



Impactos das Tecnologias na Engenharia Química

Carmen Lúcia Voigt
(Organizadora)

Atena
Editora

Ano 2019

Carmen Lúcia Voigt
(Organizadora)

Impactos das Tecnologias na Engenharia Química

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Natália Sandrini e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
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
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

| | |
|-----|--|
| 134 | Impactos das tecnologias na engenharia química [recurso eletrônico] / Organizadora Carmen Lúcia Voigt. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Impactos das Tecnologias na Engenharia Química; v. 1) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-237-1 DOI 10.22533/at.ed.371190304 1. Engenharia química – Pesquisa – Brasil. I. Voigt, Carmen Lúcia. II. Série. CDD 660.76 |
|-----|--|

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

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.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

Inovações tecnológicas surgem a todo o momento, em todo o mundo, sendo utilizadas como uma ferramenta estratégica para manutenção e crescimento dos negócios nas indústrias. A Engenharia Química foi uma das carreiras que mais contribuiu para a evolução da Era Industrial para a Era Moderna.

A preocupação em desenvolver produtos e processos de produção torna a Engenharia Química responsável por pesquisas e projetos em relação aos materiais que passam por mudanças físicas e químicas, adquirindo outras características.

A Engenharia Química trabalha com a manipulação de compostos e substâncias para se criar novos produtos. Estes produtos proporcionam uma melhoria na qualidade de vida humana, pois além de pesquisas relacionadas, existe a preocupação em viabilizar as invenções, criar métodos baratos e eficientes de fabricação em massa, implementando processos químico-industriais cada vez melhores, mais econômicos e mais ecológicos.

Neste primeiro volume, organizado para você, apresentamos o papel do Engenheiro Químico no mercado de trabalho, pois este aplica conhecimentos adquiridos no estudo de Química e de Engenharia para criar soluções voltadas à produção ou ao uso de substâncias químicas. É o profissional que constrói um elo entre a ciência e a manufatura. Cabe ao engenheiro químico lidar com a formulação e a solução de problemas associados à indústria química, bem como trabalhar na operação e manutenção de sistemas. Também são expostos, neste volume, trabalhos relacionados ao ensino teórico e prático de Engenharia Química.

Além disso, encontram-se trabalhos relacionados com aplicações estatísticas, simulações e otimização de processos para melhoria de utilização de produtos e subprodutos. Assim como são expostos trabalhos de caracterização de materiais e alterações em processos químicos utilizando novas técnicas de análise de produto, avaliando comportamento, característica de sistemas, propriedades físico-químicas e alteração de composição de produtos já utilizados no mercado.

Baseado nestes trabalhos, convidamos você a aperfeiçoar seus conhecimentos na área da Engenharia Química. Os trabalhos selecionados oportunizam uma nova visão de materiais, processos e técnicas na área, mostrando o impacto tecnológico no desenvolvimento da indústria e sua relação direta com a sociedade e meio ambiente.

Boa leitura.

Carmen Lúcia Voigt

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| O PAPEL DO ENGENHEIRO QUÍMICO NO MERCADO DE TRABALHO: PRODUÇÃO DE UM GUIA PRÁTICO DIGITAL DESTINADO AOS GRADUANDOS E DEMAIS INTERESSADOS NA PROFISSÃO | |
| Raphael Carlos Rosa Pereira Eder Dias da Silva | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903041 | |
| CAPÍTULO 2 | 8 |
| GAMEQ: JOGO PARA O ENSINO NA ENGENHARIA QUIMICA | |
| Riccardo Cafagna Miguel do Valle Fróes Negreiros Falcão Felipe Emmanouil Martires Stamoglou Ana Lucia Barbosa de Souza Ewerton Emmanuel da Silva Calixto Fernando Luiz Pellegrini Pessoa | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903042 | |
| CAPÍTULO 3 | 17 |
| ELABORAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE PROTÓTIPO DE REATOR CSTR CONSTRUÍDO COM MATERIAIS DE BAIXO CUSTO VOLTADO À EDUCAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA | |
| Cristiane Daliassi Ramos de Souza Sauro Franceschi de Carvalho Emeson de Souza Lemos Kevelyn Carolina Motta Sbravati | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903043 | |
| CAPÍTULO 4 | 27 |
| PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE MÓDULO CONTÍNUO A PARTIR DE MATERIAIS DE BAIXO CUSTO COMO IMPLEMENTAÇÃO DO ENSINO EXPERIMENTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA | |
| Cristiane Daliassi Ramos de Souza Igor Moraes Bezerra Calixto Sauro Franceschi de Carvalho Matheus Macedo Teixeira Rafaela Misseia Cinque de Lima Marco Antônio de Alcântara Rocha | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903044 | |
| CAPÍTULO 5 | 36 |
| O SIMULADOR DO FUTURO APLICADO À INDÚSTRIA | |
| Fernanda Martins | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903045 | |
| CAPÍTULO 6 | 43 |
| TERMODINÂMICA QUÍMICA – COMPREENDENDO DE FORÇAS INTERMOLECULARES A COEFICIENTE DE ATIVIDADE | |
| Lisandra Ferreira de Lima Admilson Lopes Vieira | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903046 | |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 7 | 53 |
| DETERMINAÇÃO DE CURVAS DE EQUILÍBRIO SÓLIDO-LÍQUIDO DE SOLVENTES EUTÉTICOS PROFUNDOS (DES) EMPREGANDO A CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC) | |
| Helena Pletsch Mariana Carolina Gipiela Corrêa Dias Marcos Rogério Mafra | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903047 | |
| CAPÍTULO 8 | 59 |
| ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE FALHAS POR TÉCNICAS ESTATÍSTICAS APLICADAS A SISTEMAS DE BOMBEAMENTO HIDRÁULICO | |
| Rebeca Albino de Jesus Ezequiel José da Silva Honorato Fábio George Nogueira Cruz José Nilton Silva | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903048 | |
| CAPÍTULO 9 | 73 |
| COMPARAÇÃO DE PERFIS DE VELOCIDADE OBTIDOS POR TUBO DE PITOT E POR SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ANSYS CFX | |
| Victor Felipe Arthur Coutinho Ladeia Rosilanny Soares Carvalho Anna Clara Marques de Queiroz João Carlos Gonçalves | |
| DOI 10.22533/at.ed.3711903049 | |
| CAPÍTULO 10 | 80 |
| ENGENHARIA DE PROCESSOS: DIMENSIONAMENTO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SISTEMAS DE EVAPORAÇÃO MÚLTIPLO EFEITO DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE <i>KRAFT</i> | |
| Jamilly Marques Gasparoni Cássia Regina Santos Nunes Almeida Gustavo Matheus de Almeida | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030410 | |
| CAPÍTULO 11 | 96 |
| PROJETO DE HIDROCICLONES USANDO OTIMIZAÇÃO ROBUSTA E ESTUDO DO EFEITO DA ROBUSTEZ | |
| Vitor Alves Garcia Fran Sérgio Lobato Luiz Gustavo Martins Vieira | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030411 | |
| CAPÍTULO 12 | 111 |
| SELEÇÃO DE VARIÁVEIS E CONTROLE DE COMPOSIÇÃO POR INFERÊNCIA DE TEMPERATURA EM PROCESSO PRODUTIVO DO ETILBENZENO | |
| Arioston Araújo de Moraes Júnior Leopoldo Oswaldo Alcazar Rojas Paulo Romero de Araujo Mariz Emanuella Francisca de Lacerda Vieira Marcelo da Silva Pedro Jonas Laedson Marinho da Silva Santos | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030412 | |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 13 | 119 |
| INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE PH, TEMPERATURA E TEMPO DE VAPORIZAÇÃO NO PROCESSO DE TINGIMENTO DE TECIDOS | |
| Wanyr Romero Ferreira Wilson Costa Resende Aline Pereira Leite Nunes | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030413 | |
| CAPÍTULO 14 | 128 |
| ANÁLISE CORROSIVA DO AÇO 304 QUANDO SUBMETIDO AO PROCEDIMENTO DE GALVANOPLASTIA | |
| Renata de Oliveira Marinho Marcelo Batista Queiroz Eudesio Oliveira Vilar Márcia Cristina de Sousa | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030414 | |
| CAPÍTULO 15 | 140 |
| EFEITO DA DENSIDADE DE CORRENTE NO PROCESSO DE OBTENÇÃO DE REVESTIMENTOS DE Co-W OBTIDOS POR ELETRODEPOSIÇÃO | |
| Arthur Filgueira de Almeida Bianca Oliveira Evaristo Josiane Dantas Costa Mikarla Baía de Sousa Nathália Cristina Morais Lia Fook Renato Alexandre Costa de Santana Ana Regina Nascimento Campos | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030415 | |
| CAPÍTULO 16 | 148 |
| FILTRO DE KALMAN ESTENDIDO E REDE NEURAL ARTIFICIAL NA ESTIMATIVA DE CONCENTRAÇÃO EM UM REATOR QUÍMICO NÃO ISOTÉRMICO | |
| Arioston Araújo de Moraes Júnior Leopoldo Oswaldo Alcazar Rojas Marcelo da Silva Pedro Paulo Romero de Araujo Mariz Emanuella Francisca de Lacerda Vieira Jonas Laedson Marinho da Silva Santos Rodrigo Marinho Guimarães | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030416 | |
| CAPÍTULO 17 | 153 |
| COMPÓSITO DE NANOCELULOSE BACTERIANA E NANOTUBOS DE CARBONO | |
| Guilherme Colla Vinícius Heidemann de Souza Fernanda Vieira Berti Luismar Marques Porto | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030417 | |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 18 | 160 |
| IMOBILIZAÇÃO DE COLÁGENO HUMANO TIPO I EM MEMBRANAS DE NANOCELULOSE BACTERIANA | |
| Ana Carolina Jorge Meyer | |
| Emily Marques dos Reis | |
| Luismar Marques Porto | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030418 | |
| CAPÍTULO 19 | 167 |
| CENTRIFUGATION STEP CONTROL OF CELLULOSE NANOCRYSTALS SUSPENSION BY pH AND TURBIDITY MEASUREMENTS | |
| Mayara Felix Santana | |
| Bárbara Castro Moreira | |
| Flávia Mitsue Yamashita | |
| Nilda de Fátima Ferreira Soares | |
| José Mauro de Almeida | |
| Alvaro Vianna Novaes de Carvalho Teixeira | |
| Deusanilde de Jesus Silva | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030419 | |
| CAPÍTULO 20 | 173 |
| ESTUDO TERMODINÂMICO DA ADSORÇÃO DO CORANTE CRISTAL VIOLETA EM NANOTUBOS DE CARBONO FUNCIONALIZADOS | |
| Leonardo Martins Vargas | |
| Gabriel Facciochi Dörtzbacher | |
| Guilherme Luiz Dotto | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030420 | |
| CAPÍTULO 21 | 181 |
| ESTUDO DA REOLOGIA E DA SALINIDADE DE MICROEMULSÕES À BASE DE GLICERINA PARA SEREM UTILIZADAS NA RECUPERAÇÃO DE PETRÓLEO | |
| Amanda Brito de Carvalho | |
| Fabiola Dias da Silva Curbelo | |
| Elayne Andrade Araújo | |
| Alfredo Ismael Curbelo Garnica | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030421 | |
| CAPÍTULO 22 | 196 |
| ORGANOFILIZAÇÃO DE ARGILAS BENTONÍICAS PARA APLICAÇÃO EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE MICROEMULSIONADA | |
| Renata Rodrigues Magalhães | |
| Roxana Pereira Fernandes de Sousa | |
| Alfredo Ismael Curbelo Garnica | |
| Fabiola Dias da Silva Curbelo | |
| Thaine Taumaturgo Caminha | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030422 | |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 23 | 201 |
| PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E VOLUMÉTRICAS DO QUEROSENE DE AVIAÇÃO E DO BIOQUEROSENE | |
| <p>Idila Rafaela Carvalho Gonçalves Ana Clara Cazarin Queiroz Luciana Loureiro de Pinho Rolemberg de Andrade Sílvia Maria Zanini Sebrão Krishnaswamy Rajagopal</p> | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030423 | |
| CAPÍTULO 24 | 210 |
| AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE TINTAS ACRÍLICAS COMERCIAIS E ADITIVADAS COM CARGA CONDUTORA | |
| <p>Alex da Silva Sirqueira Monica Cristina dos Santos Vieira Monica Feijó Naccache Stanley Pires de Alcântara</p> | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030424 | |
| CAPÍTULO 25 | 222 |
| EFEITO DA ADIÇÃO DA CINZA GASEIFICADA DE CARVÃO PULVERIZADO NA FORMULAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA | |
| <p>Gabryella Cerri Mendonça Cristiano Corrêa Ferreira</p> | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030425 | |
| CAPÍTULO 26 | 232 |
| TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SISTEMAS PARTICULADOS: DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFETIVA DE FERTILIZANTES GRANULADOS NA ESTAGNAÇÃO DE AR | |
| <p>Hugo Perazzini Maise Tonon Bitti Perazzini Rayssa Caroline Ribeiro Bernardes João Marcos Cardoso Silva</p> | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030426 | |
| CAPÍTULO 27 | 248 |
| DETERMINAÇÃO DA SOLUBILIDADE DA UREIA EM SOLUÇÕES AQUOSAS DE ETANOL | |
| <p>Raquel de Oliveira Silva Ana Paula Silva Capuci Raíssa Araújo de Oliveira Campos Ricardo Amâncio Malagoni</p> | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030427 | |
| CAPÍTULO 28 | 255 |
| CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO COM ALTAS VAZÕES E VISCOSIDADES ELEVADAS: UMA ALTERNATIVA TÉCNICA À LEGISLAÇÃO BRASILEIRA DE ROYALTIES E PARTICIPAÇÕES ESPECIAIS | |
| <p>Carlos Eduardo Ribeiro de Barros Barateiro Romulo Carlos da Silva Emerik</p> | |
| DOI 10.22533/at.ed.37119030428 | |
| SOBRE A ORGANIZADORA | 271 |

PROJETO DE HIDROCICLONES USANDO OTIMIZAÇÃO ROBUSTA E ESTUDO DO EFEITO DA ROBUSTEZ

Vitor Alves Garcia

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Química
Uberlândia – MG

Fran Sérgio Lobato

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Química
Uberlândia – MG

Luiz Gustavo Martins Vieira

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Química
Uberlândia – MG

RESUMO: Os hidrociclones são equipamentos utilizados em diversos setores industriais para promover a separação entre uma fase discreta, normalmente um sólido particulado, e uma fase contínua líquida. O desempenho destes equipamentos é determinado através de três características: poder de separação, concentração e consumo energético. Tais aspectos apresentam comportamento conflitante entre si e são altamente dependentes das dimensões do separador. Dessa forma, a determinação das dimensões de um hidrociclone que resultam em valores satisfatórios das características mencionadas constitui um problema de otimização multi-objetivo. Nos hidrociclones existem diversas fontes de incertezas nas medições e na

fabricação do equipamento, por essa razão é necessário a utilização do conceito de robustez para reduzir a sensibilidade dos resultados a pequenas perturbações no vetor de variáveis de projeto e/ou parâmetros. Assim, neste trabalho são estimados modelos das respostas eficiência total, razão de líquido e número de Euler do hidrociclone, de forma nominal (sem robustez) e robusta. Os dois tipos de modelos gerados são comparados quanto à sua sensibilidade a perturbações. Por fim, é realizado o projeto robusto das dimensões do hidrociclone para a obtenção de separadores de alto desempenho em todos os aspectos. Os resultados obtidos demonstram que a inserção de robustez no ajuste dos modelos os deixa menos sensível a perturbações, todavia, conforme esperado, reduz o valor do coeficiente de determinação. Além disso, na otimização das dimensões do hidrociclone observou-se que o aumento do nível de robustez reduz a diversidade dos hidrociclones ótimos obtidos. Finalmente, foram encontrados separadores de bom desempenho em todas as características consideradas.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrociclone, Otimização, Evolução Diferencial, Robustez.

ABSTRACT: The hydrocyclones are equipment used in multiple areas of industry to separate a discrete phase, normally a particulate solid, and a continuous liquid phase. The hydrocyclone's

performance is evaluated by three characteristics: separation and concentration capacity and energy demand. These aspects have a conflicting behavior with each other and present a high dependence with the separator's dimensions. Thus, the determination of a hydrocyclone's dimensions configures a multi-objective optimization problem. During the design of this equipment there are many uncertainties associated with measure and manufacture. In this case, it is necessary to use the robustness concept to determine results less sensible to perturbations in parameters and design variables vectors. In this work, mathematical models that represent the total efficiency, liquid ratio and Euler number are estimated in nominal (without robustness) or robust context. The estimated models are compared in terms of sensitivity to perturbations. Different optimization problems are formulated to obtain the hydrocyclone's dimensions in relation to separators performance. The results demonstrated that the robustness insertion lead with models less sensible to perturbations, but with the reduction of determination coefficient. Additionally, in the hydrocyclone's dimensions optimization, it was noticed that the increase of robustness level implies in reduction of diversity of obtained hydrocyclones. Finally, it was obtained separators with good performance in relation to separation and concentration capacity and energy demand.

KEYWORDS: Hydrocyclone, Optimization, Differential Evolution, Robustness.

1 | INTRODUÇÃO

Os hidrociclones são equipamentos largamente aplicados na indústria, cuja finalidade é promover a separação de uma fase discreta, que pode ser sólida ou líquida, de uma fase contínua líquida. Dentre as aplicações industriais deste tradicional equipamento de separação, pode-se citar o uso no processo de produção têxtil, em mineração, em petroquímica e em biocombustíveis.

Estes separadores são constituídos por uma seção cilíndrica, onde ocorre a alimentação da suspensão de forma tangencial, e uma seção cônica. O processo de separação nestes equipamentos ocorre devido à ação de uma força centrífuga, decorrente do movimento rotacional descrito pela suspensão dentro do equipamento e da diferença de densidade entre as fases. A força centrífuga faz com que as partículas maiores e mais densas da fase discreta sejam separadas da fase contínua e sejam conduzidas para a saída inferior do separador, denominada de *underflow*, enquanto que as partículas menores e menos densas saem junto com a maior parte da fase líquida pela saída de *overflow*, na parte superior do equipamento (SVAROVSKY, 1984).

Tradicionalmente, o desempenho das operações de hidrociclonagem é determinado pelo poder de separação, de concentração e consumo energético do equipamento (VIEIRA, 2006). Estas três características são altamente dependentes das dimensões geométricas do hidrociclone. Dessa forma, a busca por hidrociclones de bom desempenho em relação a estes três aspectos configura um problema de otimização multi-objetivo.

Normalmente, nos problemas de otimização não são levados em consideração

incertezas em relação às variáveis de projeto e/ou parâmetros. Neste contexto, pequenas perturbações podem fazer com que os resultados obtidos sejam bem diferentes dos obtidos de forma nominal (sem robustez). Segundo Taguchi (1984), define-se otimização robusta como uma estratégia capaz de produzir uma solução pouco sensível, sob determinadas condições, a pequenas alterações no vetor de variáveis de interesse. É importante ressaltar que uma solução robusta pode não coincidir com a solução nominal, sendo assim a solução robusta tende a ter um resultado “depreciado” em relação à solução nominal.

No caso dos hidrociclones, estas incertezas podem decorrer de imprecisões no processo de fabricação do equipamento, do desgaste das partes do separador por abrasão durante a operação ou mesmo devido às imprecisões na estimativa dos modelos que descrevem o comportamento do equipamento (GARCIA, 2018). Dessa forma, faz-se necessário a utilização de uma técnica para inserção de informações sobre incertezas no vetor de variáveis de projeto durante o processo de otimização de hidrociclones de modo que possa ser obtida uma solução menos sensível a pequenas perturbações.

Diante do que foi exposto, o presente trabalho tem por objetivo formular um problema de otimização multi-objetivo para analisar as respostas que representam a capacidade de separação e de concentração, bem como o consumo energético via determinação das variáveis geométricas que caracterizam o hidrociclone. Além disso, também objetiva-se associar o conceito de Média Efetiva – ME (DEB; GUPTA, 2006), ferramenta empregada para análise de robustez, ao algoritmo de Evolução Diferencial – ED (STORN; PRICE, 1995), ferramenta responsável pela determinação da configuração ótima de projeto.

2 | EVOLUÇÃO DIFERENCIAL E OTIMIZAÇÃO ROBUSTA

2.1 Evolução diferencial

O algoritmo de ED configura-se como uma das principais abordagens heurísticas para a resolução de problemas de otimização nos dias atuais. Dentre as vantagens deste tipo de abordagem pode-se citar (STORN; PRICE, 1995): *i*) técnica conceitualmente simples e de fácil implementação; *ii*) não exigem a avaliação de derivadas na busca pela solução ótima; *iii*) é reconhecidamente uma abordagem de busca global (pode escapar de ótimos locais). Por outro lado, apresenta como principal desvantagem o elevado número de avaliações da função objetivo em relação às abordagens clássicas (SARAMAGO, 1999; COELHO, 2003).

O algoritmo de ED é um método de otimização baseado no processo de seleção natural dos indivíduos na natureza. Dessa forma, o algoritmo avança de forma que novos indivíduos sejam gerados a partir de uma combinação de indivíduos da população previamente existente, ao mesmo tempo que os “piores” candidatos sejam

eliminados da população. Os principais passos deste algoritmo são descritos a seguir (STORN; PRICE, 1995):

- 1 – Define-se os parâmetros do algoritmo (tamanho da população, número de gerações, probabilidade de cruzamento, taxa de perturbação, estratégia empregada para a geração dos candidatos, número de variáveis de projeto e espaço de projeto);
- 2 – Gera-se uma população inicial (de forma aleatória e de acordo com o espaço de projeto definido pelo usuário) de possíveis soluções do problema de otimização;
- 3 – Aplica-se o operador de cruzamento para gerar novas soluções a partir de operações vetoriais entre os indivíduos (selecionados aleatoriamente) da população corrente;
- 4 – Avalia-se todas as soluções segundo as funções objetivo e seleciona-se os indivíduos com melhores valores destas funções para compor a próxima geração da população;
- 5 – Repete-se os passos 3 e 4 até que o critério de parada do algoritmo seja atingido (geralmente o número máximo de gerações é tomado como sendo o critério para finalizar o processo evolutivo).

2.2 Otimização robusta

Para avaliar o efeito da presença de incertezas durante o projeto do hidrociclone, será utilizado o conceito de ME. Este conceito consiste em analisar a influência de pequenas perturbações a partir da definição do parâmetro de robustez (δ). Assim, o valor da função objetivo relacionado a um indivíduo é determinado como sendo a média entre os valores deste candidato perturbado nas suas vizinhanças. Desta forma, o valor da média efetiva da função objetivo de uma determinada solução x é dado pela Equação 1.

$$fo_{eff} = \frac{1}{|Y_{\delta}(x)|} \int_{y \in Y_{\delta}(x)} f(y) dy \quad (1)$$

Na Equação 1, o parâmetro de robustez determina o tamanho da vizinhança $Y_{\delta}(x)$ gerada em torno da solução candidata x . O termo $|Y_{\delta}(x)|$ é o hipervolume desta vizinhança, f é a função objetivo original e y corresponde a um ponto genérico dentro da vizinhança gerada.

A avaliação analítica da integral dada na Equação 1 não é uma tarefa trivial. Neste cenário, deve-se empregar uma técnica numérica. Assim, gera-se, de forma aleatória, um conjunto finito de H soluções usando, por exemplo, o método de Monte Carlo ou o Hipercubo Latino, de modo esse conjunto possa ser empregado para a avaliação numérica desta integral. Nesta abordagem, minimiza-se a integral referente às perturbações realizadas nas vizinhanças do candidato a solução do problema, ao

invés de otimizar-se o próprio candidato (DEB; GUPTA, 2006).

3 | HIDROCICLONES

Conforme descrito anteriormente, os hidrociclones são equipamentos empregados para a separação de uma fase discreta (sólida ou líquida) de uma fase contínua líquida, com base na diferença de densidade entre as fases e na diferença de tamanho entre as partículas da fase discreta.

Os hidrociclones são, basicamente, constituídos por uma parte cilíndrica acoplada a uma parte cônica. As dimensões de cada parte (ver a Figura 1) são importantes no processo de separação, pois estão diretamente relacionadas com o poder de separação, concentração, consumo energético e capacidade do equipamento.

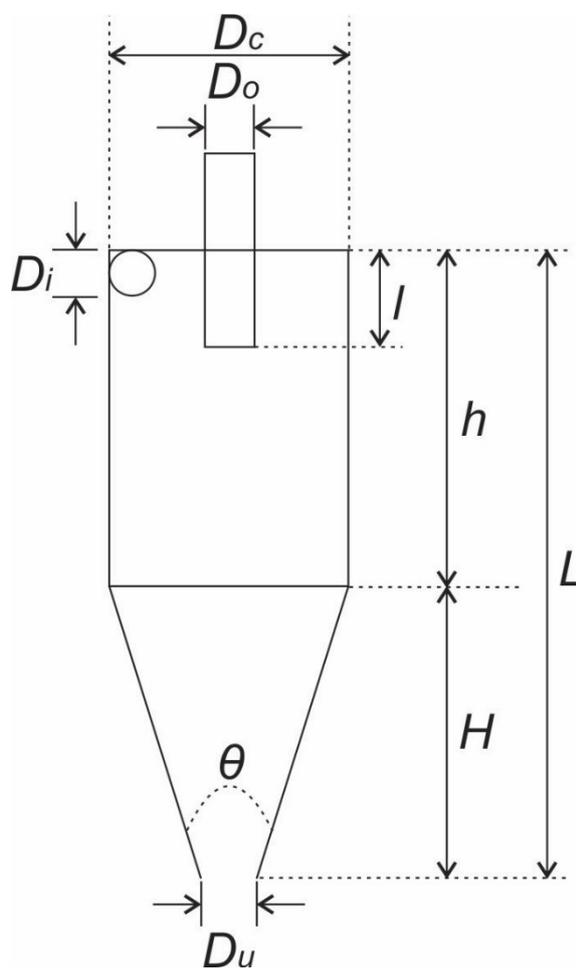


Figura 1 - Principais dimensões geométricas de um hidrociclone.

Na Figura 1, D_c é o diâmetro da parte cilíndrica, D_o é o diâmetro do tubo de *overflow*, D_i é o diâmetro interno do duto de alimentação, D_u é o diâmetro do orifício de *underflow*, L , H e h são, respectivamente, os comprimentos total, da parte cônica e da parte cilíndrica do hidrociclone, l é o comprimento da parte do duto de *overflow* interna ao cilindro e θ é o ângulo da parte cônica. Para fins de operação, a suspensão é alimentada tangencialmente na parte cilíndrica. Há ainda um tubo localizado axialmente

na parte superior que é por onde a suspensão diluída (*overflow*), dotada de partículas finas, é descarregada. Já a parte cônica possui um orifício inferior, que é o responsável pelo direcionamento da suspensão concentrada (*underflow*), constituída de partículas maiores e mais densas.

Em se tratando de hidrociclones, o trinômio energia-concentração-classificação deve ser sempre observado no que tange à viabilidade da operação unitária de hidrociclonagem, sendo estes quantificados, respectivamente, pelo Número de Euler (Eu), Razão de Líquido (R_L) e Eficiência Total (E_T). Sendo assim, para o projeto deste equipamento faz-se necessária a determinação de equações constitutivas que relacionam estas variáveis dependentes (Eu , R_L e E_T) com as dimensões geométricas do separador.

Além disso, o trinômio energia-concentração-classificação mencionado apresenta comportamento conflitante entre as três características. Ou seja, normalmente, ao melhorar-se o desempenho do separador em um desses quesitos, os outros dois são prejudicados. Dessa maneira, para se encontrar um equipamento com dimensões que conciliem esses três objetivos, faz-se necessária a realização de uma otimização multi-objetivo.

4 | FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PARA AJUSTE DOS MODELOS

Para a determinação do trinômio citado anteriormente em função das dimensões geométricas do hidrociclone, deve-se propor e resolver um problema de otimização. Este problema de otimização consiste na minimização do funcional f , isto é, obter o valor do vetor de variáveis de projeto (parâmetros do modelo) de modo a minimizar a diferença entre os valores experimentais e preditos pelo modelo, conforme a Equação 2.

$$f \equiv \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{exp}}} (y_i^{\text{exp}} - y_i^{\text{cal}}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m))^2}{(y_{\text{max}}^{\text{exp}})^2} \quad (2)$$

Em que y^{cal} e y^{exp} representam o valor da variável dependente (y) predito pelo modelo e o seu correspondente experimental, respectivamente. β_k ($k=1, \dots, m$) é o vetor que contém os m parâmetros que devem ser determinados, n_{exp} é o número de dados experimentais considerados no ajuste do modelo e $y_{\text{max}}^{\text{exp}}$ é o maior valor experimental observado para a resposta considerada na análise.

Para a resolução do problema proposto alguns pontos devem ser destacados:

1. As informações experimentais utilizadas para a determinação de cada equação constitutiva (R_L , Eu e E_T) foram obtidas por Salvador (2017), que estudou o efeito das principais dimensões geométricas de um hidrociclone, mediante utilização de 25 diferentes hidrociclones em um planejamento

composto central (PCC) e quartzito como material particulado (ver a Tabela 1).

| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Eu | R_L (%) | E_T (%) | | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | Eu | R_L (%) | E_T (%) |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|
| H_1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 5402 | 30,95 | 82,36 | H_{16} | +1 | +1 | +1 | +1 | 868 | 11,04 | 66,10 |
| H_2 | -1 | -1 | -1 | +1 | 4839 | 28,43 | 88,63 | H_{17} | $-\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 6270 | 17,44 | 75,92 |
| H_3 | -1 | -1 | +1 | -1 | 4315 | 33,04 | 85,11 | H_{18} | α | 0 | 0 | 0 | 1153 | 18,93 | 73,98 |
| H_4 | -1 | -1 | +1 | +1 | 3719 | 29,17 | 77,28 | H_{19} | 0 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 2741 | 42,12 | 80,21 |
| H_5 | -1 | +1 | -1 | -1 | 4060 | 7,45 | 76,08 | H_{20} | 0 | α | 0 | 0 | 1314 | 10,26 | 70,24 |
| H_6 | -1 | +1 | -1 | +1 | 3548 | 9,10 | 71,91 | H_{21} | 0 | 0 | $-\alpha$ | 0 | 3080 | 14,86 | 79,54 |
| H_7 | -1 | +1 | +1 | -1 | 3394 | 12,61 | 79,61 | H_{22} | 0 | 0 | α | 0 | 1538 | 18,76 | 76,10 |
| H_8 | -1 | +1 | +1 | +1 | 2934 | 9,95 | 67,13 | H_{23} | 0 | 0 | 0 | $-\alpha$ | 1994 | 19,93 | 79,93 |
| H_9 | +1 | -1 | -1 | -1 | 2176 | 30,06 | 85,76 | H_{24} | 0 | 0 | 0 | α | 1864 | 15,93 | 75,81 |
| H_{10} | +1 | -1 | -1 | +1 | 1884 | 29,26 | 83,44 | H_{25^*} | 0 | 0 | 0 | 0 | 1835 | 18,43 | 74,87 |
| H_{11} | +1 | -1 | +1 | -1 | 1696 | 33,48 | 86,20 | H_{25^*} | 0 | 0 | 0 | 0 | 1847 | 18,29 | 73,52 |
| H_{12} | +1 | -1 | +1 | +1 | 1400 | 29,77 | 80,59 | H_{25^*} | 0 | 0 | 0 | 0 | 1848 | 18,29 | 74,41 |
| H_{13} | +1 | +1 | -1 | -1 | 1272 | 8,48 | 73,40 | H_{25^*} | 0 | 0 | 0 | 0 | 1845 | 18,56 | 71,75 |
| H_{14} | +1 | +1 | -1 | +1 | 1099 | 9,58 | 66,32 | H_{25^*} | 0 | 0 | 0 | 0 | 1840 | 18,49 | 71,73 |
| H_{15} | +1 | +1 | +1 | -1 | 1056 | 12,92 | 76,66 | | | | | | | | |

Tabela 1 - Planejamento composto central de Salvador (2017).

*Replicas no centro. α (nível extremo do planejamento) igual a 1,66.

- As respostas analisadas foram obtidas a partir do estudo dos efeitos exercidos pelas variáveis codificadas de D_p , D_o , L e θ conforme mostrado nas Equações 3, 4, 5 e 6 (SALVADOR, 2017).

$$X_1 = \frac{(D_i / D_c) - 0,21}{0,05} \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{(D_o / D_c) - 0,27}{0,05} \quad (4)$$

$$X_3 = \frac{(L / D_c) - 5,8}{1,1} \quad (5)$$

$$X_4 = \frac{\theta - 14,5}{3,3} \quad (6)$$

- Os modelos ajustados são de segunda ordem e consideram o efeito de interação entre os pares de variáveis independentes, conforme mostrado na Equação 7. Nesta equação, y corresponde à variável resposta (E_T , R_L ou Eu), os termos β são os parâmetros do modelo, os quais deseja-se ajustar e os termos x são as variáveis dimensionais codificadas do PCC.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j>i}^4 \beta_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

- O algoritmo de ED foi usado nas otimizações e os parâmetros utilizados foram: 50 indivíduos na população; 500 gerações; estratégia 7 (STORN; PRICE, 1995) para a geração de candidatos; probabilidade de cruzamento

igual a 0,8; taxa de perturbação igual a 0,5. O algoritmo foi executado 10 vezes e selecionou-se a melhor solução dentre as execuções, além de calcular-se o desvio padrão entre elas. O espaço de projeto considerado foi: $-2000 < \beta_i < 2000$ ($i=1, \dots, 15$).

5. O conceito de ME foi incorporado às otimizações para inserir robustez na otimização. As otimizações foram realizadas considerando diferentes valores do parâmetro de robustez δ , sendo estes valores: 0,0% (solução nominal), 0,5%, 1,0%, 2,5%, 5,0%, 10,0%, 25,0% e 50,0% (soluções robustas). Para cada uma das variáveis de projeto, gerou-se um domínio definido a partir da variável desvio δ . Para o cômputo numérico da integral via método dos trapézios, foram consideradas 25 amostras geradas pelo Método de Monte Carlo. É importante ressaltar que para o caso nominal são necessárias $50+50 \times 500$ avaliações da função objetivo em cada execução. Já para o caso robusto, são necessárias $50+50 \times 500 \times 25$ avaliações da função objetivo.
6. Para mensurar a qualidade dos modelos obtidos foi calculado o coeficiente de determinação (r^2).

5 | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS FRENTE A PERTURBAÇÕES

Após os ajustes dos modelos de E_T , R_L e Eu , foi feita uma análise comparativa da sensibilidade dos modelos ajustados de forma nominal e robusta frente a perturbações nos parâmetros β do modelo. Dessa forma, foram geradas 100 amostras aleatórias em torno do vetor de parâmetros β de cada modelo (nominal e robusto) e foi avaliada a função objetivo f usada no ajuste dos modelos para cada uma das amostras geradas. Então, calculou-se a média e o desvio padrão da função objetivo f em cada caso. Este procedimento foi realizado para os modelos ajustados de forma nominal e robusta para cada uma das respostas ajustadas (E_T , R_L e Eu) considerando as seguintes magnitudes de perturbações: [0,0% 0,5% 1,0% 2,5% 5,0% 10,0% 25,0% 50,0%].

6 | OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DAS DIMENSÕES DO HIDROCICLONE

Os modelos de E_T , R_L e Eu ajustados de forma robusta (δ igual a 10,0%) foram usados como objetivos para a otimização robusta das variáveis geométricas do hidrociclone (D_p , D_o , L e θ). Estas otimizações também foram realizadas pelo algoritmo MODE - *Multi-objective Optimization Differential Evolution*, proposto por Lobato (2008). Este algoritmo consiste no algoritmo de ED associado ao conceito de dominância e de distância da multidão. Para a avaliação da robustez também se considerou o conceito de ME.

No algoritmo MODE foram considerados os seguintes parâmetros: 100 indivíduos na população; 500 gerações; estratégia 7 (STORN; PRICE, 1995) para a geração de candidatos; probabilidade de cruzamento igual a 0,9; taxa de perturbação igual a 0,9; taxa de redução igual a 0,9 e número de pseudo-curvas igual a 10. Foram consideradas ainda três restrições para assegurar que os hidrociclones obtidos tivessem bons

desempenhos nas três variáveis resposta analisadas ($70\% < E_T < 100\%$; $0 < R_L < 10\%$; $0 < Eu < 5000$) e uma restrição para assegurar a existência dos hidrociclones obtidos, que garantia que o comprimento total do hidrociclone era maior que o comprimento da parte cônica ($L > H$).

As otimizações foram realizadas considerando quatro diferentes valores do parâmetro de robustez δ (0%, 5%, 10% e 25%) para avaliar o efeito de inserção de robustez na qualidade dos resultados obtidos. Além disso, o número de amostras geradas nas vizinhanças dos pontos na avaliação da ME era de 250 amostras.

Por fim, foram considerados três casos, cada um com dois objetivos a serem otimizados, conforme mostrado na Tabela 2.

| | |
|--------|-----------------------------|
| Caso 1 | Máxima E_T e mínima R_L |
| Caso 2 | Máxima E_T e mínimo Eu |
| Caso 3 | Mínima R_L e mínimo Eu |

Tabela 2: Casos de otimização robusta considerados

7 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Ajuste dos modelos de forma nominal e robusta

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes das equações constitutivas, o valor da função objetivo da melhor solução e o coeficiente de determinação dos modelos de Eu , R_L e E_T estimados pelo algoritmo de ED considerando $\delta=0$ e $\delta=0,10$, respectivamente.

Para o caso nominal, observou-se que os resultados obtidos (função objetivo e coeficiente de determinação) estão em concordância com aqueles obtidos por Salvador (2017). Quando um determinado nível de robustez é inserido no processo de estimação dos parâmetros, nota-se um aumento no valor da função objetivo e uma diminuição do coeficiente de determinação. Este resultado já era esperado, uma vez que, na prática, a solução robusta dificilmente coincidirá com a solução nominal. Esta depreciação do valor do coeficiente de determinação fica mais evidente no caso da eficiência total.

| | Eu | | R_L | | E_T | |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | $\delta=0,00$ | $\delta=0,10$ | $\delta=0,00$ | $\delta=0,10$ | $\delta=0,00$ | $\delta=0,10$ |
| β_0 | 1857,70970 | 1998,18700 | 18,42910 | 18,05917 | 73,25794 | 71,90346 |
| β_1 | -1360,04325 | -1360,63150 | 0,29487 | 0,22470 | -0,59698 | -0,59979 |
| β_2 | -444,63931 | -441,18469 | -10,03494 | -10,08844 | -5,05389 | -5,00408 |
| β_3 | -346,57152 | -349,80655 | 1,16802 | 1,11749 | -0,69326 | -0,72131 |
| β_4 | -153,14804 | -163,30495 | -0,89758 | -0,78278 | -2,35351 | -2,17675 |
| β_{11} | 662,09115 | 622,65433 | -0,10152 | 0,05155 | 0,61326 | 1,03084 |

| | | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| β_{22} | 50,89553 | 36,75636 | 2,80602 | 2,93584 | 0,71275 | 1,04163 |
| β_{33} | 153,05252 | 143,14555 | -0,59946 | -0,53972 | 1,65460 | 1,95465 |
| β_{44} | 15,27000 | -18,45947 | -0,19205 | -0,12331 | 1,67352 | 2,02879 |
| β_{12} | 92,40073 | 88,59113 | 0,12054 | 0,08349 | -0,92865 | -0,77343 |
| β_{13} | 129,61176 | 125,56159 | 0,06381 | -0,04357 | 0,65563 | 0,82375 |
| β_{14} | 73,69006 | 76,90951 | 0,13411 | 0,18571 | -0,45953 | -0,47997 |
| β_{23} | 90,29327 | 98,41652 | 0,32052 | 0,33717 | 0,79997 | 1,03045 |
| β_{24} | 25,96576 | 33,70117 | 0,56945 | 0,58276 | -1,54920 | -1,25597 |
| β_{34} | 0,12434 | -7,36622 | -0,72215 | -0,80508 | -1,82373 | -1,76100 |
| f | 0,00001 | 0,00002 | 0,00211 | 0,02263 | 0,00908 | 0,07217 |
| r^2 | 0,99158 | 0,98822 | 0,99842 | 0,99768 | 0,92740 | 0,91299 |

Tabela 3 - Coeficientes dos modelos ajustados para E_u , R_L e E_T

7.2 Análise de sensibilidade dos modelos nominal e robusto

Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados os resultados da sensibilidade dos modelos ajustados de forma nominal e robusta frente a perturbações. Nestas figuras são mostrados os gráficos da média e do desvio padrão da função objetivo f , usada para ajustar os modelos, em função da magnitude da perturbação feita sobre os parâmetros dos mesmos. A Figura 2 corresponde aos resultados desta análise para a eficiência total, a Figura 3 para a razão de líquido e a Figura 4 para o número de Euler.

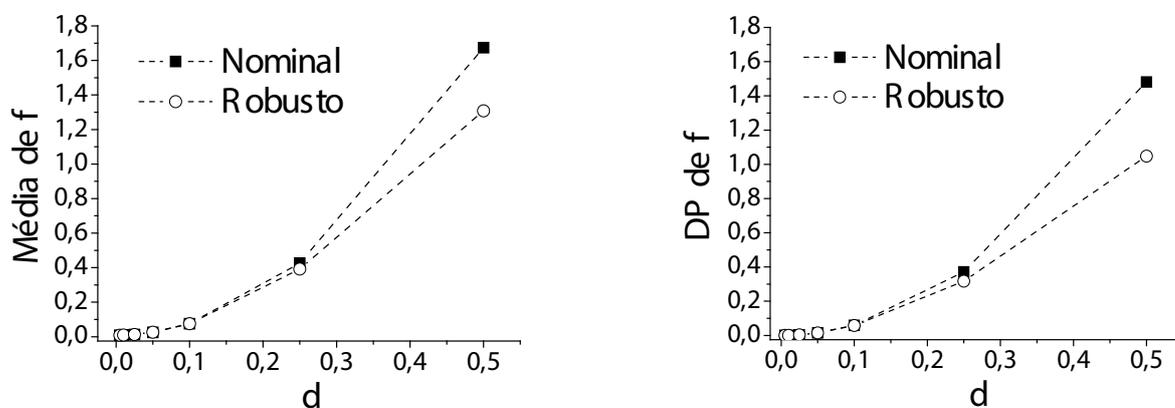


Figura 2 - Gráficos da média e do desvio padrão da função objetivo para os modelos nominal e robusto de E_T

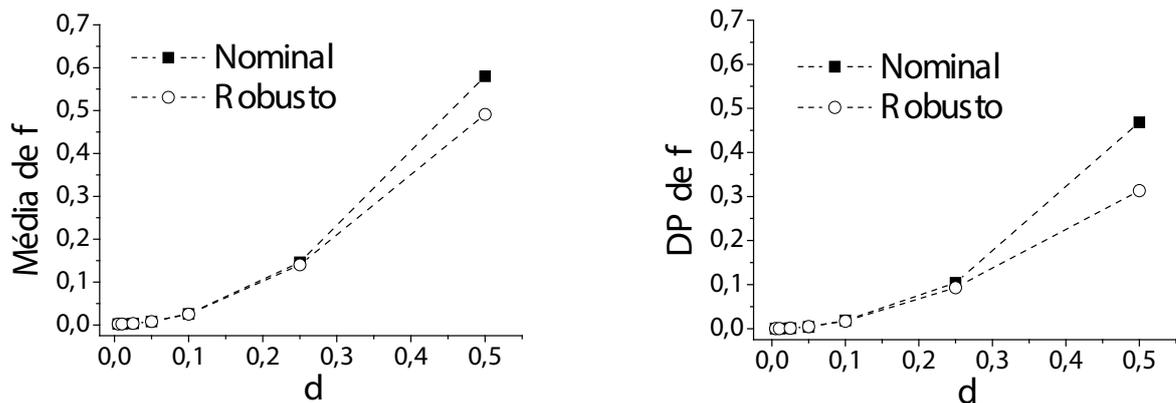


Figura 3 - Gráficos da média e do desvio padrão da função objetivo para os modelos nominal e robusto de R_L .

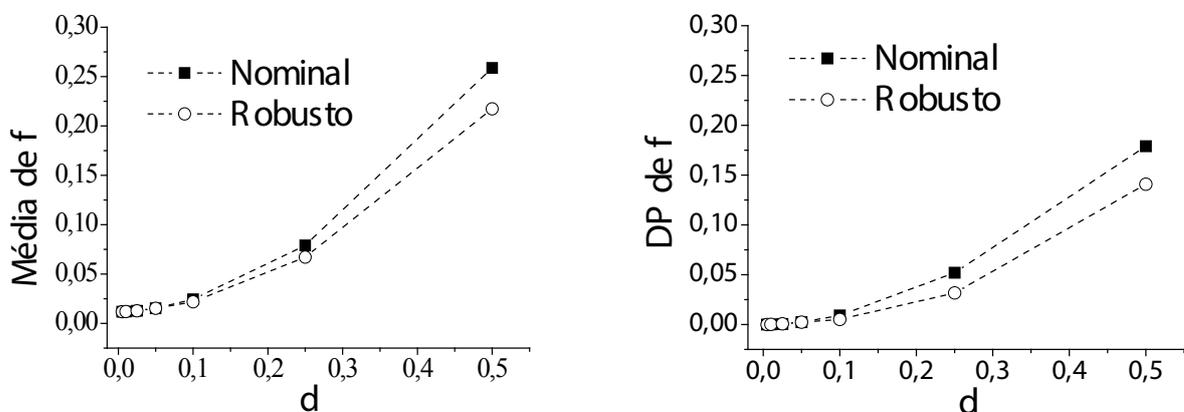


Figura 4 - Gráficos da média e do desvio padrão da função objetivo para os modelos nominal e robusto de Eu .

De forma geral, observa-se que em todos os gráficos quanto maior o valor de $\bar{\delta}$, maiores são os valores de média e desvio padrão de f do modelo nominal quando comparado com o modelo robusto. Neste caso, verifica-se que a solução robusta é menos sensível, sob o efeito de determinadas perturbações, quando comparada a sua correspondente nominal, justificando a utilização de uma abordagem específica para a avaliação da presença de incertezas no vetor de variáveis de projeto.

Em termos do número de avaliações da função objetivo, observa-se que a metodologia robusta requer mais avaliações do que a sua correspondente nominal. Este resultado se deve às avaliações necessárias para a determinação da integral. Assim, ao se desejar obter uma solução robusta, faz-se necessário um número superior de avaliações da função objetivo em relação à abordagem nominal.

7.3 Otimizações robustas das dimensões do hidrociclone

Nas Figuras 5, 6 e 7 são apresentadas as curvas de Pareto (solução do problema de otimização multi-objetivo) obtidas pela aplicação do algoritmo MODE considerando os diferentes valores para $\bar{\delta}$ (0%, 5%, 10% e 25%).

A Figura 5 corresponde às curvas de Pareto obtidas para as otimizações do Caso 1, em que se tinha como objetivos maximizar a eficiência total e minimizar a razão de líquido.

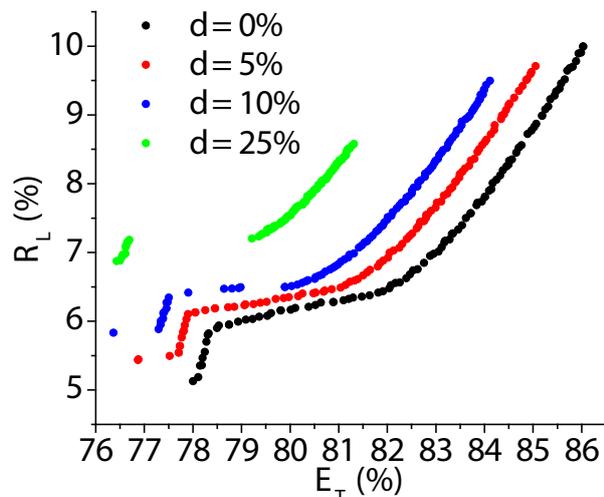


Figura 5 – Curvas de Pareto dos hidrociclones obtidos nas otimizações do Caso 1.

Observa-se na Figura 5 que os hidrociclones obtidos apresentam razões de líquido que variam entre 5 e 10% e eficiências totais entre 76 e 86%. Sendo equipamentos com valores satisfatórios para as duas respostas.

A Figura 6 mostra os resultados obtidos nas otimizações do Caso 2, em que desejava-se maximizar a eficiência e minimizar o número de Euler.

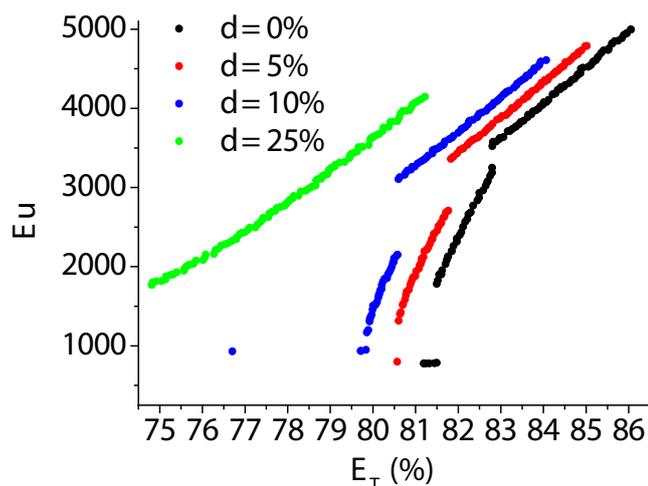


Figura 6 – Curvas de Pareto dos hidrociclones obtidos nas otimizações do Caso 2.

Na Figura 6, observa-se que o número de Euler dos hidrociclones encontra-se entre 500 e 5000 e suas eficiências estão entre 75 e 86%. Sendo equipamentos com bom poder de separação e baixo consumo energético simultaneamente.

A Figura 7 exhibe os resultados obtidos das otimizações nominal e robustas para

o Caso 3 (minimização da razão de líquido e do número de Euler).

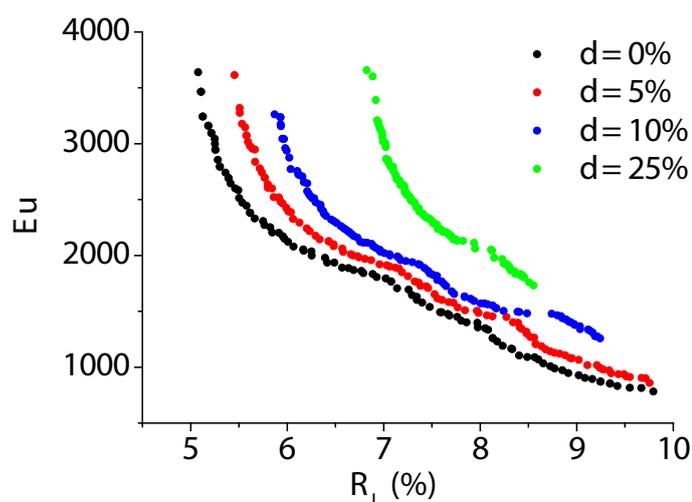


Figura 7 – Curvas de Pareto dos hidrociclones obtidos nas otimizações do Caso 3.

Observa-se na Figura 7 que o número de Euler varia entre 500 e 4000, enquanto que a razão de líquido dos hidrociclones está entre 5 e 10%. Dessa forma, os separadores obtidos neste caso também apresentaram valores satisfatórios das respostas otimizadas.

De forma geral, nota-se também que em todos os três casos estudados, os hidrociclones obtidos apresentam desempenho dentro do desejado, podendo ser considerados equipamentos de alto poder de separação e de concentração e de baixo consumo energético.

Além disso, é possível perceber que a inserção de robustez no problema de otimização gera um afastamento cada vez maior da curva de Pareto em relação à curva nominal ($\delta = 0\%$). Ademais, à medida que o parâmetro de robustez aumenta, existe uma tendência em reduzir-se o tamanho das curvas de Pareto, ou seja, os pontos ótimos obtidos tendem a se concentrar em regiões cada vez menores do espaço dos objetivos. Na prática, isto implica em uma variedade menor de hidrociclones de alto desempenho obtidos, sendo este o custo do ganho de confiabilidade nos resultados, promovido pela inserção de robustez no problema.

Finalmente, nestes gráficos é possível notar o comportamento conflitante entre os objetivos para os três casos, isto é; na medida em que se melhora um objetivo, simultaneamente piora-se o outro.

8 | CONCLUSÃO

Na presente contribuição, uma estratégia sistemática para a determinação de equações constitutivas utilizadas para avaliação do desempenho de hidrociclones, bem como a otimização multi-objetiva robusta considerando o algoritmo de Evolução

Diferencial (mono e multi-objetivo) e o conceito de Média Efetiva foi proposta.

Na estimativa dos modelos para a eficiência total (E_T), para a razão de líquido (R_L) e para o número de Euler (Eu) usando otimização com diferentes níveis de robustez, observou-se que o aumento do valor do parâmetro de robustez implica no aumento do valor da função objetivo e do coeficiente de determinação. Por outro lado, ao avaliar-se a sensibilidade dos modelos ajustados de forma robusta e nominal, concluiu-se que modelos robustos são menos sensíveis a perturbações em seus parâmetros, tendo uma maior confiabilidade.

Na realização das otimizações das dimensões do hidrociclone, foram obtidos separadores com bons desempenhos nas três respostas analisadas. Ademais, observou-se que a inserção de níveis maiores de robustez no processo de otimização leva ao afastamento da curva de Pareto robusta em relação a curva nominal. Um outro efeito do aumento do parâmetro de robustez é o encurtamento da curva de Pareto, fazendo com que os pontos obtidos se concentrem em regiões cada vez menores do espaço de objetivos, o que na prática significa uma menor diversidade de hidrociclones de alto desempenho. Dessa forma, a inserção de robustez no problema de otimização para obtenção dos hidrociclones é benéfica no sentido de ganho de confiabilidade nos resultados, todavia, apresenta os efeitos colaterais mencionados.

Finalmente, ressalta-se que ao se obter uma solução robusta, o número de avaliações da função objetivo é bem superior ao requerido para a obtenção da solução nominal (sem robustez).

REFERÊNCIAS

COELHO, L. S. **Fundamentos, potencialidades e aplicações de algoritmos evolutivos**. 2. ed. São Carlos, 2003. Notas em Matemática Aplicada.

DEB, K.; GUPTA, H. **Introducing robustness in multi-Objective optimization**. *Evolutionary Computation*, v. 14, n. 4, p. 463-494, 2006.

GARCIA, V. A. **Projeto de hidrociclones usando otimização robusta e evolução diferencial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

LOBATO, F. S. **Otimização multi-objetivo para o projeto de sistemas de engenharia**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

SALVADOR, F. F. **Otimização geométrica de hidrociclones com cilindros e cones permeáveis**. 2017. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SARAMAGO, S. F. P. **Métodos de otimização randômica: algoritmos genéticos e simulated annealing**. SBMAC, São Carlos, 1999. Notas em Matemática Aplicada, v. 6.

STORN, R.; PRICE, K. **Differential evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces**. International Computer Science Institute, Berkeley, CA, 1995.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**. Holt, Rinehart & Winston. Eastbourne, UK, 1984.

TAGUCHI, G. **Quality engineering through design optimization**. Kraus International Publications. New York, 1984.

VIEIRA, L. G. M. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes**. 2006. 297 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

SOBRE A ORGANIZADORA

CARMEN LÚCIA VOIGT Doutora em Química na área de Química Analítica e Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Especialista em Química para a Educação Básica pela Universidade Estadual de Londrina. Graduada em Licenciatura em Química pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Experiência há mais de 10 anos na área de Educação com ênfase em avaliação de matérias-primas, técnicas analíticas, ensino de ciências e química e gestão ambiental. Das diferentes atividades desenvolvidas destaca-se uma atuação por resultado, como: supervisora de laboratórios na indústria de alimentos; professora de ensino médio; professora de ensino superior atuando em várias graduações; professora de pós-graduação *lato sensu*; palestrante; pesquisadora; avaliadora de artigos e projetos; revisora de revistas científicas; membro de bancas examinadoras de trabalhos de conclusão de cursos de graduação. Autora de artigos científicos. Atuou em laboratório multiusuário com utilização de técnicas avançadas de caracterização e identificação de amostras para pesquisa e pós-graduação em instituição estadual.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-237-1

