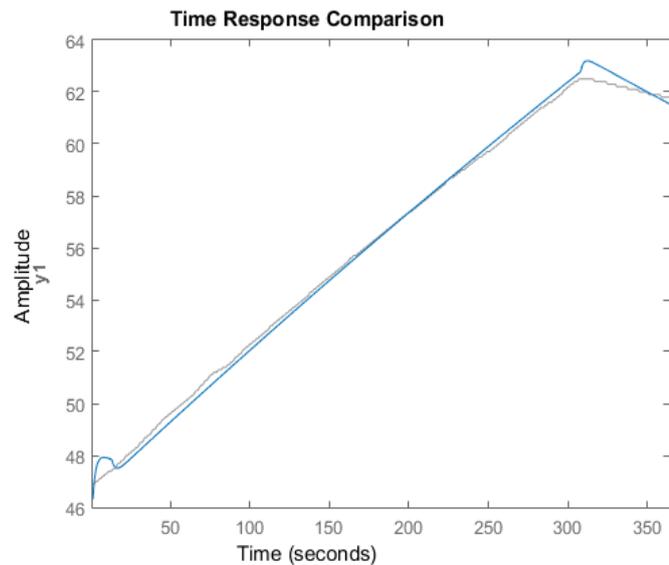


Fig. 3: Função de transferência estimada pelo Matlab em azul e dados originais, em vermelho

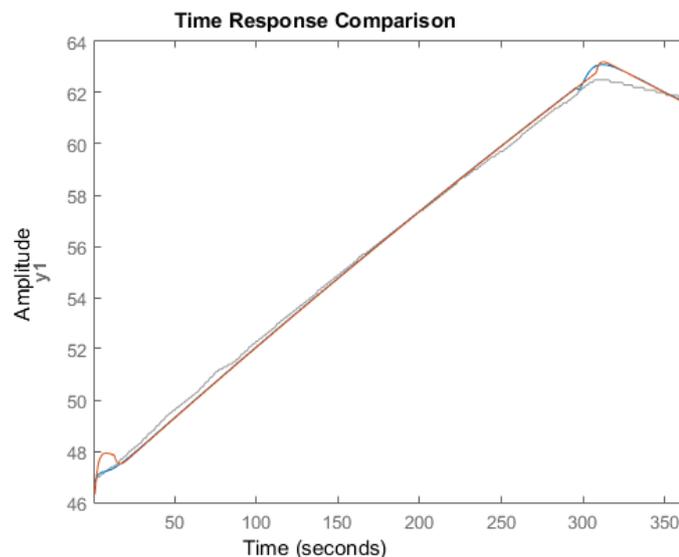


Fig. 4: Comparação entre o sistema modelado com e sem aproximação por Padé

```
sys_pade = pade(tf(sys),1)
compare(sysdata, sys_pade, sys)
```

Listagem 2: Aproximação por Padé

$$\text{sys}_p(s) = \frac{0,2559s^2 - 0,08642s + 0,007294}{s^3 + 0,6992s^2 + 0,08904s + 0,00004738} \quad (2)$$

Com o sistema devidamente representado, é possível realizar a definição dos valores do PID. O Matlab possui uma ferramenta denominada “pidtool” capaz de gerar as constantes proporcionais (k_p), derivativas (k_d) e integrais (k_i). O resultado do emprego dessa ferramenta é apresentado na resposta ao degrau presente na Figura 5, com valores $k_p = 0,0561$, $k_i = 0,0000568$ e $k_d = 0$. Esta resposta apresenta como inconveniente um tempo demasiadamente longo para acomodação do valor. Por esta razão, decidiu-se realizar uma sintonia manual, com o emprego da ferramenta “PID Tune”, também presente no Matlab. Com a ferramenta PID Tune é possível alterar manualmente as configurações do sistema, como o tempo de subida, tempo de acomodação, overshoot, etc.

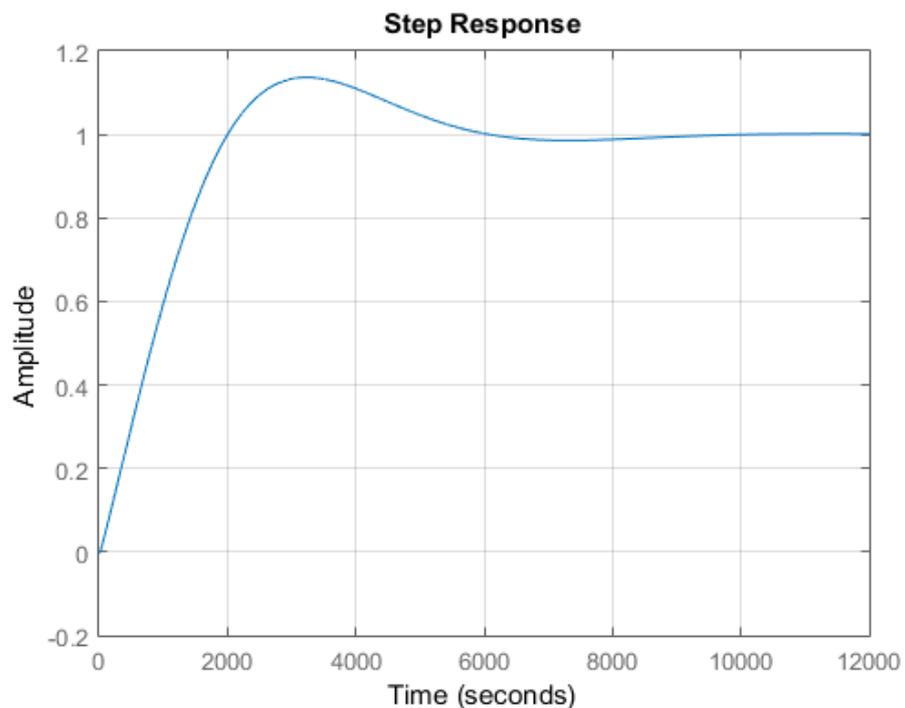


Fig. 5: Resposta ao degrau para o PID estimado automaticamente pelo Matlab

Por tentativas sucessivas foi obtido um conjunto mais adequado para o sistema a ser controlado, com as constantes $K_p = 0,4$, $K_i = 0,001$ e k_d tempo de amostragem de um segundo ($T_s = 1$). Como resultado, a nova resposta ao degrau pode ser observada na Figura 6, com um tempo de acomodação menor. A Equação 3 representa esse PID, já em Z. Com o PID projetado, obtê-lo em Z é um processo simples no Matlab, através do emprego da expressão $c2d(tf(pid), 1)$, sendo “pid” o PID projetado e 1 a taxa de amostragem.

$$PID(z) = 0,4 + \frac{0,001}{z - 1} \quad (3)$$

Apenas para referência, as Figuras 5 e 6 podem ser levantadas com o emprego das Listagens 3 e 4.

```
ctrl = pid(0.0561,5.68e-05)
pid_fb = feedback(ctrl*sys_pade,1)
opt = stepDataOptions('StepAmplitude',65);
step(pid_fb,opt)
```

Listagem 3: Resposta ao degrau para PID obtido automaticamente

```
ctrl = pid(0.4,0.001)
pid_fb = feedback(ctrl*sys_pade,1)
opt = stepDataOptions('StepAmplitude',65);
step(pid_fb,opt)
```

Listagem 4: Resposta ao degrau para PID manualmente

Com o controlador definido, é preciso transformar o seu valor de saída, um número real, em um modo de acionamento do elemento de aquecimento (no caso, a resistência *on/off*). O uso de modulação por largura de pulso (PWM) é relativamente comum em situações similares [3]. No entanto, a natureza eletromecânica do relé impede que exista um chaveamento em taxa elevada, o que levaria a um desgaste prematuro desse elemento.

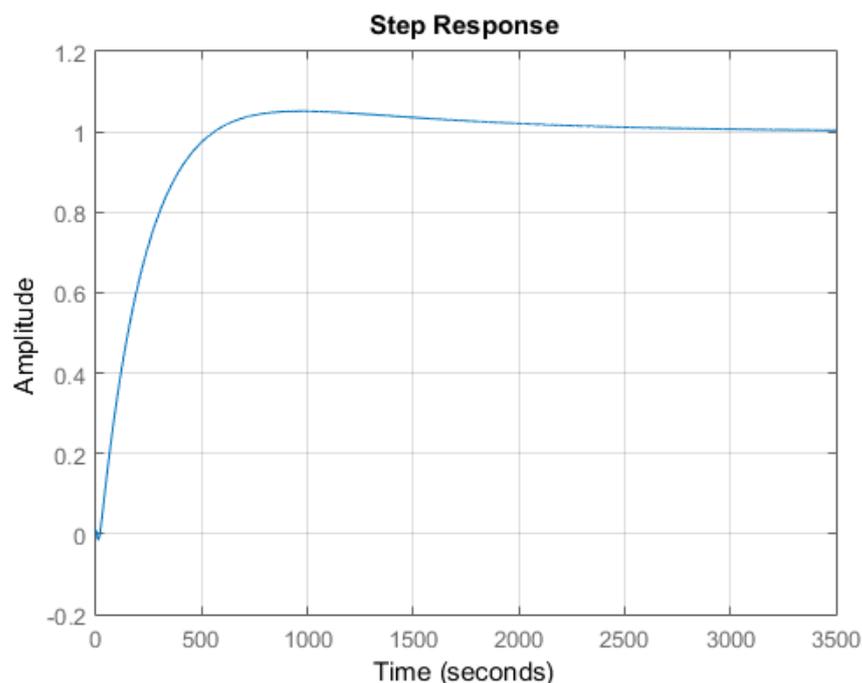


Fig. 6: Resposta ao degrau para o PID estimado manualmente

Para contornar esse problema, foi criado um sistema de entrega de 10 níveis de potência por meio de um PWM lento, com ciclos de 10 segundos. Também foi utilizado um relé de estado sólido, evitando mecanismos eletromecânicos, ambos descritos na próxima seção.

4 | MODELAGEM PWM

O sistema proposto para implementação do PWM possui 10 níveis de potência, com um ciclo de 10 segundos. É empregado também um relé de estado sólido da Fitek [11] com chaveamento programado apenas para pontos de tensão igual a zero, resultando em maior proteção e vida útil dos elementos envolvidos.

Os níveis de potência estão apresentados na Figura 7. Estes níveis foram criados para permitir um aumento gradual da potência entregue, em incrementos de décimos de unidade, sempre aproximando o valor do nível para o múltiplo inteiro mais próximo de estados em 1 (ligado) ou 0 (desligado). Por exemplo, uma saída do controlador entre 0 e 0,1 ativa o nível um de potência, gerando um segundo de acionamento da resistência contra nove segundos com a resistência desligada. No nível 9, com saída do controlador entre 0,9 e 1, por sua vez, a resistência ficaria ligada 90% do tempo (nove segundos), com apenas um segundo desligada.

Um aspecto interessante que precisa ser evidenciado é que, exceto quando a saída do controlador é negativa, não existe nenhum nível onde o sistema fica o tempo inteiro desligado. Isso se deve ao fato de que o sistema perde calor para o meio, sendo necessário um nível mínimo de aquecimento. Dessa forma, a discretização da saída do controlador se torna possível.

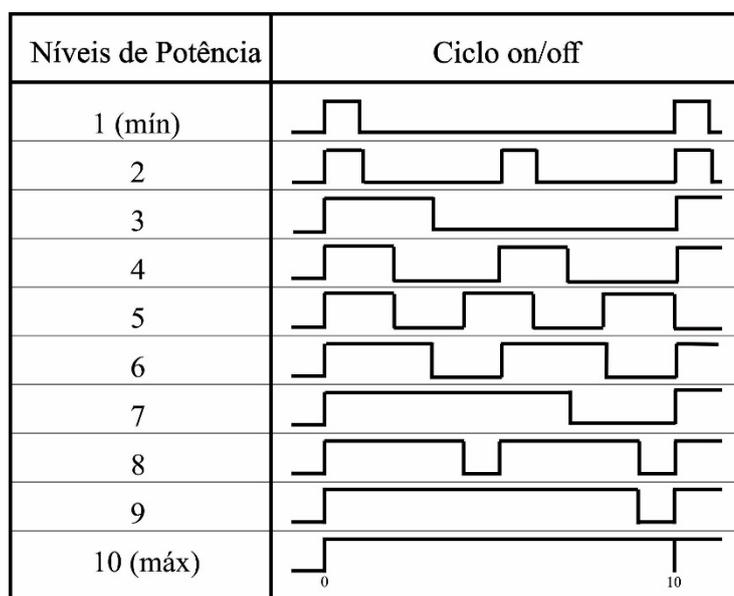


Fig. 7: Níveis de potência usados para o PWM

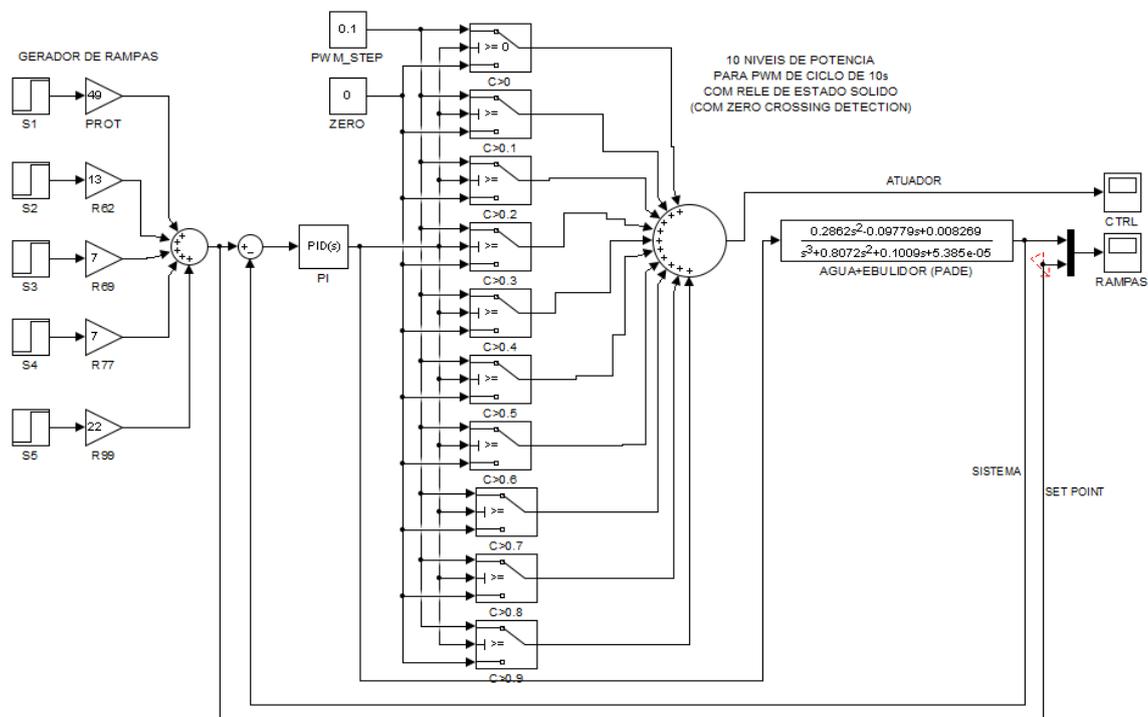


Fig. 8: Simulação do esquema empregado para PWM no Simulink

Como o sistema controlado tem inércia suficiente, é aceitável a alteração do ciclo a cada 10 segundos.

5 | SIMULAÇÃO DE SISTEMA NO SIMULINK

Para a análise e melhor entendimento de todo o processo desenvolvido, foi realizada também uma simulação do modelo do sistema mais controlador e PWM através do Simulink, com a estratégia utilizada apresentada via Figura 8. Os resultados de controle, mesmo em rampas diferentes da originalmente utilizada, foram satisfatórios, como pode ser observado nas Figuras 9 e 10.

No caso, foram criadas cinco rampas de temperatura (49°C, 62°C, 69°C, 77°C e 98°C) para validação do controlador, indicadas em rosa na Figura 9. A resposta do sistema controlado é dada pela curva em amarelo. É possível notar que o sistema responde melhor perto da temperatura da modelagem, com menor *overshoot* e acomodação mais rápida. Isto sugere que o sistema pode ser melhorado ou parametrizado de forma diferente para operar em outras rampas de temperatura com a mesma eficácia.

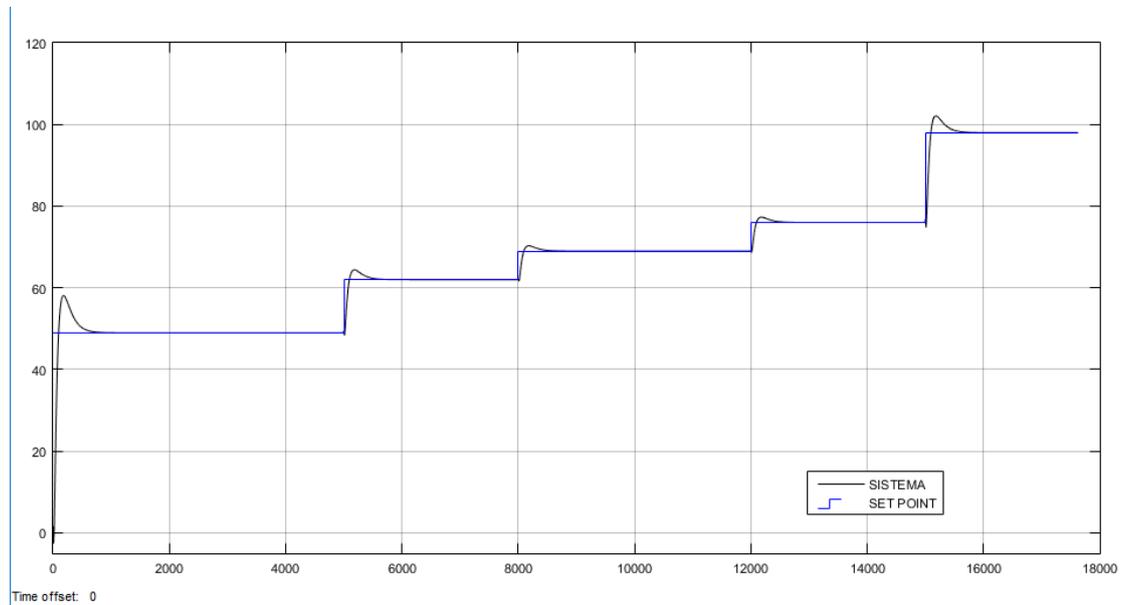


Fig. 9: Set points das cinco rampas (em amarelo) testadas e as respectivas reações do sistema aos novos set points (em rosa)

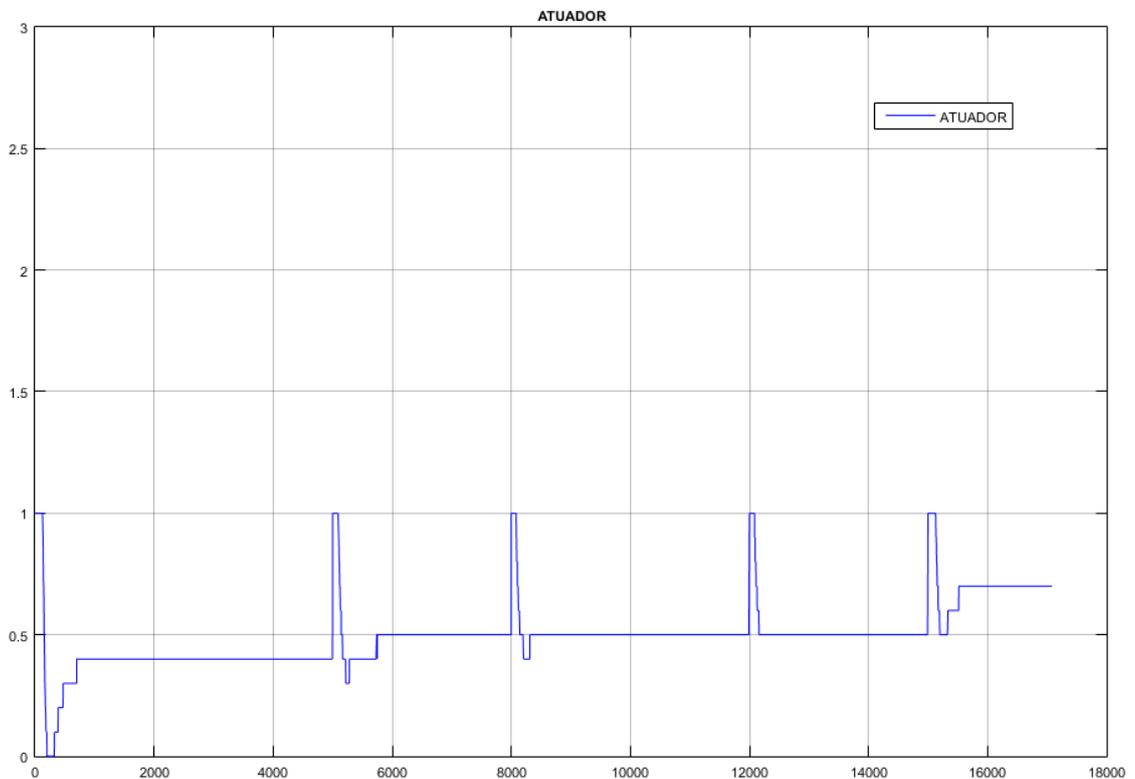


Fig. 10: Gráfico do atuador no tempo, ligando e desligando conforme as mudanças do sistema

A entrega de potência, nos seus níveis discretizados, pode ser visualizada através da Figura 10. Em toda mudança de rampa o sistema reage com a abertura total da ação de controle (resistência o tempo toda ligada) por algumas dezenas de segundos, permitindo a rápida elevação da temperatura. A aproximação do valor da rampa gera uma diminuição da potência entregue, como previsto para um sistema baseado em realimentação do erro.

6 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma estratégia de modelagem de dispositivo para controle de rampas de temperatura, tipicamente encontradas em tinas de brassagem de nano- cervejarias. Após a modelagem do sistema e da criação de uma estratégia de entrega de potência de dez níveis para um elemento de aquecimento, o sistema foi simulado. Os resultados obtidos demonstram a capacidade de controle do sistema proposto, com pequeno *overshoot* e baixo tempo de acomodação.

7 | AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à UFU que, através do programa de Jovens Talentos, permitiu a realização desse trabalho. Também é importante agradecer ao time do LASEC (Laboratório de Sistemas Eletrônicos e Controle), parte do curso de Controle e Automação.

REFERÊNCIAS

BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A. Cap 1 ao 6. in: BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A., **Brewing: Science and Practice**. Cambridge, England, 2004. p. 1-225.

MAXIM INTEGRATED. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**. [folha de dados]. 19-7487. 5. rev., San Jose (EUA): Maxim Integrated Products Inc., set. 2018. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 20 abril 2016.

FOTEK. **SSR Series DC to AC Solid State Relay**. [folha de dados]. China: FOTEK Products Inc., 2019. Disponível em: <<http://www.fotek.com.hk/solid/SSR-1.htm>>. Acesso em: 20 abril 2016.

YANLI, Gao; DI, Liu; HAIYING, Zhang. Beer fermentation temperature control system based on DSP. **IEEE 2011 10th International Conference On Electronic Measurement & Instruments**, Chengdu (China), v. 1, p.274-277, ago. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICEMI.2011.6037730>>. Acesso em: 20 abril 2016.

SHANG, Ji-liang; DOU, Xiu-hua; WEI, Yu. Application study of optimal control for beer saccharification temperature. **2008 IEEE International Conference On Automation And Logistics**, Qingdao (China), v. 1, p.1750-1753, set. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636439>>. Acesso em: 20 abril 2016.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Tradução por Heloísa Coimbra de Souza. 5ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

WEEKS, M. **Arduino controlled brewing**, in Southeast Com. 2015. p. 1–5.

Projeto arduino. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>

BARTH, R. **The Chemistry of Beer: the science in the suds**. 1ª Ed. New Jersey (EUA): Wiley, 2013. 352 p.

BOCK R, K.; KRISCHER, W. **The Data Analysis Briefbook**. 2ª Ed. Berlim: Springer, 1998. 181 p.

JILIANG, Shang; WEI, Yu; DEXIN, Gao. Study of Compound Optimal Control for Beer Saccharification Temperature. **2007 Chinese Control Conference**, Hunan (China), v. 1, p.356-359, jul. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/chicc.2006.4346790>>. Acesso em: 20 abril 2016.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-432-0

