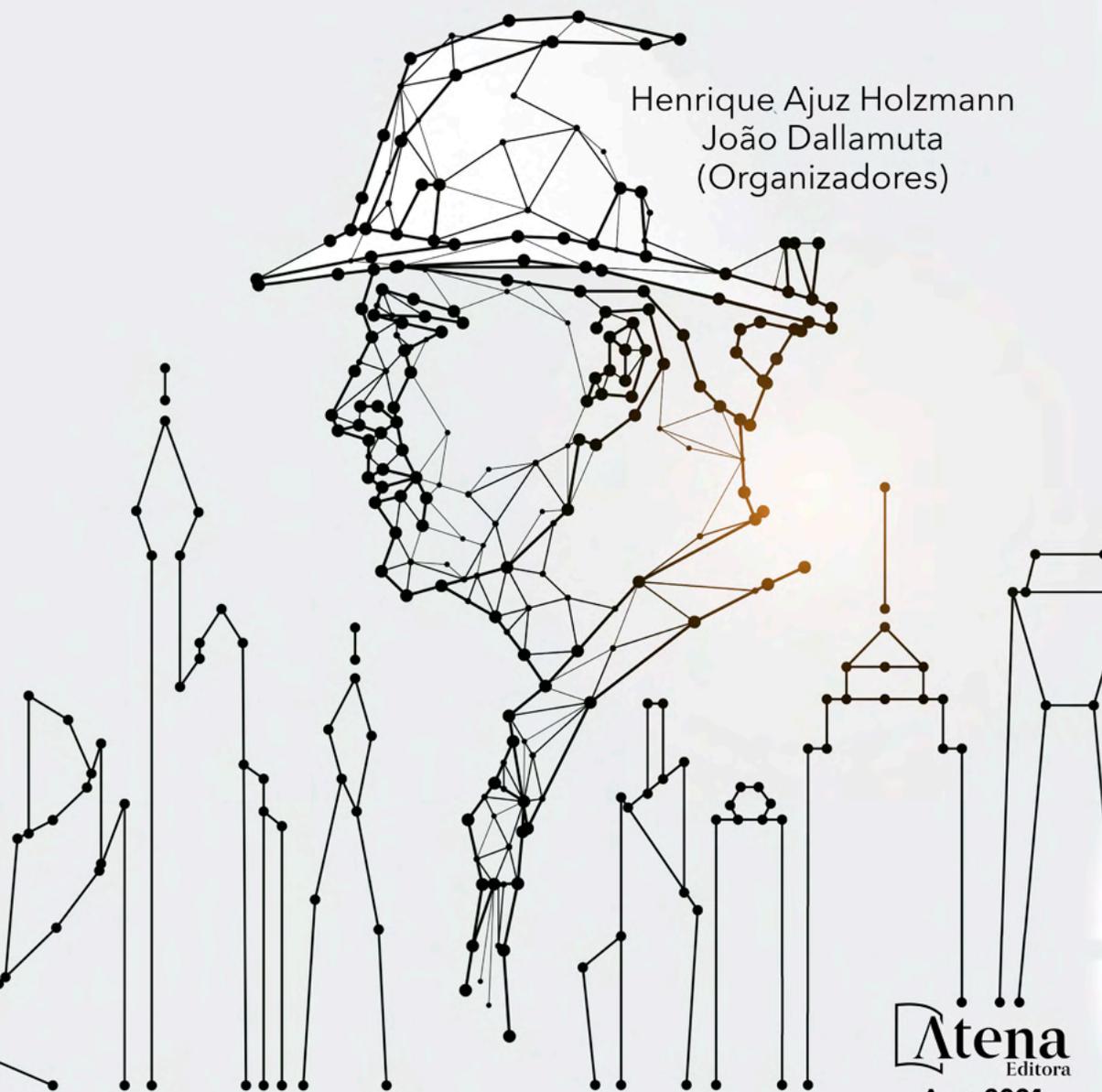


# Engenharias:

da genialidade à profissão e  
seu desenvolvimento

# 2

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)



**Atena**  
Editora

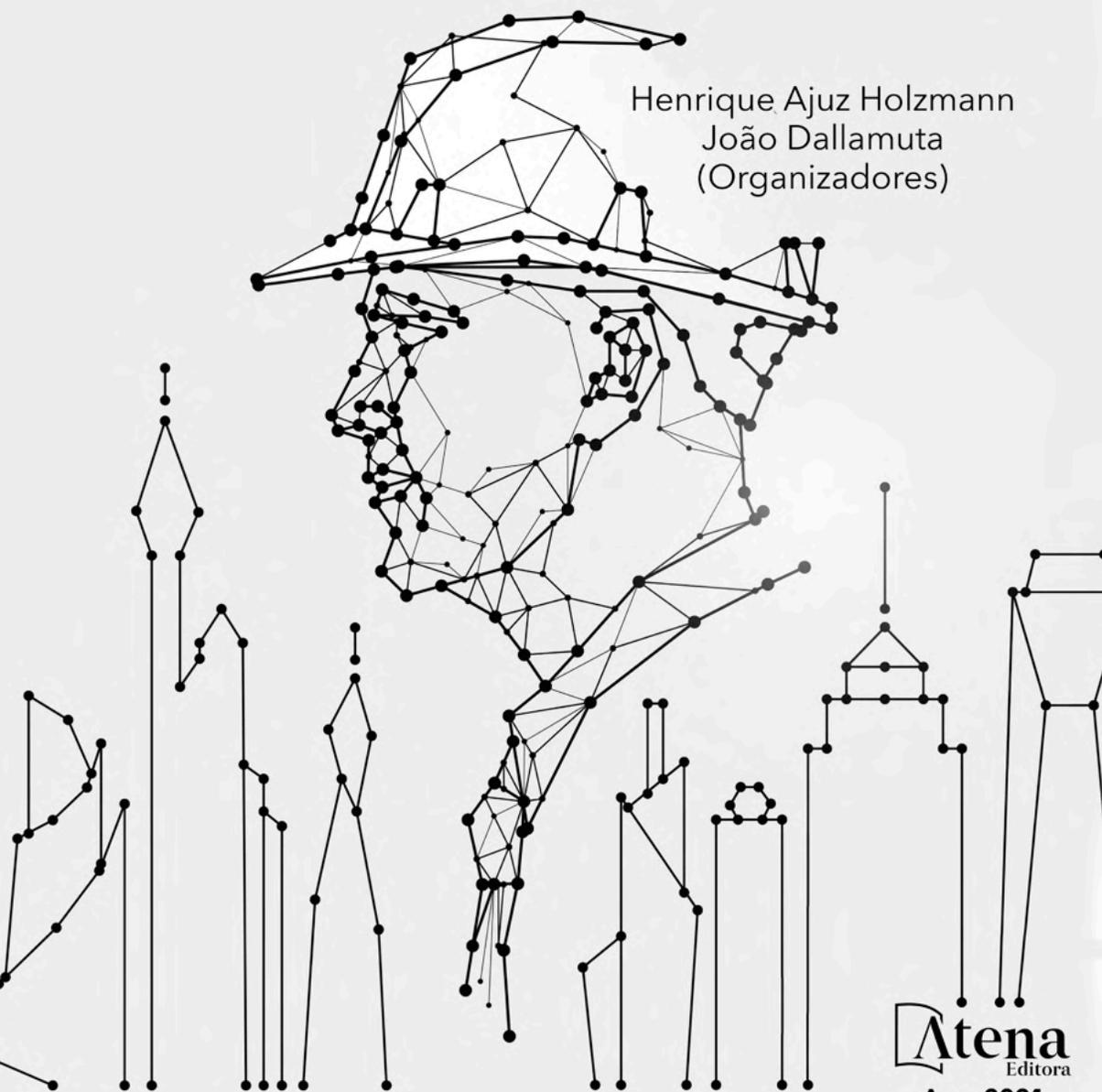
Ano 2021

# Engenharias:

da genialidade à profissão e  
seu desenvolvimento

# 2

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)



**Atena**  
Editora

Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

## Engenharias: da genialidade à profissão e seu desenvolvimento 2

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Bruno Oliveira  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia: da genialidade à profissão e seu desenvolvimento 2 / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2020.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-65-5983-624-6  
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.246211811>

1. Engenharia. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.  
CDD 620

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

## APRESENTAÇÃO

O ramo das engenharias veem ganhando cada vez mais espaço no decorrer dos anos, sendo hoje um dos principais pilares para o setor empresarial. Analisar os campos de atuação, bem como pontos de inserção e melhoria dessa desta área é de grande importância, buscando desenvolver novos métodos e ferramentas para melhoria continua de processos.

Desta forma estudar temas relacionados a engenharia é de grande importância, pois desta maneira pode-se aprimorar os conceitos e aplicar os mesmos de maneira mais eficaz. O aumento no interesse se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de engenharia, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

João Dallamuta

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

ANÁLISE MODAL E REPRESENTAÇÃO MUSICAL APLICADAS AO DESIGN DE ESTÚDIOS DE PRODUÇÃO FONOGRÁFICA

José Augusto Mannis

Tiago Ferreira Mattos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118111>

### **CAPÍTULO 2..... 33**

A REVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 E OS PASSOS PARA SUA APLICAÇÃO NA MINERAÇÃO

Rafaela Baldi

Karina Livia Ribeiro Vieira

Mariana Ivo Machado Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118112>

### **CAPÍTULO 3..... 44**

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DAS ROCHAS ENCAIXANTES DA CAMADA DE CARVÃO BARRO BRANCO DA BACIA CARBONÍFERA SUL-CATARINENSE

Clovis Gonzatti

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118113>

### **CAPÍTULO 4..... 73**

REAPROVEITAMENTO DE FINOS DE PEDREIRAS: A UTILIZAÇÃO DO PÓ DE ROCHA COMO REMINERALIZADOR DE SOLO

Ana Olivia Barufi Franco-Magalhães

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118114>

### **CAPÍTULO 5..... 80**

BIODIGESTÃO DE POME COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA E AMBIENTAL EM PLANTA DE PRODUÇÃO DE ÓLEO DE PALMA

Daniel Dominguez Carvajal

Ana Marcela Mosquera Mena

John Alejandro Ruiz

Francisco José Molina Pérez

Carlos Alberto Peláez Jaramillo

Mariana Peñuela Vásquez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118115>

### **CAPÍTULO 6..... 88**

AULA PRÁTICA DE MONTAGEM DE UMA UNIDADE SANITÁRIA DE PLÁSTICO RECICLADO RELATO DE EXPERIÊNCIA

Maria Aridenise Macena Fontenelle

Thaís Russiely Guedes Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118116>

**CAPÍTULO 7..... 98**

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA LAGOA DO COLOSSO, MUNICÍPIO DE FORTALEZA, CEARÁ: CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO INSTITUTO FEDERAL DO CEARÁ - IFCE

Georgia Kelly Terto Galvao

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118117>

**CAPÍTULO 8..... 104**

MEASUREMENTS OF GAMMA, NEUTRONS, RAINFALLS, AND POSSIBLE CORRELATIONS IN TROPICAL REGION OF BRAZIL

Inacio Malmonge Martin

Mauro Angelo Alves

Marcelo Pêgo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118118>

**CAPÍTULO 9..... 111**

APLICAÇÃO DO DESACOPLAMENTO ENTRE MALHAS DE CONTROLE EM REATOR CONTÍNUO DE TANQUE AGITADO (CSTR)

Mário Luiz Pereira Souza

Emilly Damiani Nunes Prates

Saulo Fernando dos Santos Vidal

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2462118119>

**CAPÍTULO 10..... 126**

GESTÃO DE FADIGA DE OPERADORES DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA A CÉU ABERTO

Pedro Henrique Evangelista Porto

Samuel Lourival Diamantino

Leandro Geraldo Canaan Silveira

Eduardo Augusto Malta

Juliano Alves dos Reis

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.24621181110>

**CAPÍTULO 11..... 136**

CHARACTERISTICS OF Pb<sup>2+</sup> DOPED CsI MATRIX UNDER GAMMA AND NEUTRON EXCITATIONS

Maria da Conceição Costa Pereira

Tufic Madi Filho

José Roberto Berretta

Lucas Faustino Tomaz

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.24621181111>

**CAPÍTULO 12..... 148**

OTIMIZAÇÃO DO SABOR DE UMA BEBIDA UTILIZANDO O MÉTODO DE TAGUCHI

Matheus Sousa Garreto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.24621181112>

<b>CAPÍTULO 13.....</b>	<b>161</b>
INTERLIGANDO O CICLISMO	
Alexandre Passos Pagin	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.24621181113">https://doi.org/10.22533/at.ed.24621181113</a>	
<b>CAPÍTULO 14.....</b>	<b>165</b>
PERCEÇÃO DOS EGRESSOS SOBRE A QUALIDADE DOS CURSOS DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE – UPM	
Leila Figueiredo de Miranda	
Terezinha Jocelen Masson	
Antonio Hortêncio Munhoz Jr.	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.24621181114">https://doi.org/10.22533/at.ed.24621181114</a>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>178</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>179</b>

## APLICAÇÃO DO DESACOPLAMENTO ENTRE MALHAS DE CONTROLE EM REATOR CONTÍNUO DE TANQUE AGITADO (CSTR)

Data de aceite: 01/11/2021

Data de submissão: 08/10/2021

### Mário Luiz Pereira Souza

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, *Campus* Montes Claros  
Montes Claros- MG  
<http://lattes.cnpq.br/2681846911896508>

### Emilly Damiani Nunes Prates

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, *Campus* Montes Claros  
Montes Claros- MG  
<http://lattes.cnpq.br/3350858798611457>

### Saulo Fernando dos Santos Vidal

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, *Campus* Montes Claros  
Montes Claros- MG  
<http://lattes.cnpq.br/4067311972228358>

**RESUMO:** No presente trabalho, foi desenvolvida a simulação referente a um Reator Contínuo de Tanque Agitado (CSTR), ao qual foram aplicadas perturbações de diferentes magnitudes nas variáveis de entrada. Observou-se o comportamento transiente do sistema e efetuou-se a sintonia de um Controlador PI. Em seguida, aplicaram-se ao processo elementos dinâmicos denominados desacopladores, os quais visam à atenuação da interferência entre as malhas em um sistema de controle automático. Executado o

controle multivariável através do desacoplamento entre as malhas, das variáveis temperatura e concentração de reagente, foram verificadas as respostas do processo e a obtenção de resultados de precisão significativa utilizando um software de simulação gratuito. Concluiu-se que, em geral, todos os controladores apresentaram desempenho satisfatório, excetuando aquele com as malhas totalmente desacopladas. Logo, para a operação analisada, há dependência das duas variáveis manipuladas, corrente de alimentação e calor retirado, para o ajuste preciso das variáveis controladas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação, Reator CSTR, Controle, Desacoplamento.

### APPLICATION OF DECOUPLING BETWEEN CONTROL MESHES IN CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR (CSTR)

**ABSTRACT:** In the present work, a simulation of a Continuous Agitated Tank Reactor (CSTR) was developed, to which perturbations of different magnitudes were applied to the input variables. The transient behavior of the system was observed and a PI Controller was tuned. Then, dynamic elements called decouplers were applied to the process, which aim to attenuate the interference between the meshes in an automatic control system. After performing the multivariable control through the decoupling between the meshes, the temperature and reagent concentration variables, the responses of the process and the obtaining of results of significant precision were verified using a free simulation software. It was concluded that, in general, all controllers presented satisfactory

performance, except for the one with fully uncoupled meshes. Therefore, for the analyzed operation, there is dependence of the two manipulated variables, supply current and removed heat, for the precise adjustment of the controlled variables.

**KEYWORDS:** Simulation, CSTR reactor, Control, Decoupling.

## 1 | INTRODUÇÃO

Na sociedade atual com o aumento populacional e a incessante demanda por produtos de alta qualidade, é essencial a inserção de profissionais com a qualificação necessária para a implementação desses requisitos. Desta forma, com a visão global e acurada dos processos químicos pelos profissionais, se desenvolve uma análise crítica sobre a utilização de insumos, eficiência na integração energética, mitigação de impactos ambientais e certificação de produtos finais dentro das normas do mais elevado rigor.

No contexto abordado acima, a criação de metodologias de melhoria contínua e otimização de processos é fundamental. Um dos métodos associados ao estabelecimento de práticas eficientes é o controle de processos. Este visa garantir que uma propriedade do sistema (nível, temperatura ou concentração) fique em um valor previamente estabelecido. Assim, pode-se garantir que o processo apresentará menores desperdícios de recursos e aplicar diretrizes à otimização do lucro, redução de custos operacionais e de tempo, além da menor geração de rejeitos.

Nesse viés, a simulação do processo ganha contornos fundamentais. A partir do artifício computacional, pode-se visualizar o comportamento de plantas industriais completas ou operações específicas. É inteligente, e até prudente, a verificação preliminar dos possíveis atenuantes à robustez dos diferentes processos químicos, e também o estabelecimento de alternativas na escolha das variáveis para o controle automático de processos.

No presente trabalho é efetuado o controle multivariável com desacoplamento entre as malhas do processo referente ao Reator Contínuo de Tanque Agitado (CSTR). Ademais, é apresentada uma estrutura completa através da modelagem matemática e desenvolvimento das estruturas em malha aberta, malha fechada e com desacoplamento do referido sistema, o que possibilita uma visão ampliada dos processos intrínsecos ao reator.

Objetivou-se a aferição da precisão e robustez do sistema de controle, frente às perturbações nas variáveis de entrada, através de indicadores de desempenho e o esforço de controle dos equipamentos eletromecânicos, visando à condição para a eficaz execução da operação.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

Sistemas SISO (single-input, single-output) são aqueles que apresentam uma

variável manipulada (entrada), também chamada de variável de controle, e uma variável controlada (saída), podendo ser denominada, também, de variável de processo. Já os sistemas MIMO (multiple-input, multiple-output) são constituídos por duas ou mais variáveis manipuladas as quais visam ajustar múltiplas variáveis controladas.

Os processos químicos, em sua maioria, são sistemas multivariáveis. Conseqüentemente, é necessário implementar várias malhas de controle em um mesmo equipamento. Devido à interferência de uma variável manipulada em mais de uma variável controlada, as malhas de controle interagem entre si, resultando em um controle de baixo desempenho (KALID, 2004; STEPHANOPOULOS, 1983). Logo, o uso de desacopladores se torna essencial ao pleno desenvolvimento dos processos mencionados.

A Figura 1 A ilustra um sistema com duas variáveis de processo e duas variáveis manipuladas, sem a aplicação do controle automático (conhecido como processo em malha aberta).

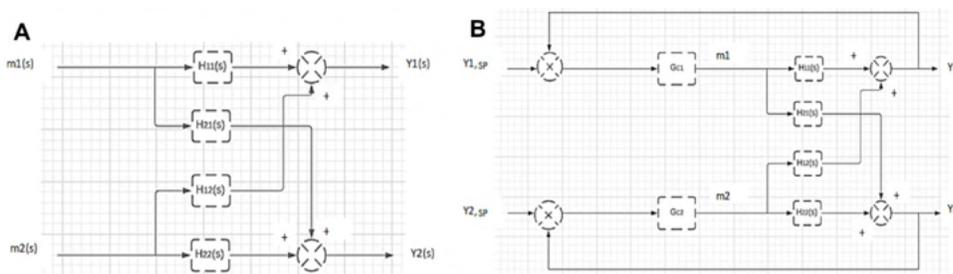


Figura 1- A-Diagrama de blocos para um processo em malha aberta; B-Diagrama de blocos para um processo em malha fechada

Fonte: adaptado de Stephanopoulos (1983)

em que:  $H(s)$  representam as quatro funções de transferência intrínsecas ao processo;  $m(s)$  denota a variável manipulada e  $Y(s)$  a variável de processo.

A Figura 1 B apresenta o mesmo processo da ilustração anterior, no entanto, há a presença de dois controladores ( $G_{c1}$  e  $G_{c2}$ ), caracterizando um sistema em malha fechada. O sistema de controle aplica uma ação corretiva na variável controlada, de modo a esta apresentar um valor equivalente ou próximo à definição do *set-point* ( $Y_{,SP}$ ).

Nessa linha, considerando que, inicialmente, ambas as saídas estejam nos valores de *set-point*, ao se efetuar uma perturbação neste causada pela malha de controle 2, tal alteração acarretará uma mudança no valor de  $m_2$ . Não obstante, também será gerada uma perturbação indesejada na malha 1. Desta forma, é crucial a alteração no valor de  $m_1$  de modo a cancelar o efeito da interação de  $m_2$ .

Deve-se, então, introduzir um elemento dinâmico com uma função de transferência que gere uma ação compensativa para atenuar os efeitos de acoplamento entre as

variáveis trabalhadas. Os seguintes equacionamentos abordam de forma mais clara o que fora enunciado previamente.

$$D'(s) = \frac{-H_{12}}{H_{11}} \quad (1)$$

Esse elemento dinâmico é chamado desacoplador ( $D'$ ) e, quando instalado no sistema de controle minimiza qualquer efeito que a malha 2 possa ter sob a malha 1.

Para a atenuação da interação da malha 1 na 2, segue-se o mesmo raciocínio acima, chegando à função de transferência mostrada na Equação 11:

$$D''(s) = \frac{-H_{21}}{H_{22}} \quad (2)$$

Em um processo com duas entradas e duas saídas, são requisitados dois desacopladores para gerar malhas não interativas. Assim, têm-se ações compensativas para minimizar ou até mesmo cancelar por completo as interferências entre as malhas de controle. A seguir é apresentado um sistema contendo dois elementos para o desacoplamento entre as malhas.

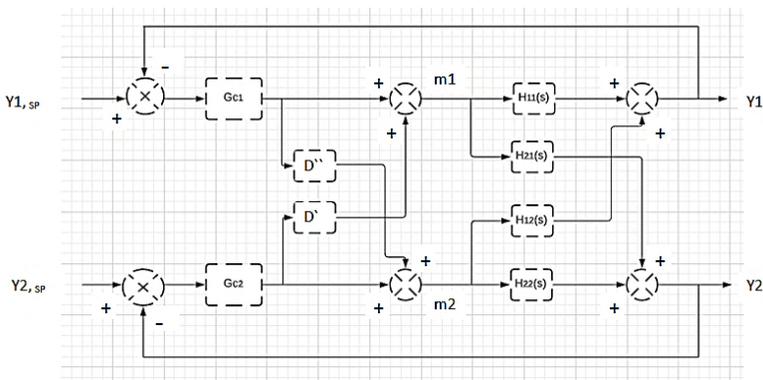


Figura 2- Sistema Contendo dois elementos

Fonte: adaptado de Stephanopoulos (1983)

### 3 I METODOLOGIA

A metodologia se pautou na modelagem e simulação da reação química em Reator CSTR, juntamente com a aplicação de controladores com as malhas acopladas, desacopladas e parcialmente desacopladas. Também serão feitos os comentários pertinentes às respostas, com base nas perturbações aplicadas às variáveis de entrada, dos controladores citados.

### 3.1 Modelagem Matemática

O reator contínuo de tanque agitado (CSTR) é comumente usado em processos industriais, principalmente, para reações em fase líquida. Considera-se que os constituintes do meio reacional estão perfeitamente misturados, ou seja, temperatura e concentração são idênticas em qualquer ponto do reator (FOGLER, 2009; LUYBEN, 2007).

Realizou-se a modelagem matemática baseada em um problema prático abordado em Fogler (2009). A reação química considerada foi a isomerização em fase líquida no n-butano, em um Reator CSTR, para geração do isobutano, o qual é um produto valioso utilizado na fabricação de aditivos para a gasolina (FOGLER, 2009).

Considerou-se que o volume do meio reacional ( $V$ ) se manteve constante ao longo do processo, portanto, a vazão volumétrica de entrada ( $F_0$ ) é igual à vazão de saída ( $F$ ). Além disso, é destacável que a reação química abordada era exotérmica, de primeira ordem e elementar, do tipo:  $A \rightarrow B$ . A partir dessas considerações desenvolveu-se o balanço para a concentração do reagente A e o balanço energético do sistema.

### 3.2 Funções de transferência e parâmetros do controlador

Com base nas formulações matemáticas, implementou-se na plataforma *x-cos* os diagramas de blocos para a resolução das equações diferenciais.

O reator em questão apresenta duas variáveis manipuladas, vazão volumétrica e quantidade de calor retirada por um sistema de resfriamento. Foram exercidas perturbações na interface de simulação, sendo estas perturbações do tipo degrau em +20% no valor das variáveis citadas.

O objetivo dessas flutuações é encontrar a função de transferência do processo. Para tal, utilizou-se a ferramenta *Solver* do *Excel*, de modo a minimizar o erro da diferença entre a curva do processo obtida e a curva de identificação, encontrando, assim, os parâmetros da função de transferência.

Logo após, utilizou-se do método de Astrom- Hagglund para realizar as perturbações inerentes ao processo e obter os parâmetros do controlador. O método é utilizado em malha fechada, no qual se utiliza um relé que provoca o aparecimento de oscilações e gera-se um gráfico para avaliação do  $K_c$  crítico.

### 3.3 Perturbações e controle com e sem desacoplamento

Aplicaram-se perturbações, de diferentes magnitudes, às variáveis de entrada ( $Ca_0$  e  $T_0$ ), a fim de se observar como o processo em malha fechada se comportava. As flutuações em questão foram de 10% em  $Ca_0$  e 1% em  $T_0$ , embasadas em uma ordem de grandeza coerente. Realizou-se a verificação do desempenho dos controladores, com as malhas acopladas e desacopladas, através dos gráficos gerados.

Por fim, foi aferido o Esforço de Controle (Esf) e o indicador de desempenho ITAE (Integral do Erro Absoluto Ponderado pelo Tempo), a partir das simulações desenvolvidas.

As Equações 3 e 4 representam de forma elucidativa o cálculo do ITAE e Esf, respectivamente.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (3)$$

$$Esf = \int_0^t \Delta u^2 dt \quad (4)$$

em que t representa o tempo de simulação ou de operação e u é a variável manipulada.

## 4 | RESULTADOS

### 4.1 Modelagem Matemática

Mediante as considerações desenvolvidas a respeito da manutenção do volume do meio constante, a Equação final representativa da variação da concentração ao longo do tempo é mostrada pela expressão matemática a seguir:

$$\frac{dC_a}{dt} = \frac{F}{V}(C_{a0} - C_a) - k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \cdot C_a \quad (5)$$

em que: F representa a vazão volumétrica do processo, V o volume do meio reacional,  $C_{a0}$  a concentração inicial do reagente,  $C_a$  a concentração do reagente em determinado tempo,  $k_0$  denota o fator pré-exponencial relacionado à frequência de colisões,  $E_a$  é a energia de ativação da reação, T representa a temperatura, a qual ocorre a reação, e R a constante geral dos gases.

A Equação descritiva da variação, ao longo do tempo, da temperatura (T) é mostrada abaixo:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V}(T_0 - T) - \frac{Q}{\rho \cdot V \cdot C_p} - \frac{\Delta Hr \cdot C_a \cdot k_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}}}{\rho \cdot C_p} \quad (6)$$

em que:  $T_0$  é a temperatura inicial, Q é a quantidade de calor retirada do sistema,  $\rho$  é a densidade do reagente,  $C_p$  é o calor específico da espécie química envolvida e  $\Delta Hr$  representa a variação de entalpia da reação.

Logo após a modelagem matemática, desenvolveram-se no x-cos os diagramas de blocos referentes às equações diferenciais (as quais denotam o comportamento transiente do sistema) apresentadas pelas Equações 5 e 6.

As Figuras 3 A e 3 B ilustram as resoluções das equações diferenciais inerente à variação de Concentração do reagente analisado e Temperatura, ao longo do tempo, pelos diagramas de blocos.

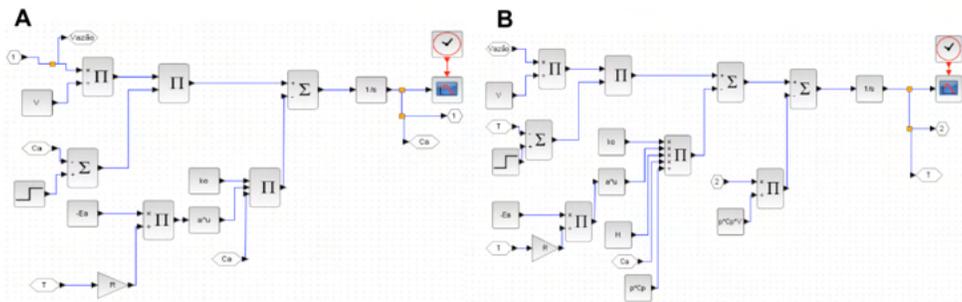


Figura 3- A- Variação de concentração do reagente com o tempo; B- Variação da temperatura com o tempo

Fonte: acervo do autor

O uso da plataforma *x-cos* é respaldado pela facilidade na disposição dos elementos essenciais à averiguação do perfil dinâmico do processo e ser bastante intuitivo. Os valores dos parâmetros e demais variáveis estão alocados na tabela seguinte. É importante salientar que alguns valores de variáveis de processo como: vazão volumétrica, calor removido e das condições iniciais de temperatura e concentração foram estabelecidos pelo autor.

$V$ (m <sup>3</sup> )	$F_0$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q$ (W)	$Ca_0$ (mol/m <sup>3</sup> )	$T_0$ (K)
1,0	0,0044	30000	1000	330
$E_a$ (J/mol)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/Kg.K)	$\Delta H_r$ (J/mol)	$K_0$
65700	573	2600	-6900	$3,50 \cdot 10^7$

Tabela 1- Valores das propriedades referentes às equações diferenciais

Fonte: adaptado de Fogler (2009)

Além dos dispostos acima, utilizou-se o valor da constante dos gases,  $R$ , equivalente a  $8,314 \text{ J/mol.K}$  (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

## 4.2 Funções de transferência e parâmetros do controlador

As Figuras 4 A e 4B representam as curvas de resposta frente à perturbação aplicada. Vale destacar que a representação é feita da concentração do reagente A ( $Ca$ ) e da Temperatura ( $T$ ), em variável desvio (diferença do valor atual da propriedade com relação ao estado estacionário) em função do tempo ( $t$ ). Empregam-se as variáveis de desvio, com o objetivo da eliminação das condições iniciais dos modelos em função de transferência (FT), cuja vantagem é a nulidade adquirida pelo termo de condição inicial (BOJORGE, 2021). É interessante abordar que os valores encontrados para o estado estacionário envolvendo a concentração de A e temperatura foram, respectivamente,  $3851 \text{ mol/m}^3$  e  $354 \text{ K}$ .

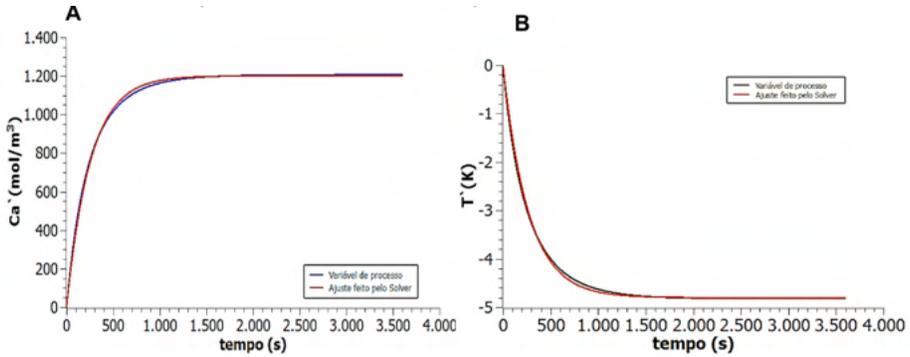


Figura 4- A-Perturbação aplicada à vazão e verificação do comportamento da concentração; B- Perturbação aplicada à vazão e verificação do comportamento da temperatura

Fonte: acervo do autor

Os parâmetros intrínsecos ao sistema estão dispostos na tabela seguinte.

	Vazão (m³/s)	Calor (W)
<b>Kp</b>	1,360.10 <sup>6</sup>	5455
<b>τ</b>	256,2	269,0

Tabela 2- Valores de τ e Kp para a identificação do sistema mediante alteração da vazão

Fonte: acervo do autor

Logo, a função de transferência global para a concentração do reagente A é:

$$Ca'(s) = \frac{1,360.10^6 \cdot F'}{256,2s + 1} \quad (7)$$

No tocante à modificação do calor retirado, as figuras abaixo ilustram o comportamento do sistema:

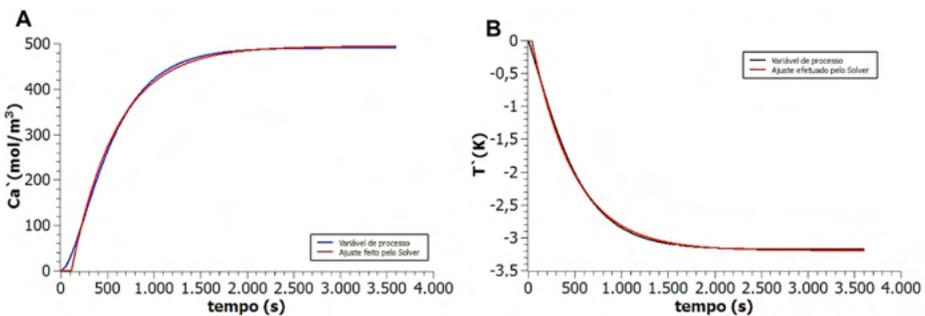


Figura 5- A-Perturbação aplicada ao calor e verificação do comportamento da concentração; B- Perturbação aplicada ao calor e verificação do comportamento da temperatura

Fonte: acervo do autor

Ao se analisar as figuras acima, observa-se que o comportamento de ambas é inerente ao sistema de segunda ordem, sendo assim, podem ser aproximadas ao modelo de primeira ordem com tempo morto. Efetuando os ajustes, chega-se aos seguintes valores dispostos na Tabela 3.

	Vazão (m³/s)	Calor (W)
<b>Kp</b>	0,080	5,00.10 <sup>-4</sup>
<b>τ</b>	482,4	452,0
<b>td</b>	117,7	39,4

Tabela 3- Valores de τ , Kp e td para a identificação do sistema mediante alteração do calor

Fonte: acervo do autor

A FT global para a temperatura referente à alteração da variável manipulada calor é:

$$T^{\wedge}(s) = \frac{5,00.10^{-4} \cdot e^{-39,4} \cdot Q^{\wedge}}{452,0s + 1} \quad (8)$$

Conseguidas as funções de transferência, foram calculados os parâmetros do Controlador PI a partir do método de Astrom-Hagglund. Uma observação pertinente sobre a utilização deste método foi pelo fato de não apresentar restrições. Resumidamente, na Tabela 4 estão alocados os valores correspondentes aos parâmetros dos controladores PI.

Controladores			
Concentração		Temperatura	
Kc	τi	Kc	τi
5,04.10 <sup>-7</sup>	1041,7	1720	1125

Tabela 4- Valores dos parâmetros dos controladores PI

Fonte: acervo do autor

### 4.3 Perturbações e controle com e sem desacoplamento

Com o auxílio fornecido pela sintonia dos controladores e os equacionamentos matemáticos representativos das variações de Ca e T, construiu-se o sistema completo envolvendo diagramas de blocos. A Figura 6 representa a síntese do trabalho desenvolvido. Nela se encontram os dois desacopladores e todo o aporte necessário para a geração dos gráficos, os quais serão ferramentas importantes para a comparação da performance envolvendo os controladores.

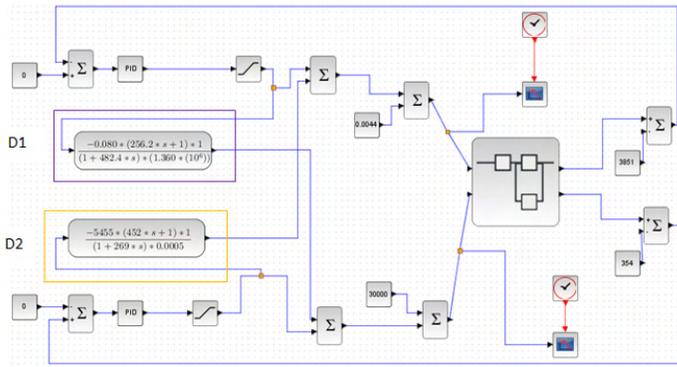


Figura 6- Sistema com desacoplamento aplicado no  $x$ -cos

Fonte: acervo do autor

Os gráficos representativos do comportamento do sistema com os controladores acoplados e desacoplados estão alocados a seguir, para cada uma das perturbações aplicadas nas variáveis de entrada, concentração ( $Ca_0$ ) e temperatura ( $T_0$ ). Ademais, são tabelados os valores conseguidos de indicadores de desempenho e esforços de controle.

### Perturbação de +10% $Ca_0$ e +1% $T_0$

O comportamento transiente da concentração é mostrado pelo gráfico seguinte. Nele, são apresentadas as variações do sistema com as malhas acopladas (SA), com as malhas desacopladas (SD) e com as malhas parcialmente desacopladas; D1 se refere ao sistema desacoplado parcialmente, de modo a atenuar a interação da malha de controle de concentração na malha referente ao controle de temperatura; D2 também representa um sistema desacoplado parcialmente, o qual visa a não interferência da malha de controle da temperatura na malha de controle da concentração.

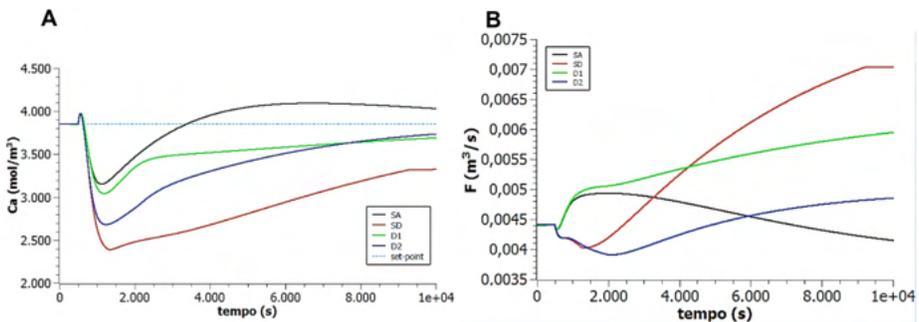


Figura 7- A-Sistema em malha fechada correspondente à variação da concentração ao longo do tempo para a perturbação de +10%  $Ca_0$  e +1%  $T_0$ ; B- Variação da vazão ao longo do tempo para a perturbação de +10%  $Ca_0$  e +1%  $T_0$

Fonte: acervo do autor

Ao se elevar a concentração inicial, a conversão aumenta, visto que é maior a probabilidade de colisões efetivas com o aumento no número de partículas reagentes (Brady; Humiston, 1986). Para o sistema ser ajustado ao *set-point*, a vazão é alterada de modo a diminuir (aumentar o tempo espacial, elemento representativo do tempo em que as moléculas levam para percorrer o elemento espacial do reator) e, desta forma, elevar a conversão para que a concentração de A volte ao valor estabelecido inicialmente.

NA Figura 7 B, observa-se que há um aumento significativo da vazão para o sistema com as malhas desacopladas e com desacoplamento parcial, D1. Este fato implica diretamente a geração de um ajuste ruim, o que pode ser comprovado pela análise da resposta para a variável controlada (ambos os controladores citados apresentaram maiores valores de *off-set* ao se avaliar a diferença entre o *set-point* e o valor de concentração no intervalo de tempo analisado).

Na Figura 8 A, é mostrado o comportamento transiente da temperatura no interior do reator. O gráfico denotativo à retirada de calor no decorrer do tempo está alocado na Figura 8 B.

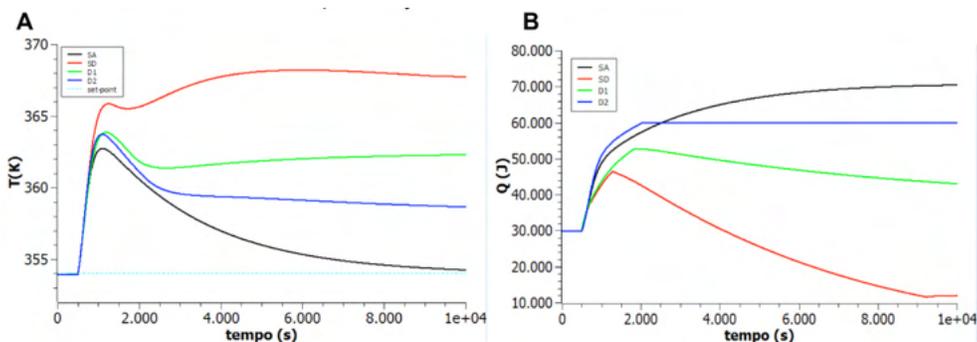


Figura 8- A- Sistema em malha fechada correspondente à variação da temperatura ao longo do tempo para a perturbação de  $+10\% Ca_0$  e  $+1\% T_0$ ; B- Variação do calor ao longo do tempo para a perturbação de  $+10\% Ca_0$  e  $+1\% T_0$

Fonte: acervo do autor

Ao se elevar a temperatura, a conversão sofre um aumento pelo fato decorrente do acréscimo de energia cinética das moléculas, acarretando uma maior facilidade em romper a barreira reacional imposta pela energia de ativação (Brady; Humiston, 1986). Para efetuar um controle de temperatura, a quantidade de calor retirada deve aumentar (fato que foi observado no gráfico acima para a maioria dos controladores). Todavia, para o sistema totalmente desacoplado, houve um declínio considerável a partir de 1500s, de tal modo em que a temperatura não é controlada de forma acurada. O fato descrito, não esperado, é decorrente de uma ineficiência do controle da temperatura somente pela manipulação da quantidade de calor.

Na Tabela 5 são apresentados os valores dos indicadores de desempenho para a concentração (ITAE Ca) e temperatura (ITAE T). Além disso, estão alocados os esforços de controle para a vazão (Esf. T) e sistema de resfriamento (Esf. Q).

	SA	SD	D1	D2
<b>ITAE Ca</b>	$1,06 \cdot 10^{10}$	$4,1 \cdot 10^{10}$	$1,31 \cdot 10^{10}$	$1,69 \cdot 10^{10}$
<b>ITAE T</b>	$7,89 \cdot 10^7$	$6,84 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^8$	$2,56 \cdot 10^8$
<b>Esf. F</b>	$7,67 \cdot 10^{-12}$	$1,69 \cdot 10^{-11}$	$9,20 \cdot 10^{-12}$	$5,91 \cdot 10^{-12}$
<b>Esf. Q</b>	$8,79 \cdot 10^3$	$6,17 \cdot 10^3$	$5,63 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^4$

Tabela 5- Indicadores de desempenho e esforços de controle

Fonte: acervo do autor

Com base na tabela anterior, constata-se o melhor desempenho, no sistema acoplado, visto que este apresenta os menores valores de ITAE, parâmetro associado ao erro. Nota-se que os esforços inerentes à vazão apresentaram valores pequenos, isto é, não há um efeito pronunciado no equipamento transportador de fluido ao se efetuar o ajuste da vazão. Quanto ao calor, o menor esforço de controle é conseguido pelo controlador parcialmente desacoplado D1, para o qual é requisitado um menor gasto com refrigeração para a execução do ajuste que se mostrou robusto.

### Perturbação de $-10\% Ca_0$ e $-1\%T_0$

Para a referente perturbação foram gerados os gráficos relativos do comportamento ao longo do tempo para as variáveis controladas e manipuladas. Na Figura 9 A, é mostrado o perfil dinâmico da concentração. No presente caso, ao se reduzir a concentração inicial, a conversão é reduzida e, por conseguinte, a vazão necessita ser aumentada, objetivando a elevação da concentração do reagente ocasionada pela redução da conversão reacional. A Figura 9 B ilustra o comportamento transiente da vazão.

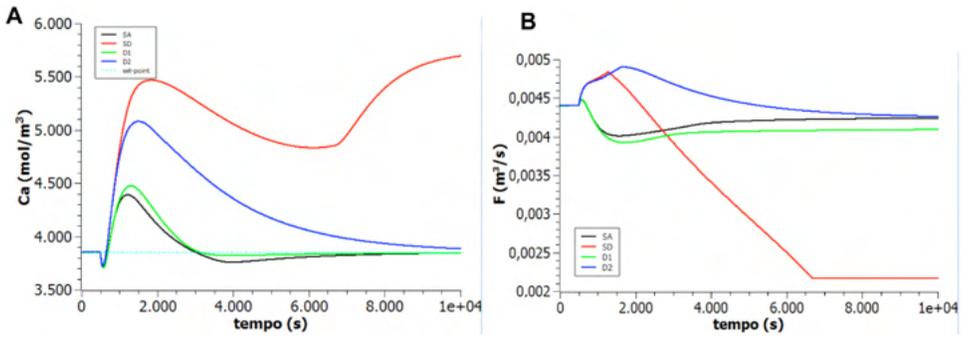


Figura 9- A- Sistema em malha fechada correspondente à variação da concentração ao longo do tempo para a perturbação de  $-10\% Ca_0$  e  $-1\% T_0$ ; B- Variação da vazão ao longo do tempo para a perturbação de  $-10\% Ca_0$  e  $-1\% T_0$

Fonte: acervo do autor

Mais uma vez, nota-se uma incongruência para o controlador com as duas malhas desacopladas, a vazão diminui de forma abrupta em torno de 1500s e, no tempo aproximado de 6200s, fica estagnada em um valor extremamente baixo, o que não permite a execução de um controle significativo.

De forma posterior, foram gerados os gráficos referentes ao controle de temperatura e do calor extraído do sistema.

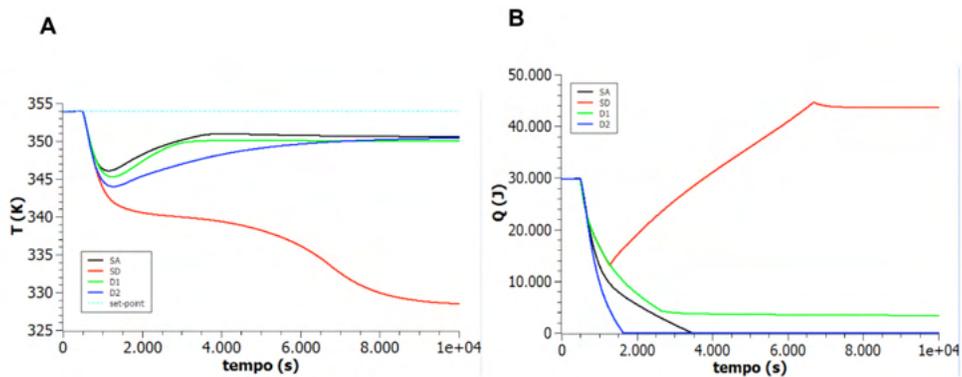


Figura 10- A- Sistema em malha fechada correspondente à variação da temperatura ao longo do tempo para a perturbação de  $-10\% Ca_0$  e  $-1\% T_0$ ; B- Variação do calor ao longo do tempo para a perturbação de  $-10\% Ca_0$  e  $-1\% T_0$

Fonte: acervo do autor.

Observa-se que a variável de estado temperatura, apresentou valores destoantes ao *set-point*, para todos os controladores, em especial, para SD. Com o decréscimo em  $T_0$ , deve-se reduzir a quantidade de calor retirado para que a temperatura da meio volte a subir. Com base na última afirmação, o comportamento do calor para SD é absurdo,

visto que a retirada de energia aumenta de maneira significativa, acarretando um controle ruim da temperatura. Pode-se afirmar, então, para o sistema em estudo são necessárias, obrigatoriamente, duas variáveis manipuladas para o ajuste acurado das variáveis controladas.

	SA	SD	D1	D2
<b>ITAE Ca</b>	$2,46 \cdot 10^9$	$6,9 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^9$	$1,24 \cdot 10^{10}$
<b>ITAE T</b>	$1,75 \cdot 10^8$	$1,02 \cdot 10^9$	$2,07 \cdot 10^8$	$2,31 \cdot 10^8$
<b>Esf. F</b>	$4,56 \cdot 10^{-12}$	$1,83 \cdot 10^{-11}$	$5,22 \cdot 10^{-12}$	$6,01 \cdot 10^{-12}$
<b>Esf. Q</b>	$6,88 \cdot 10^3$	$6,70 \cdot 10^3$	$5,35 \cdot 10^3$	$9,89 \cdot 10^3$

Tabela 6- Indicadores de desempenho e esforços de controle

Fonte: acervo do autor

Mediante a observação da Tabela 6, verifica-se que o controlador para o sistema totalmente desacoplado, apresentou o pior desempenho, analisando os valores de ITAE. Esse fato era esperado, visto que o ajuste ao *set-point*, confirmado pela avaliação dos gráficos, foi extremamente defasado. Para D1, foi obtido o menor esforço de controle para o sistema de resfriamento.

## 5 I CONCLUSÃO

Com o aporte teórico fornecido pela literatura foi possível a aplicação da estratégia de controle multivariável através do desacoplamento entre as malhas de controle para a concentração e temperatura de um Reator CSTR, envolvendo uma reação química de grande relevância nos processos industriais, retirada de um problema prático, para o qual engenheiros de processos são solicitados, com o objetivo de melhorar o processo químico descrito. Como era esperado, obtiveram-se respostas diferentes para cada tipo de controlador, mediante as flutuações aplicadas às variáveis de entrada.

Para o esforço da manipulação do calor retirado, os menores valores foram encontrados para o caso de desacoplamento parcial D1. Conseqüentemente, este é o mais indicado visando à economia de fluido refrigerante para a aplicação no processo analisado.

Uma menção a ser feita é que fica a cargo de projetistas a análise melhor definida de quais são as perturbações mais comuns nesse tipo de reator e a seleção do melhor controlador com base em economia de recursos financeiros e adequações a condições estabelecidas.

## REFERÊNCIAS

BOJORGE, N. **Modelagem de Processos - Técnica de Linearização**. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo. Universidade Federal Fluminense. 2021. Disponível em: [https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/09/Control\\_Aula05-ModProcessos\\_2sem2017-1.pdf](https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/09/Control_Aula05-ModProcessos_2sem2017-1.pdf). Acesso em 12 de Agosto de 2021.

BRADY, J. E.; HUMISTON, G. E. **Química Geral**. Volume 2. 2ª Edição. Editora LTC. 1986.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. Editora AMGH. 2012.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro-RJ. 2009.

KALID, R. A. **Controle de Processos Químicos**. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal da Bahia. Salvador- BA. 2004.

LUYBEN, W. L. **Chemical Reactor Design and Control**. John Wiley & Sons Inc. Hoboken. New Jersey. 2007.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice**. New Jersey. Prentice-Hall International Inc. 1984.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Acidente 96, 126

Acústica 1, 2, 3, 11, 18, 25

Agrominerais 73

Água 34, 35, 40, 48, 68, 91, 98, 99, 100, 101, 102, 154, 157, 158

Aplicativo 4, 5, 7, 20, 161, 162, 163, 164

Avaliação de curso 165, 166

### B

Biogás 80, 81, 82, 83, 86

### C

Caminhão fora de estrada 126, 128, 134

Caracterização geomecânica 44, 45, 46, 59, 69

Carvão 44, 45, 46, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70

Ciclismo 161, 163, 164

Cintilador 137

Conforto ambiental 1

Controle 5, 6, 18, 25, 32, 37, 40, 96, 111, 112, 113, 114, 115, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 148, 149, 150, 165

Crescimento de cristal 137

### D

Desacoplamento 111, 112, 114, 115, 119, 120, 121, 124

### E

Educação 36, 88, 90, 97, 98, 111, 161, 165, 166, 175, 176, 177

Egresso 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 176

Engenharia civil 45, 88, 89, 92, 94, 95, 96, 174

Engenharia de áudio 1

Ensaios de laboratório 44, 51, 66, 69

Estúdio 1, 28

### G

Gerenciamento de fadiga 126, 128, 129, 134

### I

Interligação 161, 162

## **M**

Matriz ortogonal 148, 150, 152, 154, 160

Mercado de trabalho 160, 165, 167, 168, 169, 170, 175

Mineração 33, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 70, 73, 75, 79, 126

## **O**

Otimização 35, 37, 40, 69, 112, 148, 151, 160

## **P**

Pedreiras 73, 74, 79

Pó de rocha 73, 74, 75, 76

Produtividade 33, 34, 36, 38, 39, 40, 127, 148, 149, 150, 160

## **Q**

Qualidade 11, 13, 21, 33, 34, 37, 41, 42, 46, 50, 51, 68, 69, 98, 99, 100, 112, 148, 150, 157, 160, 165, 166, 167, 168, 169, 173, 176, 177

## **R**

Radiação de nêutrons 137

Radiação gama 104, 137

Reator 111, 112, 114, 115, 121, 124

Recursos hídricos 98, 99, 102

## **S**

Sala de audição 1

Simulação 1, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 20, 24, 31, 35, 40, 41, 111, 112, 114, 115, 116

Sonolência 39, 126, 127, 128, 129, 131, 134, 135

## **T**

Taguchi 148, 149, 150, 151, 152, 160

# Engenharias:

da genialidade à profissão e  
seu desenvolvimento

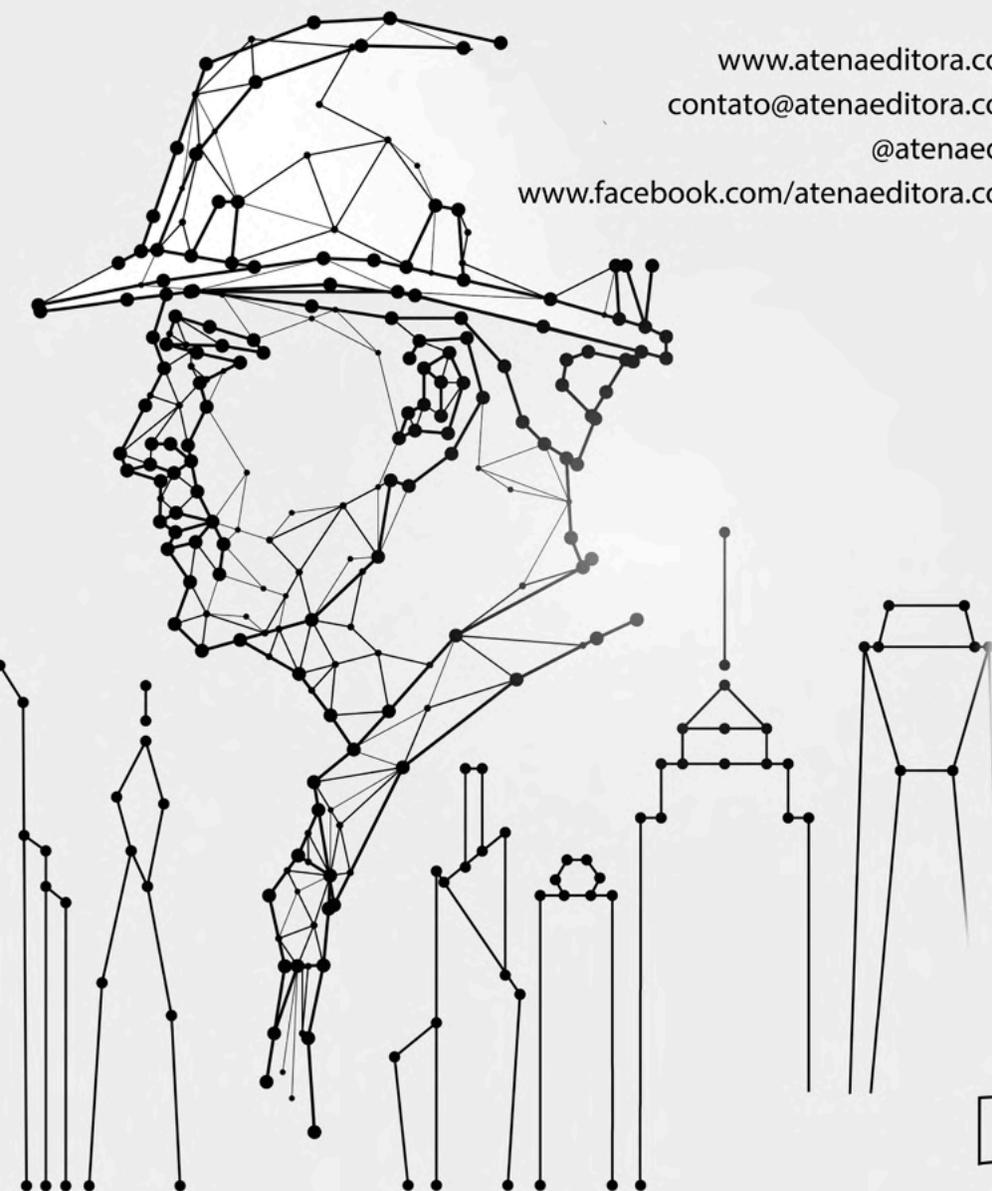
# 2

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 



**Atena**  
Editora

Ano 2021

# Engenharias:

da genialidade à profissão e  
seu desenvolvimento

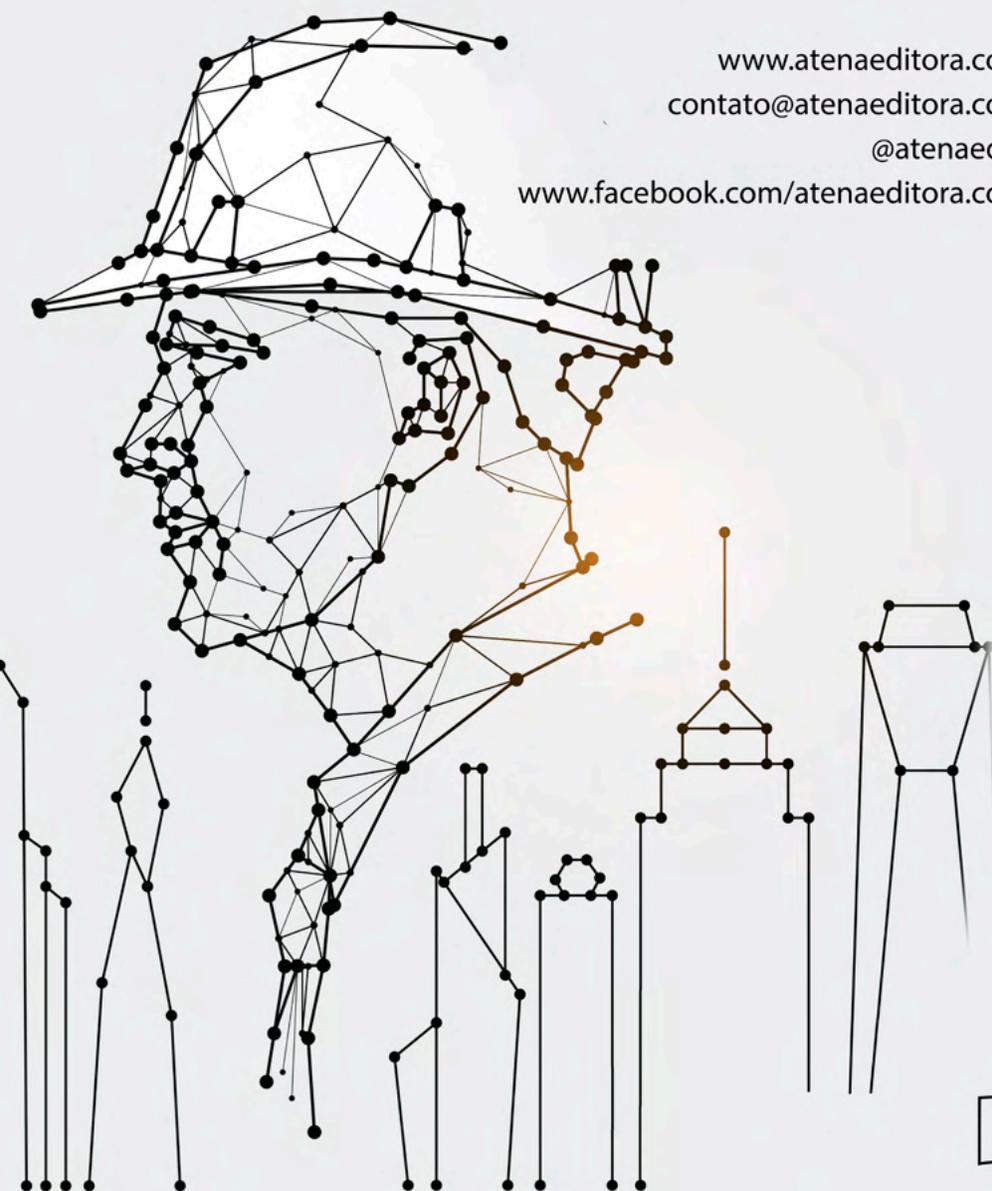
# 2

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 



**Atena**  
Editora

Ano 2021