



**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 BENTONÍTICAS 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 Silvia 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

ENGENHARIA DE PROCESSOS: DIMENSIONAMENTO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SISTEMAS DE EVAPORAÇÃO MÚLTIPLO EFEITO DE INDÚSTRIAS DE CELULOSE *KRAFT*

Jamilly Marques Gasparoni

in memoriam

Universidade Federal de São João del-Rei,
Campus Alto Paraopeba, Departamento de
Engenharia Química e Estatística
Ouro Branco – MG

Cássia Regina Santos Nunes Almeida

Universidade Federal de São João del-Rei,
Campus Alto Paraopeba, Departamento
das Engenharias de Telecomunicações e de
Mecatrônica / Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de
Engenharia Elétrica

Ouro Branco / Belo Horizonte – MG

Gustavo Matheus de Almeida

Universidade Federal de Minas Gerais, Escola
de Engenharia, Departamento de Engenharia
Química
Belo Horizonte – MG

RESUMO: A Engenharia de Processos é a engenharia de sistemas para a indústria de processos. Com a sua abordagem multidisciplinar e sistemática, o seu objetivo final é gerar conhecimento sobre as operações. Com a crescente complexidade dos processos químicos e das restrições sobre aspectos econômicos, de segurança operacional e de produção limpa, o seu papel é ainda mais fundamental. No presente trabalho, após

a modelagem matemática e validação de um sistema de evaporação múltiplo efeito de indústrias de celulose *Kraft*, exploraram-se as suas etapas de dimensionamento de equipamentos, de simulação de novos cenários e de análise de sensibilidade de variáveis-chave de processo.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de processos químicos, Engenharia de processos, Sistema de evaporação múltiplo efeito, Dimensionamento, Simulação, Análise de sensibilidade

ABSTRACT: Process Engineering is the systems engineering for the process industry. With its multidisciplinary and systematic approach, its ultimate goal is to generate knowledge about operations. With the increasing complexity of chemical processes and restrictions on economic, operational safety and clean production, its role is even more fundamental. In the present work, after the mathematical modeling and validation of a multiple-effect evaporation system of *Kraft* pulp mills, the steps of equipment sizing, simulation of new scenarios and sensitivity analysis of key process variables were explored.

KEYWORDS: Chemical process analysis, Process engineering, Multiple-effect evaporation system, Design, Simulation, Sensitivity analysis

1 | INTRODUÇÃO

Com o advento do computador digital nos anos 40, mudou-se, por completo, a capacidade de resolução de problemas. A partir de uma representação formal do sistema de interesse, passou-se a empregar um procedimento algorítmico baseado em expressões lógicas e equações matemáticas (KLATT; MARQUARDT, 2009). Nesse contexto, surgiu a Engenharia de Sistemas de Processos (PSE; *Process Systems Engineering*), ou simplesmente Engenharia de Processos, como uma disciplina da Engenharia Química. Para melhor entendimento, citam-se os seus dois pilares: a Teoria Geral de Sistemas e a Engenharia de Sistemas.

A Teoria Geral de Sistemas define, independentemente de contexto, o que é um *sistema*: um conjunto de unidades básicas, de comportamento conhecido, cujo foco é o entendimento das interações entre elas. A Engenharia de Sistemas refere-se aos aspectos necessários para a operação de um sistema, desde a formulação do problema até a avaliação de seu desempenho. A partir desses conceitos, dado um contexto de aplicação, como o de Engenharia Química, é necessário desenvolver métodos e ferramentas para o projeto (síntese) e a análise (o foco deste capítulo) de seus sistemas (os processos químicos). A sistematização do projeto e da análise de processos é decisiva para uma operação eficiente. A Figura 1 ilustra ambos os objetivos, conhecido o modelo do processo ou do produto. Em relação à análise (problema direto), dado o fluxograma do processo, os equipamentos e os dados de operação (a estrutura e morfologia molecular do reagente), o modelo é usado para prever índices de desempenho do processo (a estrutura, morfologia e funcionalidade do produto), a partir de simulações. Em relação ao projeto (problema inverso), de modo a se atender índices de desempenho do processo (propriedades de interesse do produto), o modelo é usado para definir as condições de entrada do processo ou do produto (KLATT; MARQUARDT, 2009). Desse modo, PSE é a engenharia de sistemas para a indústria de processo, e refere-se ao tratamento, de modo sistemático, de seu comportamento em geral. Sargent (2005) descreve a engenharia química como a “Engenharia de sistemas aplicada a problemas de processos industriais”.

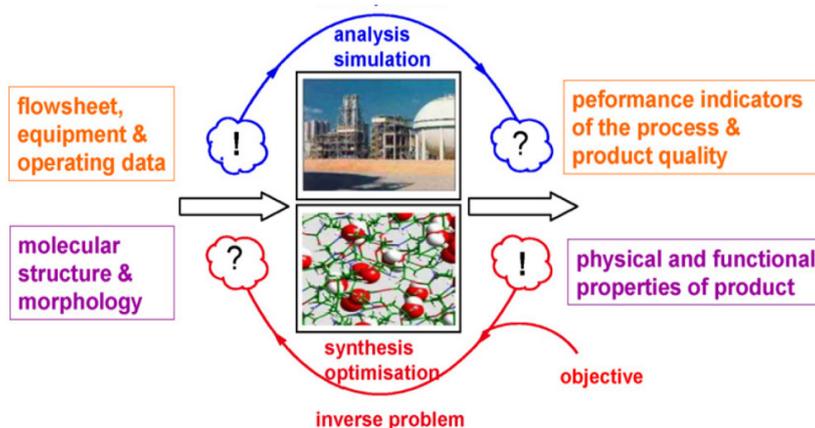


Figura 1: Síntese e análise de processo e produto, dado um modelo conhecido.
(Fonte: Klatt e Marquardt (2009))

Há um histórico de avanços em PSE (*Process Systems Engineering*) desde os anos 50, principalmente por causa dos impactos, econômico e social, das indústrias de óleo e gás. Utilizou-se esse termo, pela primeira vez, em 1961, em um volume especial de um simpósio da AIChE (*American Institute of Chemical Engineers*). Porém, a sua difusão aconteceu apenas a partir de um primeiro simpósio internacional, em Kyoto, no Japão, em 1982 (GLAVIC, 2012). Segundo Takamatsu (1983), “PSE é um campo acadêmico e tecnológico relacionado a metodologias para decisões em Engenharia Química.” Essas decisões referem-se ao planejamento, projeto, operação e controle de operações unitárias, processos químicos, ou da indústria química como um todo. A Figura 2 mostra o conceito de PSE segundo o autor, a partir de um conjunto de pilares: os fundamentos de engenharia química (termodinâmica, cinética de reação etc), a engenharia de equipamentos (reator, separador etc), os processos industriais (petroquímicos, papel e celulose etc) e as cadeias de valor (fábrica, política energética, questões sócio-econômicas). Portanto, PSE não diz respeito apenas ao processo industrial em si; porém, à cadeia de valor em seu entorno. Nessa direção, segundo a definição mais abrangente de Grossmann e Westerberg (2000), “PSE é uma série de métodos e ferramentas para melhorar o processo de tomada de decisão em relação à criação e operação da cadeia de valor de produtos químicos, ou seja, à descoberta, projeto, manufatura e distribuição de produtos químicos, em um contexto de objetivos conflitantes”. Segundo Glavic (2012), “o foco de PSE é, além do projeto, operação e controle, a otimização de processos químicos, físicos e biológicos, com o auxílio sistemático de métodos computacionais”. Portanto, o leque atual de PSE reúne os mais variados setores industriais, como por exemplo, petroquímico, mineração, material avançado, alimentício, farmacêutico e biotecnológico.

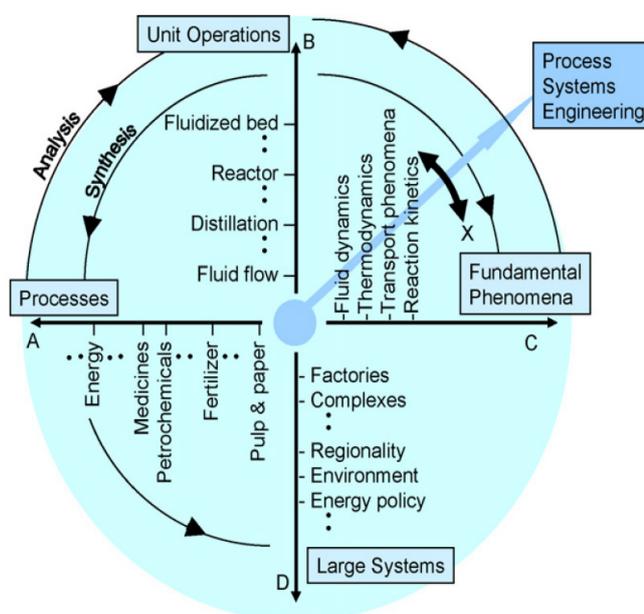


Figura 2: Natureza da Engenharia de Sistemas de Processos.

(Fonte: Takamatsu (1983))

PSE é uma disciplina com uma interface entre engenharia química, ciência da computação e métodos matemáticos. Combinam-se essas áreas para a construção, a implementação e a resolução dos modelos das unidades de processamento. Com a integração desses modelos, obtém-se o comportamento global do processo químico. Portanto, o foco de PSE é desenvolver metodologias e ferramentas para a modelagem, a simulação e a otimização de processos químicos, com o objetivo final de projeto, operação e controle de processos e produtos. Exemplos de aplicações: avaliação de rotas de produção (etapa de síntese) e de cenários de operação ou de falhas (etapa de análise). PSE tem se mostrado uma abordagem poderosa e flexível para o entendimento de sistemas químicos complexos (KLATT; MARQUARDT, 2009).

2 | OBJETIVO

O foco é a Análise de processos químicos. O objetivo é demonstrar o seu procedimento sistemático para o dimensionamento de equipamentos, a simulação de cenários operacionais e a análise de sensibilidade sobre variáveis-chave em processos. O estudo de caso é o sistema de evaporação múltiplo efeito de indústrias de celulose *Kraft*. Esse capítulo é baseado em Jamilly (2014) e Jamilly et al. (2017).

3 | SISTEMA DE EVAPORAÇÃO MÚLTIPLO EFEITO

O sistema de evaporação múltiplo efeito é uma das unidades de processamento de indústrias de celulose *Kraft*. O processo *Kraft* é o principal meio de obtenção de polpa de celulose, a matéria-prima para a fabricação de papel, em todo o mundo.

A etapa inicial desse processo é a polpação (cozimento) dos cavacos (pequenos pedaços) de madeira, cujo produto principal é a polpa de celulose, e cujo sub-produto é uma solução aquosa com compostos orgânicos (lignina, entre outros) e compostos inorgânicos de sódio e enxofre, denominada licor fraco. Essa notação é devido ao seu baixo teor de sólidos, entre 15 e 20% em massa. A viabilidade econômica do processo *Kraft* depende da recuperação e regeneração desses compostos inorgânicos para reuso na etapa de polpação. A primeira etapa nessa direção é a combustão desse licor em uma caldeira; porém, por causa de sua grande quantidade de água, é necessário, primeiramente, concentrá-lo. Esse é o papel do sistema de evaporação múltiplo efeito, isto é, aumentar a concentração do licor fraco acima de 60% em massa (VAKKILAINEN, 2000; SENAI, 1988).

O princípio dessa operação é a evaporação de parte da água do licor, que ocorre em um conjunto de trocadores de calor em série, denominados evaporadores. Para uma operação mais eficiente, o calor latente do vapor vivo (vapor de fonte externa; geralmente, a caldeira) ou do evaporado (a água evaporada do licor) do efeito anterior é usado como meio de aquecimento no efeito subsequente, à menor pressão. Esse

aproveitamento energético é o princípio fundamental de um sistema de evaporação múltiplo efeito. Um efeito é composto por um ou mais evaporadores (HOLMLUND; PARVIAINEN, 1999; VENKATESH; NGUYEN, 1985). A Figura 3 é um esquema com a configuração do sistema de evaporação múltiplo efeito usado como estudo de caso, composto por 6 efeitos (a quantidade usual), cada um com um evaporador. Tem-se a alimentação do licor fraco (ou diluído) no efeito 5 e a saída do licor forte (concentrado) no efeito 1 (ou seja, $5 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$). A sequência do fluxo de vapor é direta, com a alimentação de vapor vivo no efeito 1, e a saídas de evaporado (oriundo do efeito 6) e de condensado (oriundo do efeito 5) no efeito 6 (KUMAR et al., 2013).

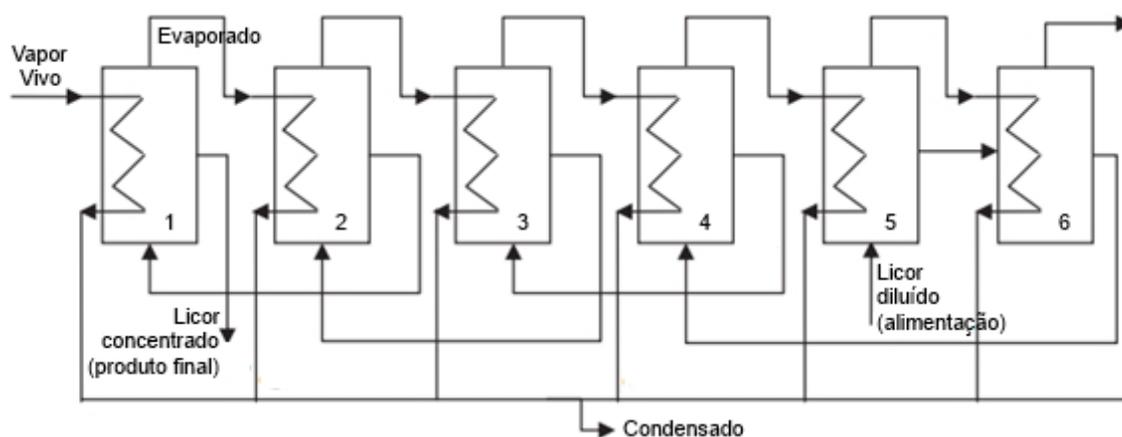


Figura 3: Esquema do sistema de evaporação de múltiplo efeito usado como estudo de caso.
(Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2013))

4 | METODOLOGIA

A Análise de processos químicos é composta por duas etapas principais, com suas respectivas sub-etapas, conforme a seguir (PERLINGEIRO, 2011). Com fins didáticos, optou-se por apresentar cada sub-etapa de modo combinado com os resultados (seção subsequente).

- **Etapas Preparatórias**
 - Reconhecimento do processo
 - Modelagem matemática
 - Estimacão de propriedades físicas e coeficientes técnicos
- **Etapas Executivas**
 - Dimensionamento
 - Simulacão
 - Análise de sensibilidade

5 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 Etapas Preparatórias

Reconhecimento do processo: Refere-se à identificação dos equipamentos, das correntes de processo e de sua estrutura geral (reciclos etc), conforme o fluxograma do sistema de evaporação múltiplo efeito do estudo de caso (Figura 3).

Modelagem matemática do processo: Diz respeito à construção do modelo matemático do processo a partir dos modelos dos equipamentos e da estrutura do fluxograma de processo. Para o estudo de caso, o modelo matemático consiste em equações de balanço de massa para o vapor (Equação 1), o licor (Equação 2) e o soluto do licor (Equação 3); equações de balanço de energia para o vapor (Equação 4) e o licor (Equação 5), em cada efeito, conforme o princípio de conservação: acúmulo = entrada - saída + geração - consumo ; e na equação de capacidade (Equação 6), com a descrição global de transferência de calor em cada evaporador. Ao substituir as Equações 1 e 2 nas Equações 4 e 5, respectivamente, e igualá-las à Equação 6, obtêm-se duas equações, uma para o vapor e outra para o licor, para cada efeito. Desse modo, o modelo matemático final é composto por 13 equações, ao se considerar ainda a equação de balanço global de sólidos (Equação 3), e 19 variáveis (KUMAR et al., 2013; MCCABE et al., 2005). No quadro a seguir, a notação, os subscritos e as considerações do modelo matemático.

Notação: \dot{n} = vazão mássica (kg/s); X = concentração de sólidos do licor; H = entalpia específica (kJ/kg); q = taxa de transferência de calor (kJ/s); U = coeficiente global de transferência de calor ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$), uma medida da resistência total ao fluxo de calor do meio de aquecimento para o licor; A = área de troca térmica (m^2); T = temperatura ($^\circ C$).

Subscritos: e , s , lic , liq , vap , sat , e as , entrada, saída, licor, líquido, vapor, saturado e superaquecido, respectivamente.

Considerações: (1) Vapor de saída como líquido saturado (a partir das Equações 1 e 4, $q_s = \dot{m} \cdot \gamma$, em que $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$ e γ = calor latente); (2) Não há perda de calor ($q_s = q_e$); (3) Não há perda de sólidos do licor (Equação 3); (4) Coeficientes globais de transferência de calor (U), constantes ([1160 (efeito 1), 1220, 1280, 1335, 1365, 1400 (efeito 6)] $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$); (5) Configuração do fluxo do licor: efeito 5 (alimentação do licor diluído) \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow efeito 1 (saída do licor concentrado); (6) Configuração do fluxo de vapor: efeito 1 (alimentação de vapor vivo) \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow efeito 6 (saídas de evaporado e de condensado) (KUMAR et al., 2013).

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s + (\dot{m}_e - \dot{m}_s) \quad (2)$$

$$\dot{m}_e \cdot X_e = \dot{m}_s \cdot X_s \quad (3)$$

$$\dot{m}_e \cdot H_e = \dot{m}_s \cdot H_s + q_s \quad (4)$$

$$\dot{m}_e \cdot H_e + q_e = \dot{m}_s \cdot H_s + (\dot{m}_e - \dot{m}_s) \cdot H_s \quad (5)$$

$$q = U \cdot A \cdot (T_{vap,sat} - T_{lic,s}) \quad (6)$$

Ainda calcularam-se os índices usuais de desempenho de sistemas de evaporação múltiplo efeito, conforme as Equações 7 a 9 (MCCABE et al., 2005).

$$economia\ de\ vapor = massa_{\acute{a}gua\ evaporada} / massa_{vapor\ vivo} \quad (7)$$

$$capacidade\ de\ evapora\c{c}\tilde{a}o = massa_{\acute{a}gua\ evaporada} / \Delta t \quad (8)$$

$$consumo\ de\ vapor = capacidade / economia \quad (9)$$

Estimação de propriedades físicas e coeficientes técnicos: Refere-se à estimação de parâmetros e coeficientes contidos no modelo matemático. Para o licor, empregaram-se as correlações experimentais a seguir (HOLMLUND; PARVIAINEN, 1999; MASSE et al., 1986): Massa específica (kg/m³) (Equação 10), calor específico (kJ/(kg·K)) (Equação 11), viscosidade cinemática (mm²/s) (Equação 12), entalpia específica (kJ/kg) (Equação 13), e elevação do ponto de ebulição (EPE) (Equação 14). O EPE é a diferença entre as temperaturas de ebulição do licor e da água pura à mesma pressão, dado o teor de sólidos do licor. Observa-se que as propriedades do licor são função de sua concentração (X) e temperatura (T).

$$\rho = (997 + 649 \cdot X)[1,008 - 0,237 \cdot (T_{lic}/1000) - 1,94 \cdot (T_{lic}/1000)^2] \quad (10)$$

$$c_p = 4,216 \cdot (1 - X) + [1,675 + (3,31 \cdot T_{lic})/1000] \cdot X + (4,87 - 20 \cdot T_{lic}/1000) \cdot (1 - X) \cdot X^3 \quad (11)$$

$$\mu = \exp((-2,4273 + 3,3532 \cdot X + 3,7654 \cdot X^2 - 2,4907 \cdot X^3) + (6,1347e7 - 5,442e7 \cdot X + 21,915e7 \cdot X^2 + 17,042e7 \cdot X^3)/T_{lic}^3) \quad (12)$$

$$H = c_p(T_{lic} - T_{ref}) \quad (13)$$

$$EPE = (6,173 \cdot X - 7,48 \cdot X^{1,5} + 32,747 \cdot X^2) \cdot [1 + 0,006 \cdot (T_{vap} - 3,7316)] \quad (14)$$

Para a água, empregaram-se as correlações experimentais a seguir (HOLMLUND; PARVIAINEN, 1999): Entalpia da água (kJ/kg) (Equação 15), entalpia do vapor saturado (kJ/kg) (Equação 16), entalpia do vapor superaquecido (kJ/kg) (Equação 17), e calor latente de vaporização (kJ/kg) (Equação 18).

$$H_{liq} = \alpha \cdot T_{liq} + \beta \quad (\text{em que } \alpha = 4,1832 \text{ e } \beta = 0,127011) \quad (15)$$

$$H_{vap} = \gamma \cdot T_{vap} + \delta \quad (\text{em que } \gamma = 1,75228 \text{ e } \delta = 2.503,35) \quad (16)$$

$$H_{vap,sa} = \left[\frac{A \cdot (T_{vap,sa} - T_{vap,sat}) + B/2 \cdot (T_{vap,sa}^2 - T_{vap,sat}^2) + C/3 \cdot (T_{vap,sa}^3 - T_{vap,sat}^3) + D/4 \cdot (T_{vap,sa}^4 - T_{vap,sat}^4)}{MM_{\hat{a}gua}} \right] \quad (17)$$

(em que $A = 33,46, B = 0,6880 \cdot 10^{-2}, C = 0,7604 \cdot 10^{-5},$
 $D = -3,593 \cdot 10^{-9}, e MM_{\hat{a}gua}(\text{massa molecular}) = 18,01508 \text{ g/mol}$)

$$\lambda = 2.519,5 - 2,653 \cdot T_{vap} \quad (18)$$

5.2 Etapas Executivas

A segunda fase de uma Análise de processos químicos diz respeito às etapas executivas, ou seja, ao dimensionamento e à simulação. No dimensionamento, utiliza-se o modelo matemático para o cálculo das dimensões dos equipamentos e dos consumos de insumos e utilidades, de modo a atender as variáveis especificadas, subdivididas em condições conhecidas (CC) e em metas de projeto e de operação (MPO). Na simulação, com o mesmo modelo matemático, o objetivo é obter o comportamento do processo dimensionado sob cenários diferentes de operação, dado um conjunto de condições conhecidas (CC), definido com as dimensões dos equipamentos e as vazões e condições das correntes de alimentação (PERLINGEIRO, 2011).

Dado o modelo matemático com 13 equações e 19 variáveis (Tabela 1), e a especificação de 6 variáveis (Tabela 2), o número de incógnitas é 13, e o número de graus de liberdade (GL), zero. Portanto, seja para o dimensionamento ou para a simulação, o sistema de equações é consistente determinado, quando não é necessário um módulo de otimização para a sua resolução. Pode-se observar que há um sistema de equações não-lineares próprio de cada abordagem. Utilizou-se o método simultâneo para a resolução de ambos, com a função *fsolve* do *software* MATLAB (vR2009a; aquisição via projeto FAPEMIG Demanda Universal 01/2009, APQ-02544-09).

Variáveis
Área de troca térmica (a mesma entre os evaporadores)
Pressão de operação (em cada evaporador; efeito 1 – efeito 6)
Vazão mássica de entrada do vapor vivo (efeito 1)
Pressão de entrada do vapor vivo (efeito 1)
Vazão mássica de entrada do licor (efeito 5)
Temperatura de entrada do licor (efeito 5)
Concentração de entrada do licor (efeito 5)
Vazão mássica de saída do licor (em cada evaporador; efeito 1 – efeito 6)
Concentração de saída do licor (efeito 1)

Tabela 1: Modelo matemático: Variáveis.

Dimensionamento		Valor
Fluxo de licor(e) (kg/s) ⁽¹⁾		23,98
Concentração do licor(e) (kg/kg) ⁽¹⁾		0,10
Temperatura do licor(e) (°C) ⁽¹⁾		80
Pressão do vapor vivo (Pa) ⁽¹⁾ (ou T = 139 °C)		3,510×10 ⁵
Concentração do licor(s) (kg/kg) ⁽²⁾		0,5
Pressão de operação (efeito 6) (Pa) ⁽²⁾		11.727
Simulação		Valor
Fluxo de licor(e) (kg/s) ⁽¹⁾		23,98
Concentração do licor(e) (kg/kg) ⁽¹⁾		0,10
Temperatura do licor(e) (°C) ⁽¹⁾		80
Pressão do vapor vivo (Pa) ⁽¹⁾ (ou T = 139 °C)		3,510×10 ⁵
Fluxo de vapor vivo (kg/s) (perturbação de +5%) ⁽¹⁾		4,4586
Área de troca térmica (a mesma entre os evaporadores) (m ²) ⁽¹⁾		554,4000

Tabela 2: Variáveis especificadas: Dimensionamento e Simulação, conforme Kumar et al. (2013) ((e) = entrada efeito 5 e (s) = saída efeito 6).

⁽¹⁾ Condições conhecidas.

⁽²⁾ Metas de projeto e de operação.

5.2.1 Dimensionamento

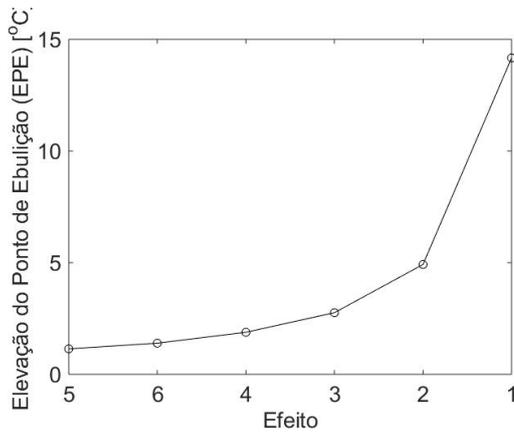
A Tabela 3 contém o resultado da etapa de dimensionamento, com os valores para as variáveis do vapor e do licor em cada efeito, além dos índices de desempenho. Validou-se esse resultado, e portanto, o modelo matemático (subseção 5.1), ao compará-lo com aquele em Kumar et al. (2013) (valores entre parênteses). Pode-se observar que a área de troca térmica, comum a cada evaporador, é igual a 554,4 m², e a vazão mássica de vapor vivo, a 4,2 kg/s.

Variável / Efeito	1	2	3	4	5	6
Licor						
Concentração(e) (kg/kg)	0,2806 (0,2883)	0,2013 (0,2067)	0,1606 (0,1639)	0,1384 (0,1401)	0,1	0,1151 (0,1157)
Concentração(s) (kg/kg)	0,5	0,2806 (0,2883)	0,2013 (0,2067)	0,1606 (0,1639)	0,1151 (0,1157)	0,1384 (0,1401)
Vazão(e) (kg/s)	8,5457 (8,3173)	11,9117 (11,6031)	14,9256 (14,627)	17,3247 (17,1105)	23,98	20,8200 (20,7300)
Vazão(s) (kg/s)	4,7960 (4,7960)	8,5457 (8,3173)	11,9117 (11,6031)	14,9256 (14,627)	20,8200 (20,7300)	17,3247 (17,1105)
Temperatura(e) (°C)	98,2855 (99,4662)	82,5867 (83,4384)	70,4266 (71,0077)	50,3945 (50,419)	80	61,1306 (61,3928)
Temperatura(s) (°C)	124,7940 (125,2157)	98,2855 (99,4362)	82,5867 (83,4384)	70,4266 (71,0077)	61,1306 (61,3928)	50,3945 (50,4190)
EPE (°C)	14,1631 (14,1838)	4,9192 (5,1611)	2,7591 (2,8805)	1,8824 (1,9428)	1,1405 (1,1489)	1,394 (1,4190)
Calor específico (kg/(kg×K))	3,6404 (3,3006)	3,7804 (3,6275)	3,8572 (3,7704)	3,8962 (3,8507)	3,9913 (3,9506)	3,9516 (3,8924)
Vapor						

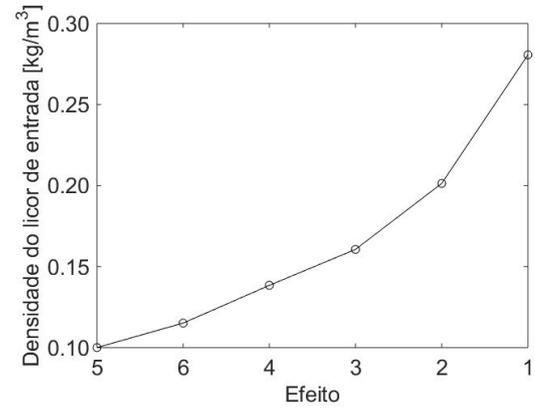
Temperatura(e) (°C)	139	110,6310 (111,0319)	93,3663 (94,3051)	79,8276 (80,5579)	68,5442 (69,0649)	59,9900 (60,2439)
Temperatura(s) (°C)		110,6310 (111,0319)	93,3663 (94,3051)	79,8276 (80,5579)	68,5442 (69,0649)	59,9900 (60,2439)
Vazão(e) (kg/s)		4,2463 (3,8028)	3,7497 (3,5213)	3,3659 (3,2858)	3,0139 (3,0239)	2,3991 (2,4835)
Vazão(s) (kg/s)		3,7497 (3,5213)	3,3659 (3,2858)	3,0139 (3,0239)	2,3991 (2,4825)	3,1500 (3,2500)
Índice de desempenho						
Área (m ²)	554,4000 (591,9614)	-	-	-	-	-
Consumo de vapor (kg/s)	4,2463 (3,8028)	-	-	-	-	-
Capacidade de evaporação (kg/s)	19,1796 (19,1840)	-	-	-	-	-
Economia de vapor (kg/kg)	4,5167 (5,0447)	-	-	-	-	-

Tabela 3: Dimensionamento: Resultado e validação (variáveis especificadas em negrito, conforme a Tabela 2); resultado de Kumar et al. (2013) entre parêntesis; (e) = entrada e (s) = saída)

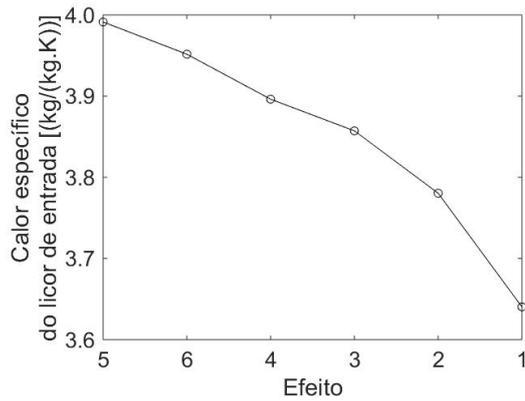
Segue um exemplo de uso desses resultados. A Figura 4 mostra o comportamento de propriedades do licor ao longo do sistema de evaporação múltiplo efeito. A elevação de ponto de ebulição (EPE) do licor, em (a), depende da quantidade e composição de seus compostos orgânicos e inorgânicos. Quanto mais diluído o licor, menor essa diferença de temperatura em relação à água pura à mesma pressão. Pode-se observar o seu menor valor para o efeito 5, que é o ponto de alimentação do licor. O EPE aumenta gradativamente até o efeito 1, que é o ponto de maior concentração do licor. O comportamento da densidade do licor, em (b), é similar ao do EPE, sendo, em baixas concentrações, em torno de 10% (valor de entrada no efeito 5), próximo a da água à pressão atmosférica (1000 kg/m³). O calor específico do licor, em (c), depende dos calores específicos das substâncias elementares. Quanto maior a sua concentração e temperatura, menor o seu valor, e conseqüentemente, de sua entalpia. O menor valor ocorre na saída do sistema de evaporação múltiplo efeito (efeito 6), quando a concentração e a temperatura do licor são máximos. A viscosidade dinâmica do licor (μ , em Pa·s), em (d), é obtida a partir da viscosidade cinemática (ν , em m²/s; Equação 12) ($\nu = \mu / \rho$, em que ρ é a densidade do licor, em kg/m³). Quanto menor o seu valor, mais fácil o escoamento do licor ao longo dos evaporadores. Com o seu aumento em concentrações mais altas de licor e a sua diminuição em temperaturas mais baixas de licor, o fluxo de licor em contra-corrente com o de vapor favorece o escoamento do licor, dada a sua máxima temperatura no efeito 1 (HOLMLUND; PARVIAINEN, 1999).



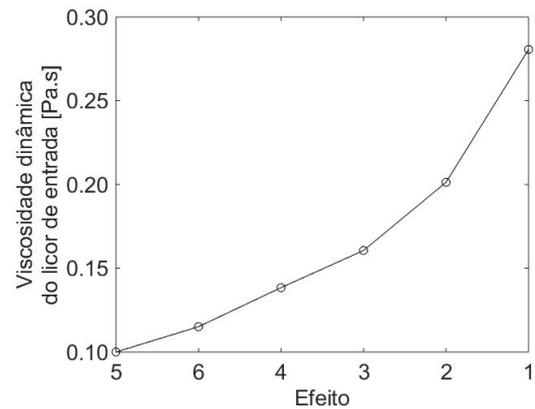
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4: Propriedades físicas do licor em cada evaporador: (a) Elevação do ponto de ebulição, (b) densidade, (c) calor específico e (d) viscosidade dinâmica.

A etapa de simulação, a seguir, usa o modelo o conjunto de valores obtidos na etapa de dimensionamento, da vazão mássica de vapor vivo e da área de troca térmica dos evaporadores, como o caso-base para a análise de cenários.

5.2.2 Simulação

Após a obtenção e validação do modelo matemático, com o objetivo de se obter o comportamento do sistema de evaporação sob novos cenários, perturbou-se a vazão de vapor vivo em +5% (cenário 1) e em -5% (cenário 2), a partir do valor-base de 4,2 kg/h (Tabela 3). Desse modo, os dados de entrada para as simulações são aqueles do dimensionamento, exceto para a vazão de vapor vivo. A Tabela 4 contém o resultado da etapa de simulação para o cenário 1, com os valores para as variáveis do vapor e do licor em cada efeito, além dos índices de desempenho.

Pode-se observar que a concentração final do licor aumenta de 50% (caso-base; Tabela 3) para 62,9% (cenário 1) e diminui para 36,2% (cenário 2; não mostrado). Já a capacidade de evaporação da planta aumenta para 21,1 kg/s (cenário 1) e diminui para 17,4 kg/s (cenário 2), em relação ao valor-base de 19,2 kg/s (Tabela 3). Esse tipo de análise mostra a importância da etapa de simulação, com o objetivo de análise de

novos cenários e avaliação de sua viabilidade prática.

Variável / Efeito	1	2	3	4	5	6
Licor						
Concentração(e) (kg/kg)	0,3541	0,2330	0,1781	0,1498	0,1	0,1187
Concentração(s) (kg/kg)	0,6289	0,3541	0,2330	0,1781	0,1187	0,1498
Vazão(e) (kg/s)	6,7707	10,2882	13,4623	16,0022	23,98	20,1853
Vazão(s) (kg/s)	2,8680	6,7707	10,2882	13,4623	20,1853	16,0022
Temperatura(e) (°C)	90,1983	71,8326	58,5037	35,6423	80	48,4722
Temperatura(s) (°C)	124,0833	90,1983	71,8326	58,5037	48,4722	35,6423
EPE (°C)	20,9217	6,9675	3,3000	2,0746	1,1219	1,4506
Calor específico (kg/kg×K)	3,5097	3,7125	3,8150	3,8647	3,9913	3,9389
Vapor						
Temperatura(e) (°C)	139	103,1615	83,2308	68,5326	56,4290	47,3502
Temperatura(s) (°C)	103,1615	83,2308	68,5326	56,4290	47,3502	34,1916
Vazão(e) (kg/s)	4,4586	3,9026	3,5174	3,1740	2,5399	3,7946
Vazão(s) (kg/s)	3,9026	3,5174	3,1740	2,5399	3,7946	4,1830
Índice de desempenho						
Área (m ²)	554,4000	-	-	-	-	-
Consumo de vapor (kg/s)	4,4586	-	-	-	-	-
Capacidade de evap. (kg/s)	21,1115	-	-	-	-	-
Economia de vapor (kg/kg)	4,7349	-	-	-	-	-

Tabela 4: Simulação: Resultado após perturbação de +5% na vazão de vapor vivo (variáveis especificadas em negrito, conforme a Tabela 2); (e) = entrada e (s) = saída)

A Figura 5 mostra os perfis da concentração e da temperatura do licor ao longo dos evaporadores para o caso-base (etapa de dimensionamento) e os novos cenários (etapa de simulação). Esse tipo de gráfico é válido para prever o comportamento de variáveis-chave do processo em torno de seu ponto nominal de operação.

Concluindo, observa-se a importância da Análise de processos químicos para o projeto e a operação dos processos. Ao se conhecer o comportamento do processo no ponto nominal (etapa de dimensionamento) e no seu entorno (etapa de simulação), pode-se avaliar se o seu desempenho irá atender às metas de projeto e de operação, dado as condições conhecidas.

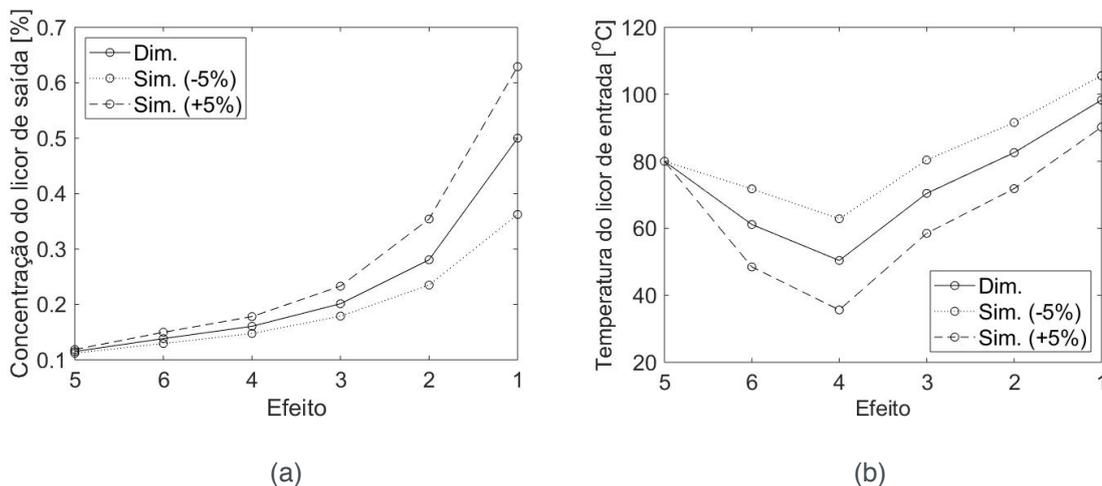


Figura 5: Comportamento da concentração e da temperatura do licor em cada evaporador nas etapas de dimensionamento (caso-base) e simulação (com perturbações de $\pm 5\%$ na vazão de vapor vivo em relação ao caso-base).

5.2.3 Análise de Sensibilidade

A Análise de processos químicos (dimensionamento e simulação) desenvolve-se em um ambiente de incertezas. As principais fontes de incerteza são os modelos matemáticos e os valores dos parâmetros físicos. Um modelo nem sempre é capaz de descrever, com precisão adequada, os fenômenos que ocorrem nos equipamentos e nas correntes de processo. A determinação de um parâmetro é geralmente a partir de experimentos, portanto, sujeita a erros experimentais, ou a partir de condições conhecidas, diferentes daquelas do processo. Esse é o caso do calor específico do licor e do coeficiente global de transferência de calor. Ainda é possível ter a sua variação durante a operação do processo, a partir de alterações estruturais nos equipamentos, como incrustações em evaporadores, ou devido à influência de outras unidades de processamento a montante e/ou a jusante (PERLINGEIRO, 2011).

Com a possível discrepância entre o comportamento previsto, segundo o modelo matemático, e aquele real, conforme o processo em operação, deve-se realizar uma análise de sensibilidade de variáveis relevantes para o processo, geralmente metas de projeto e de operação, em função de desvios em variáveis especificadas e parâmetros. Em resumo, o objetivo de um estudo de análise de sensibilidade é avaliar o efeito da incerteza, comum às etapas de modelagem matemática e de estimativa de propriedades e coeficientes, sobre o projeto (dimensionamento) e a operação (simulação) (PERLINGEIRO, 2011).

Para a sua formulação matemática, considerar uma variável relevante para o dimensionamento ou a simulação, e, um parâmetro de valor incerto. O valor exato da função Sensibilidade é obtido a partir de, em, ou seja, com os parâmetros e variáveis especificadas em seus respectivos valores-base. Para uma análise independente das unidades de e, dividi-se, respectivamente, pelos valores-base, e (Equação 19). Como o cálculo exato é geralmente inviável, utiliza-se uma aproximação numérica

(Equação 20), em que $\Delta\xi$ é o incremento em relação ao ponto-base. Desse modo, a função Sensibilidade da variável em relação ao parâmetro é dada conforme a Equação 21 (PERLINGEIRO, 2011).

$$S(F; \xi) = \left| \frac{\partial [F(\xi)/F(\bar{\xi})]}{\partial (\xi/\bar{\xi})} \right|_{\bar{\xi}} = \left| \frac{\partial F(\xi)}{\partial \xi} \right|_{\bar{\xi}} \cdot \frac{\bar{\xi}}{F(\bar{\xi})} \quad (19)$$

$$\frac{\partial F(\xi)}{\partial \xi} \approx \frac{F(\bar{\xi} + \Delta\xi) - F(\bar{\xi})}{\Delta\xi} \quad (20)$$

$$S(F; \xi) \approx \frac{F(\bar{\xi} + \Delta\xi) - F(\bar{\xi})}{\Delta\xi} \cdot \frac{\bar{\xi}}{F(\bar{\xi})} = \frac{F(\bar{\xi} + \Delta\xi) - F(\bar{\xi})}{F(\bar{\xi})} \cdot \frac{\bar{\xi}}{\Delta\xi} \quad (21)$$

Realizou-se um estudo de análise de sensibilidade sobre a concentração final do licor. A Figura 6 mostra a sua função Sensibilidade em relação à incerteza no coeficiente global de transferência de calor (U) do efeito 6, entre -5% e +5%, dado o seu valor nominal de 1400 W/(m²·x°C). Por exemplo, para uma incerteza de +5% no parâmetro U, a sensibilidade da concentração final do licor é baixa, igual a 0,2%, ou seja, o seu valor passaria de 0,5 (valor de referência; Tabela 1) para 0,505.

Esse tipo de análise é útil para avaliar a margem de operação do processo sem perdas significativas de desempenho. Em outras palavras, dadas as fontes de incerteza, a análise de sensibilidade é importante para verificar a robustez das operações, ou seja, até que ponto é viável operar o processo sem comprometer, de modo significativo, as metas de projeto e de operação.

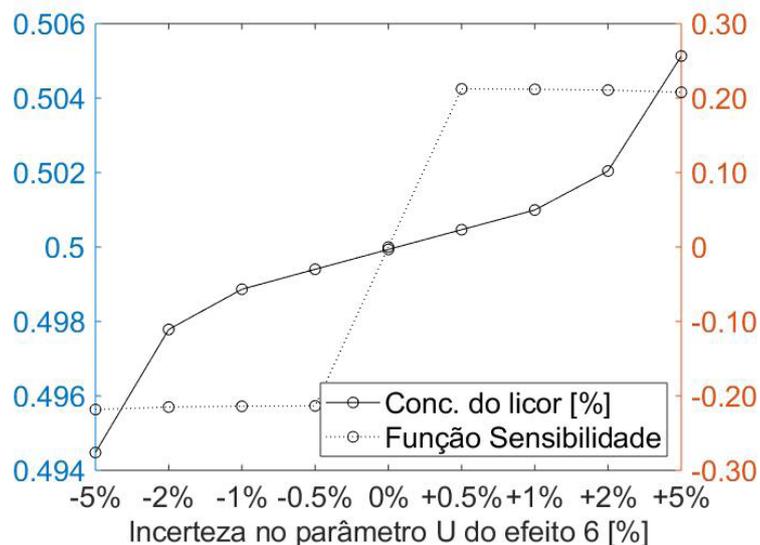


Figura 6: Análise de sensibilidade da concentração final do licor em relação ao coeficiente global de transferência de calor (U) do efeito 6, com valor nominal de nominal de 1400 W/(m²·x°C).

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Demonstrou-se uma aplicação da Análise de processos químicos, com a exemplificação das atividades de dimensionamento de equipamentos, de simulação de novos cenários, e de análise de sensibilidade de variáveis-chave, após a modelagem matemática, seguida de validação, de um sistema de evaporação múltiplo efeito de indústrias de celulose *Kraft*. Ressalta-se o caráter sistemático e multidisciplinar da área de Engenharia de (Sistemas de) Processos (PSE; *Process Systems Engineering*), e o seu papel para um maior entendimento das operações. Com a maior complexidade dos processos, e as regulamentações mais restritivas sobre aspectos econômicos, de segurança operacional e de produção limpa, é crescente a sua importância para a manutenção e a expansão das indústrias químicas.

REFERÊNCIAS

GASPARONI, J.M. **Análise de processos químicos: Dimensionamento, simulação e análise de sensibilidade de sistemas de evaporação múltiplo efeito de indústrias de celulose Kraft**. Trabalho de Conclusão de Curso, Orientador: Gustavo Matheus de Almeida, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, p. 47, 2014.

GASPARONI, J.M.; OLIVEIRA, L.A.F.; AGUIAR, M.O.; ALMEIDA, C.R.S.N.; ALMEIDA, G.M. **Dimensionamento, simulação e análise de sensibilidade de sistemas de evaporação múltiplo efeito de indústrias de celulose Kraft**. In: **Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQ-IC)**, 3335-3340, São Paulo, Blucher, 2017. DOI: <http://www.dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeqic2017-417>

GLAVIC, P. Thirty Years of International Symposia on Process Systems Engineering, **Current Opinion in Chemical Engineering**, vol. 1, p. 421-429, 2012.

GROSSMANN, I. E.; WESTERBERG, A. W. Research challenges in process systems engineering. **AIChE Journal**, vol. 46, no. 9, p. 1700-1703, 2000.

HOLMLUND, K.; PARVIAINEN, K. Evaporation of black liquor, In: GULLICHSEN, J.; FOGELHOLM, C.J. (eds.) **Chemical pulping** (book 6B), Cap. 12, Helsinki: Fapet Oy, 1999.

KLATT, K.-U.; MARQUARDT, W. Perspectives for process systems engineering: Personal views from academia and industry, **Computers and Chemical Engineering**, vol. 33, no. 3, p. 536-550, 2009.

KUMAR, D.; KUMAR V.; SINGH, V. P. Modeling and dynamic simulation of mixed feed multi-effect evaporators in paper industry. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, p. 384-397, 2013.

MASSE, M. A.; KIRAN, E.; FRICKE, A. L. Freezing and glass transition phenomena in polymer-diluent mixtures, **Polymer**, v. 27, p. 619-622, 1986.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**, 7th ed., Singapura: McGrawHill, 2005.

PERLINGEIRO, C. A. G. Engenharia de processos: **Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**, 1a ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

SARGENT, R. Process systems engineering: A retrospective view with questions for the future,

Computers and Chemical Engineering, vol. 29, no. 6, p. 1237-1241, 2005.

SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial); IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.). **Celulose e papel: Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**, vol. 1, 2a ed., São Paulo: IPT, 1988.

TAKAMATSU, T. The nature and role of process systems engineering. **Computers and Chemical Engineering**, vol. 7, no. 4, p. 203-218, 1983.

VAKKILAINEN, E. Chemical Recovery. In: Gullichsen, J. e Fogelholm, C.-J. (eds.), **Chemical pulping**, Book 6B, Papermaking and Science Technology Series, Cap. 11, B6-B34, FapetOy, 2000.

VENKATESH, V.; NGUYEN, X. N. Evaporation and concentration of black liquor, In: HOUGH, G. **Chemical recovery in the alkaline pulping process**, Cap. 3, Atlanta: Tappi, 1985.

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

