



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA - CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA - DEQ

BELIZA PATRÍCIA DA SILVA

**UMA PERCEPÇÃO DOS ENGENHEIROS QUÍMICOS EM FORMAÇÃO
SOBRE A IMPORTÂNCIA DA ENGENHARIA DE PROCESSOS ASSISTIDA
POR COMPUTADOR (CAPE)**

JOÃO PESSOA

2020

BELIZA PATRÍCIA DA SILVA

**UMA PERCEPÇÃO DOS ENGENHEIROS QUÍMICOS EM FORMAÇÃO
SOBRE A IMPORTÂNCIA DA ENGENHARIA DE PROCESSOS ASSISTIDA
POR COMPUTADOR (CAPE)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de
Engenharia Química do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal
da Paraíba como requisito
obrigatório para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Arioston Araújo
Morais Júnior

JOÃO PESSOA

2020

“As investigações científicas revelam novas maneiras com as quais Deus trabalha e nos trazem revelações mais profundas do totalmente desconhecido.”

Maria Mitchell (1818-1889), primeira astrônoma norte-americana e primeira mulher a ser nomeada para a Academia Americana de Artes e Ciências.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo cuidado e ânimo durante toda a graduação especialmente durante a elaboração deste trabalho.

À minha amada mãe (Beatriz Patrícia) e preciosa bisavó (Beatriz Rosa) que deram a vida para que eu vivesse. Não medindo esforços para que eu tivesse acesso à educação. E a quem eu espero orgulhar mesmo que não estejam aqui para celebrar comigo.

Aos meus irmãos que me motivaram e encorajaram todos os dias: minha habilidosa irmã Bianca, minha companheira de lutas e dores, que me ajudou a enxergar a realidade de forma clara e concisa durante a realização deste trabalho nos momentos em que a preocupação me impediam, meu atencioso irmão Kauã, que me motiva a superar desafios, que fez silêncio para que eu pudesse escrever e que me dizia pra ir dormir quando me via cansada.

À minha avó Izabel que me ensinou como ser resiliente e à solucionar os problemas conforme eles surgem. À minha tia Alecsandra, que me ensinou a manter a calma mesmo em momentos em que as coisas parecem não ter solução.

Ao querido Marko pelo companheirismo. Pela paciência durante a produção deste trabalho, com quem eu pude compartilhar os momentos de preocupação e frustração e receber consolo, e que celebrou comigo cada pequena conquista desse processo.

À minha sábia amiga Valeska que me motivou a escrever esse trabalho mesmo em um período tão conturbado devido a pandemia do COVID-19, ajudou-me a lembrar que as coisas são passageiras e do que realmente é importante. Aos meu amáveis amigos David e Adriana que ao longo dos anos tem me agraciado com conselhos amorosos e ferramentas preciosas para que minha mente fosse capaz de lidar com os desafios que tenho enfrentado. Aos meus gentis amigos Joseph e Edda pelo carinho e afago nos momentos difíceis e por me ensinarem a enfrentar as dificuldades com paciência.

Ao zeloso professor Arioston que aceitou ser meu orientador em um momento tão delicado, me tranquilizando e fornecendo suporte acadêmico precioso para a realização deste trabalho. Ao engenhoso professor Leopoldo, por me apresentar esse fantástico universo da simulação computacional.

Aos meus geniais colegas do LABMC: Neto, Lucas, Giovana, Wanderson, Jonas, Paulo, Fábio com quem compartilhei conhecimentos acadêmicos, e também sonhos e dificuldades, a quem admiro e em quem me inspiro. Aos meus brilhantes colegas de graduação, com quem compartilhei preocupações sobre as disciplinas, conteúdos para preparação nas avaliações e celebrei as boas notas: Gilvan, Valéria, Iza, Alysso, Paula, Mariana, Joicy, Alany, a graduação teria sido muito mais difícil sem a presença dessas pessoas, suas risadas e ânimo me contagiam. E em especial aos meus engenhosos colegas Rodolfo e Rodrigo, pela parceria nas disciplinas finais do curso, pelos grandes ensinamentos de engenharia química, por me permitir fazer parte de uma equipe incrível.

À todos os meus preciosos amigos que me olharam durante esse processo, confiantes de que eu conseguiria realizar esse trabalho e alegres pelo encerramento desse ciclo: Gordana, Ayane, Amanda, Beatriz, Cecília, Silvana, Henrique, Betina, Cynthia, Rossana, Luciana, Juliana. Suas palavras de ânimo e sua felicidade com o encerramento desse ciclo foram combustível para mim.

RESUMO

A engenharia química (EQ), também conhecida como engenharia universal devido à sua ampla possibilidade de atuação, foi desde sua fundação orientada pelas necessidades da indústria, que são dinâmicas. A chamada Indústria 4.0 trouxe consigo novas demandas e tecnologias, e por consequência novas exigências para os profissionais de engenharia química. A utilização de *softwares* não é somente requerida pelo mercado de trabalho, trata-se também de uma forma eficaz de aplicação dos conceitos das disciplinas do ciclo básico e profissionalizante, haja vista que eles se tornam uma ferramenta importante de aprendizagem. Embora os cursos de engenharia química no Brasil possuam requisitos obrigatórios comuns, os fluxogramas dos cursos têm diferenças que implicam na formação do futuro engenheiro. Logo, esse trabalho tem como objetivo principal analisar a conjuntura do ensino de *softwares* computacionais para alunos de engenharia química em universidades federais brasileiras, através de resolução de problemas práticos e pesquisa descritiva. Com isso, foi desenvolvida uma metodologia baseada em etapas. Na primeira etapa foram utilizados casos ilustrativos, problemas clássicos da EQ que são impraticáveis de realizar sem a assistência de um sistema computacional. Na segunda etapa, foi realizada uma pesquisa em instituições federais de ensino da EQ no Brasil, de modo a conhecer a percepção dos alunos sobre o uso dos *softwares* durante a graduação, sua importância e contribuição na formação do engenheiro químico. A partir dessa abordagem foi possível observar como a modelagem e simulação de processos facilitam a resolução dos problemas típicos do exercício da engenharia química. As repostas dos estudantes ao *survey* apresentam um cenário acadêmico ainda distante daquele que seria compatível com as atuais demandas do mercado industrial.

Palavras-chaves: *softwares*, ensino de engenharia, *learn-by-doing*, simulação de processos químicos, graduação

ABSTRACT

Chemical Engineering, also known as universal engineering due to its wide scope of action, has been driven by industry needs, which are dynamic, since its foundation. The so-called Industry 4.0 brought with it new demands and technologies, and consequently new requirements for chemical engineering professionals. The use of software is not only required by the industries, it is also an effective way to apply the concepts of the basic and professional cycle disciplines, since they become an important learning tool. Although chemical engineering courses in Brazil have common mandatory requirements, the course flowcharts have differences that imply the formation of the future engineer. Therefore, this work has as main objective to analyze the conjuncture of the computational software teaching to chemical engineering students in Brazilian federal universities, through the resolution of practical problems and descriptive research. A step-based methodology was developed. In the first stage, illustrative cases were used, classic chemical engineering problems that are impractical to perform without the assistance of a computer system. In the second stage, a research was carried out in federal teaching institutions of chemical engineering in Brazil, in order to know the students' perception about the use of software during graduation, its importance and contribution in the formation of the chemical engineer. From this approach it was possible to observe how the modeling and simulation of processes facilitate the resolution of the typical problems of the exercise of chemical engineering. The students' responses to the survey present an academic scenario that is still far from that which would be compatible with the current demands of the industrial market.

Keywords: software, engineering teaching, learn-by-doing, chemical process simulation, graduation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Início simulação de reação química no <i>software</i> COCO.....	34
Figura 2 – Seleção das espécies químicas envolvidas na reação.....	35
Figura 3 – Seleção das espécies envolvidas na reação e escolha do método termodinâmico.....	35
Figura 4 – Definição da estequiometria, fase e constante de equilíbrio da reação.....	36
Figura 5 – Definição da temperatura, pressão e vazões da corrente de entrada.....	36
Figura 6 – Trocador de calor para aquecimento da corrente de entrada do reator.....	37
Figura 7 – Fluxograma do processo de produção do cloreto de etila.....	37
Figura 8 – Seleção das espécies químicas envolvidas nas reações.....	38
Figura 9 – Ajuste da estequiometria e fase da reação.....	39
Figura 10 – Determinação do fluxo molar, pressão e temperatura das espécies químicas envolvidas nas reações.....	39
Figura 11 – Configuração do reator de conversão constante.....	40
Figura 12 – PFD parcial do processo.....	40
Figura 13 – Separador de componentes.....	41
Figura 14 – Escolha dos componentes da mistura a ser destilada e seleção do método termodinâmico.....	43
Figura 15 – Configuração da alimentação da coluna de destilação.....	44
Figura 16 – Configuração da coluna de destilação.....	44
Figura 17 - Região discretizada. Malha computacional bidimensional.....	45
Figura 18 – Fluxo de fluidos imiscíveis.....	47
Figura 19 – PFD completo do processo e composição das correntes de entrada e saída.....	56
Figura 20 – PDF final do processo de produção de cloro-etil.....	57
Figura 21 – Comportamento das variáveis ao longo da reação.....	58
Figura 22 – PDF final do processo de destilação da mistura metanol-água.....	58
Figura 23 – Adaptado de MATLAB®. Gráfico do perfil de velocidade na secção	

transversal, em escoamento bidimensional.....	59
Figura 24 – Adaptado de MATLAB®. Gráfico do perfil de velocidade na secção transversal, em escoamento bidimensional.....	59
Figura 25 – Adaptado de MATLAB®. Gráfico do perfil de velocidade homogêneo.....	60
Figura 26 – Softwares utilizados pelos discentes durante a graduação.....	62
Figura 27 – Acesso dos estudantes aos softwares.....	63
Figura 28 – Utilização de softwares nas disciplinas específicas de Engenharia Química.....	64
Figura 29 - Substituição de Carga Horária Experimental por Computacional...	65
Figura 30 - Softwares Computacionais são ferramentas indispensáveis ao Engenheiro Químico mediante ao avanço tecnológico.....	66
Figura 31 - Tenho dificuldade na utilização de softwares para compreensão e visualização de projetos e plantas químicas.....	67
Figura 32 - As disciplinas específicas do curso deveriam ter os conhecimentos teóricos associados à aplicação de softwares para solução de problemas.....	68
Figura 33 - Sinto-me apto para fazer simulações e modelagem de processos.....	69
Figura 34 - Sinto-me apto para fazer simulações e modelagem de processos, divisão por ranking	70
Figura 35 - As disciplinas com recursos computacionais deveriam ser ministradas desde o início do curso.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de softwares por aplicação.....	21
Tabela 2 – Esquema da pesquisa.....	50
Tabela 3 – Distribuição das instituições em grupos.....	52
Tabela 4 – Composição das correntes do processo de produção de cloreto de etila.....	57
Tabela 5 –Distribuição da população de discentes e critérios de ranking por instituição.....	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. Objetivo Geral	14
1.2.2. Objetivos Específicos.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1. Histórico da Engenharia Química.....	15
2.2 O uso dos <i>softwares</i> na Engenharia Química.....	18
2.2.1 Modelagem e Simulação de Processos	19
2.2.2. <i>Softwares CAPE-Open</i>	22
2.3. Ensino dos <i>softwares</i> nos cursos de graduação Engenharia Química	24
2.3.1. Learn-by-doing.....	27
3. METODOLOGIA.....	31
3.1 Estudos de Casos.....	31
3.2. Método de Pesquisa.....	47
4. RESULTADOS	52
4.1. Resultados Referentes aos Estudos de Caso Propostos	52
4.2. Resultados da Pesquisa <i>Survey</i>	56
i) <i>Softwares</i> Utilizados.....	57
ii) Acesso dos discentes aos <i>softwares</i>	58
iii) Utilização dos <i>softwares</i> nas disciplinas específicas do curso	60
iv) Substituição de Carga Horária Experimental por Computacional	60
v) Indispensabilidade dos <i>softwares</i>	62
vi) Dificuldade na utilização dos <i>softwares</i>	63
vii) Quanto ao dever da utilização de <i>softwares</i> nas disciplinas específicas.....	63
viii) Habilidade em Sistemas Computacionais.....	65
ix) Período Adequado para iniciar o contato com disciplinas computacionais	66
5. CONCLUSÕES.....	68
6. REFERÊNCIAS	71
7. Apêndice A.....	78

1. INTRODUÇÃO

O engenheiro químico é o profissional encarregado por processos industriais de transformação. Devido a abrangência de sua formação - que combina conhecimentos nas áreas de física, química, matemática, biologia e computação - pode atuar em todas as etapas de um processo produtivo desde a concepção e dimensionamento até o desenvolvimento e otimização, incluindo ainda operação, controle, e análise econômica (CREMASCO, 2015).

Segundo o Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (DEQ UFRGS) a formação do engenheiro químico está baseada nos fenômenos de transporte (de calor, de massa e de movimento), termodinâmica e cinética química. Seus princípios permitem a aplicação das leis da física para os conceitos que são pilares à engenharia química: conservação de massa, energia, e quantidade de movimento. Da análise macro e microscópica de sistemas, derivam disciplinas como as operações unitárias, projeto de reatores, ciência dos materiais, dentre outras.

De acordo com o Departamento de Engenharia Química do *Massachusetts Institute of Technology* (CHEME MIT)¹ embora tradicionalmente ligados a processos relacionados à combustíveis e sistemas de energia, os engenheiros químicos de hoje estão liderando novos desenvolvimentos em medicina, biotecnologia, microeletrônica, materiais avançados, energia, produtos de consumo, manufatura e soluções ambientais.

No desenvolvimento de projetos, os engenheiros químicos atuam no dimensionamento e análise de equipamentos envolvidos nos processos reais, descritos por equações matemáticas lineares e, em grande parte, não lineares, que estão relacionadas ao comportamento dos sistemas. Por exemplo, a determinação da perda de pressão ao longo de uma tubulação ou o aumento da temperatura dentro de um reator. Essas e outras variáveis de processos tão importantes, que possuem uma matemática elaborada, condições de contorno complexas, não linearidades, integração e outras características inerentes; tornam-se impraticáveis de serem determinadas sem o uso de recursos computacionais (BRANDALISE, 2019).

No entanto, os *softwares* deixam de ser apenas uma ferramenta de cálculo:

¹ Disponível em: <https://cheme.mit.edu/about/what-is-chemical-engineering/> Acesso em 28 de nov. 2020

níveis avançados de ferramentas digitais são um dos principais recursos da chamada Indústria 4.0, conhecida como a próxima fase da digitalização do setor manufatureiro. Caracterizada principalmente pela virtualização e interoperabilidade (troca de informações e/ou dados através de computadores) a também chamada quarta revolução industrial trouxe diversas facilidades através de sistemas automatizados, além de maior precisão de indicadores chave dos processos (KPI's). Diante disso, o engenheiro químico precisa então ter como parte essencial da sua formação, a compreensão e habilidade para utilizar *softwares* computacionais (SANTOS, VIANNA JR; LE ROUX, 2018).

Embora ensinar programação seja comum nos primeiros períodos de muitos cursos de engenharia, há uma grande diferença entre ensinar programação nos primeiros períodos e no final da graduação. Nos primeiros períodos, os estudantes ainda não tiveram contato com as disciplinas profissionalizantes, que serão a base das suas práticas na indústria (SANTOS, VIANNA JR; LE ROUX, 2018).

Neste trabalho, busca-se investigar a percepção dos engenheiros químicos em formação sobre o uso e a importância de sistemas computacionais na graduação e no mercado de trabalho. De caráter quantitativo, a pesquisa foi realizada utilizando o método estatístico. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), “o papel do método estatístico é, essencialmente, possibilitar uma descrição quantitativa da sociedade, considerada como um todo organizado”. Os autores afirmam que a pesquisa quantitativa:

Considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (percentagem, média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão etc.) (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 69).

Além disso, foram escolhidos problemas corriqueiros da engenharia química que foram resolvidos utilizando diversos *softwares*. Evidenciando o uso destes como ferramenta de solução de problemas e de ensino de tópicos importantes como operações unitárias, reatores químicos, determinação de grandezas termodinâmicas, entre outros.

A estrutura do trabalho foi desenvolvida em tópicos seguinte forma: no primeiro tópico foi realizada uma revisão bibliográfica do desenvolvimento da engenharia química mediante às demandas da indústria ao longo tempo e a consequente incorporação de *softwares* computacionais em suas práticas. Subsequentemente foram explorados estudos de caso, problemas clássicos da engenharia química

resolvidos por meio de *softwares* diversos e, por fim, o tratamento estatístico do *survey* exploratório, apresentando a percepção dos discentes sobre a aprendizagem e o uso dos recursos computacionais durante o curso.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo principal analisar a conjuntura do ensino de *softwares* computacionais para alunos de engenharia química em universidades federais brasileiras, através de resolução de problemas práticos e pesquisa descritiva.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Exemplificar a solução de problemas clássicos da engenharia química através de sistemas computacionais;
- Realizar pesquisa para conhecer a percepção dos discentes de engenharia química quanto ao uso e utilização de *softwares* computacionais;
- Verificar a relação entre a utilização dos *softwares* durante a graduação e as notas de instituições superiores em Indicadores de Qualidade da Educação Superior.
- Dismistificar e propagar o uso de *softwares* nos cursos de engenharia química na UFPB e no Brasil.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Histórico da Engenharia Química

A primeira revolução industrial, no século XVIII, transformou o mundo conhecido na época. A invenção da máquina a vapor e suas aplicações na indústria têxtil e de transporte impactaram toda a sociedade. As relações de trabalho, o êxodo rural, os meios de transporte e o uso de carvão como fonte de energia foram algumas das mudanças mais significativas (MIN XU, 2018). A manufatura foi substituída pela maquinofatura e as pequenas oficinas dos artesãos pelos grandes galpões das fábricas, que agora produziam em larga escala e possuíam grande demanda por produtos químicos.

Uma vez que as fontes naturais já não eram capazes de suprir essa demanda, dá-se o desenvolvimento da indústria química, para a produção das matérias-primas necessárias às fábricas (Vazzoler, 2017). Marcado pela invenção do processo que transformava sal marinho em carbonato de sódio (Nikolas Le Blank, 1810) o crescimento da indústria química trouxe consigo novas atribuições para os trabalhadores da época, o que com o passar dos anos resultou em novas profissões.

Foi o britânico George Davis que em 1880, identificou pela primeira vez a carência de uma profissão ligada à indústria química. Até então, os chamados “Inspetores de Segurança”, responsáveis por garantir a prevenção de acidentes, tinham em seu posto engenheiros mecânicos com conhecimentos de química ou químicos que possuíssem ampla experiência na indústria, com instrução do processo e dos equipamentos (Vazzoler, 2017).

Em 1888, Davis publicou uma série de lições no *Chemical Trade Journal*, no qual ele divulgou seus conhecimentos baseados na série de palestras que havia ensinado na *Manchester Technical School*, tratando das práticas operacionais da indústria e dos conceitos de Operações Unitárias. Em 1901, tais lições tornaram-se o primeiro livro publicado sobre o assunto: *A Handbook of Chemical Engineering*. Sendo um dos primeiros a se autodenominar engenheiro químico, Davis promoveu a ideia de que a engenharia química era uma nova área, que deveria ser estudada à parte das outras (COHEN, 1996).

Ainda que não tenham sido bem aceitas pelos acadêmicos, tão pouco pelos profissionais da indústria inglesa, suas ideias não foram totalmente desprezadas. De

acordo com o Departamento de Engenharia Química do *Massachusetts Institute of Technology (ChemE MIT)*, Lewis Norton foi influenciado por Davis para criar o primeiro curso de Engenharia Química do mundo. Um curso de quatro anos com o objetivo de preparar alunos para que concilhassem a engenharia mecânica com química industrial, de modo que estivessem aptos aos desafios relacionados ao uso industrial e fabricação de produtos químicos.²

Os trabalhos desenvolvidos por seus alunos demonstram a integração entre as duas áreas, além da contemporaneidade do curso, podendo ser exemplificado por: Produção de Cloro e Sódio Hidratado por Eletrolise do Sal Comum e Produção Comercial de Oxigênio por Eletrólise (*THE JOURNAL OF THE AMERICAN SOCIETY*, 1893).

Ainda de acordo com o ChemE MIT, no início do século XX, William Walker fez mudanças no currículo do curso, que só então o definia claramente como relacionado à uma nova profissão. Em grande parte, devido à inserção das operações unitárias no curso (dando ênfase às etapas básicas que compõem um processo), além de um laboratório de pesquisa e uma “Escola Prática de Engenharia Química”. Em 1907, a instituição se tornou a primeira a conceder doutorado e licenciatura em Engenharia Química.³

O surgimento das sociedades de engenharia química como o Instituto Americano de Engenheiros Químicos (AIChE), nos Estados Unidos, e a Instituição de Engenheiros Químicos (IChemE), na Grã-Bretanha, foram primordiais no processo de desvinculação da engenharia química de outras ciências, além de avaliar e endossar os currículos acadêmicos do curso. O AIChE definiu a engenharia química ainda em 1922 como: “uma ciência em si mesma, baseada nas operações unitárias” (COHEN, 1996). O engenheiro químico era então caracterizado pela coordenação e aplicação em sequência correta dessas operações, conduzindo-as em escala industrial.

Em 1937, o livro *Principles of Chemical Engineering* escrito por Walker, Lewis e McAdams, trazia uma organização sistemática e quantificada das operações unitárias, fluxos de fluidos e de calor, além de métodos matemáticos e dados que permitiam aos engenheiros químicos desenvolverem equipamentos diversos para a indústria (*THE JOURNAUL OF PHYSICAL CHEMISTRY* – 1937). Outras universidades americanas e mesmo europeias contavam com a engenharia química

² Disponível em: <https://cheme.mit.edu/about/history/> Acesso em 23 de out de 2020

³ Disponível em: <https://cheme.mit.edu/about/history/> Acesso em 23 de out de 2020

em seu leque de cursos, todos com foco nas operações unitárias, sendo essa a especialidade que os tornava capazes de atender às demandas da indústria química (COHEN, 1996).

Assim, a engenharia química, antes vista apenas como a técnica de usar equipamentos mecânicos na indústria química, passou a ser vista como uma ciência realmente nova. Tornou-se capaz de produzir em larga escala industrial - com controle de condições físicas e químicas conjuntamente - gerando profissionais com um treinamento diferente dos químicos e engenheiros mecânicos. A demanda da própria indústria por esse tipo de profissional provocou o aumento dos cursos de engenharia química no mundo. Um exemplo disso foi a fundação do curso de engenharia química da Universidade de Cambridge, que segundo seu departamento foi iniciado em 1945, a partir de uma doação feita pela empresa Shell.

No Brasil, o primeiro curso de engenharia química foi criado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), em 1925. Segundo o Departamento de Engenharia Química da USP, a fundação se deu como uma junção e evolução de três cursos: Engenharia Industrial, Química e Química Industrial, e ao longo dos anos sofreu reformas para que pudesse atender às demandas industriais da época⁴. De acordo com o Ministério da Educação do Brasil, atualmente, 180 instituições públicas e privadas de ensino superior oferecem o curso.

Ao longo dos anos, o curso de engenharia química evoluiu, adequando-se às necessidades da indústria e da sociedade. Mesmo a definição dada pela AIChE, que por tanto tempo orientou os cursos de graduação, foi modificada devido ao surgimento de novas demandas. Embora ainda possamos considerar as operações unitárias como unidades essenciais aos processos e, juntamente com os fenômenos de transporte, cinética e termodinâmica química, constituírem a base do conhecimento técnico, o final do século XX trouxe consigo novos elementos indispensáveis na formação, como a globalização, a biotecnologia e a responsabilidade com o meio ambiente.

Dentre as novas demandas, os recursos computacionais apresentam-se como grande fonte de oportunidade: os *softwares* computacionais promovem maior segurança e melhor controle de produção e processos; através da modelagem, simulação, otimização, controle e automação de equipamentos químicos. Contudo, a

⁴ Disponível em: <http://pqj.poli.usp.br/departamento/historia/> Acesso em 23 de out de 2020

partir daí, surge o desafio: como estruturar os cursos de graduação de modo a capacitar os futuros engenheiros químicos para a indústria 4.0? Como apresentar as disciplinas computacionais de modo coerente com a realidade da indústria?

2.2 O uso dos *softwares* na Engenharia Química

Os grandes avanços tecnológicos que ocorreram desde o final do século XVIII marcaram as chamadas revoluções industriais. A mecanização dos processos e o surgimento das fábricas na Primeira Revolução industrial foi apenas o início do desenvolvimento das novas tecnologias que moldaram o mundo como conhecemos hoje (ANDRADE, 2017). A profissão do engenheiro químico, bem como sua formação, que deve prepará-lo para o mercado de trabalho, mudou também.

Durante a Segunda Revolução Industrial, no início do século XIX, os progressos que tanto beneficiaram a economia britânica foram então estendidos aos demais países do oeste europeu. A descoberta da eletricidade, a modernização dos meios de transporte e a comunicação, bem como o desenvolvimento efetivo da indústria química, abriu espaço para maior especialização do trabalho (SILVA e GASPARIN, 2013). A busca por maiores lucros encontrou no fordismo (1914) a produção em massa, que permitia o consumo também em massa. O processo de semi-automação fordista revolucionou a indústria automobilística (SAKURAI, 2018).

A alta demanda por gasolina gerada pela indústria automobilística impulsionou a exploração de petróleo. As ferramentas analíticas disponíveis aos engenheiros químicos dessa época eram limitadas: réguas de cálculo – primeiro computador analítico da história – e nomogramas – desenvolvidos a partir dos anos 1930, eram gráficos que representavam dados de propriedades físicas, e que podiam oferecer soluções, por exemplo, para equações de queda de pressão no escoamento em tubulação (LEITE *et al*, 2014).

As inovações tecnológicas após o final da Segunda Guerra Mundial trouxeram a Terceira Revolução Industrial. Grandes descobertas nas áreas da informática, robótica, telecomunicações, transportes, biotecnologia, química fina e nanotecnologia fazem com que essa revolução também seja chamada de Revolução Técnico-Científica e Informacional (BOETTCHER, 2015). A diversificação das fontes de energia, aumento dos recursos de informática, globalização e massificação dos produtos tecnológicos geraram sistemas de produção cada vez mais complexos e

sofisticados (GORENDER, 1997).

Em 1960, os recursos computacionais se tornaram disponíveis, porém eram onerosos e apenas grandes corporações tinham acesso a eles. O desenvolvimento dos *softwares* não acompanhava a demanda por eles, o que causou a “crise dos *softwares*”. Tal necessidade gerou a engenharia de *softwares*, que agora tinham um desenvolvimento sistemático, controlado para atender à demanda (ROSSETTI e MORALES, 2007). E em 1980, iniciou-se a popularização nos meios acadêmico e empresarial. Nesse período já havia, por exemplo, pacotes de desenho assistido por computador (CAD), que possibilitaram aos engenheiros desenvolver projetos em menos tempo e sem preocupação com os cálculos repetitivos (LEITE et al, 2014).

Os processos de revolução industrial trouxeram consigo inovações que mudaram a realidade econômica e social da época. O investimento em desenvolvimento tecnológico persistiu e observa-se agora a chamada Quarta Revolução Industrial, que traz consigo o conceito de Indústria 4.0. De acordo com Kagermann et al. (2013)⁵ este termo surgiu em 2011, na Alemanha. Com impactos notáveis, este novo modelo de indústria fundamenta-se basicamente em sistemas de produção inteligentes e automatizados (SAKURAI, 2018). Esse fato, alavanca mais uma vez o uso de recursos de *softwares* e, conseqüentemente, a disponibilidade dos mesmos frente à formação dos engenheiros.

2.2.1 Modelagem e Simulação de Processos

A possibilidade de prever comportamentos, analisar processos, simular equipamentos e perturbações sem interferir no processo em operação são algumas das maiores contribuições da engenharia de *software* para a engenharia química. A partir de 1980, a evolução dos computadores e o desenvolvimento de *softwares* trouxeram consigo vários estudos com o objetivo de simular computacionalmente o comportamento de processos industriais (SCHUTZ et Al, 2014). Desde então a modelagem e simulação de processos tornou-se uma ferramenta bastante utilizada na Engenharia Química.

Softwares são conjuntos de dados ou instruções sequenciadas que orientam como um mecanismo deve executar determinadas ações (PRESSMAN, 2010). Estes

⁵ Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 – April 2013

recursos computacionais tornaram-se ferramentas importantes no cotidiano do engenheiro químico, possibilitando, por exemplo: aumentar a precisão de análises; facilitar o dimensionamento de equipamentos e simular seu funcionamento; minimizar erros de cálculo e controlar processos, oferecendo maior segurança na tomada de decisões e maior confiabilidade em relação ao tratamento dos dados das operações (DUARTE; ORELLANA; CAMPOS, 2011).

A modelagem e a simulação de processos proporcionam flexibilidade e alto desempenho, dentre as grandes vantagens da utilização desta metodologia na engenharia química. Cabe salientar que a visualização de dados de resposta de experimentos no processo (através de gráficos, tabelas etc.), que pode ser repetida diversas vezes e em um curto intervalo de tempo reduz custos com empregos de recursos (humanos, naturais e econômicos), diminui riscos operacionais - permitindo a identificação de problemas antes de suas ocorrências e a análise de viabilidade técnica e econômica⁶.

Para o engenheiro químico, o sistema é uma acomodação destinada à transformação complexa de substâncias químicas em escala industrial. Que ocorre de forma sequenciada em equipamentos onde os fenômenos físicos e químicos são controlados. O processo de produção é dado pelo conjunto de etapas cujo projeto e operação são de responsabilidade do engenheiro químico. Uma vez que o sistema e as condições de sua vizinhança estão bem definidas, bem como a problemática ou a análise que se deseja fazer sobre ele, é possível aplicar a metodologia da modelagem e simulação (PERLINGEIRO, 2005).

i) Modelagem

O modelo é uma representação (aproximada, uma vez que não é possível incorporar todas as características do processo real, sejam elas macro ou microscópicas), do sistema real, em um dado instante de tempo e é dado por uma equação ou um conjunto delas. Seu objetivo é proporcionar entendimento do sistema real. (JANA, 2011). O propósito do modelo é o que determina, sua precisão, seu nível de detalhes e, por consequência, o tempo e o esforço que devem ser empregados no desenvolvimento do mesmo (GARCIA, 2005). Além disso o modelo computacional

⁶ Notas de aula, Prof. Dr. Arion de Campos Júnior – UEPG. Disponível em: <https://deinfo.uepg.br/~arion/Bimestre1.pdf>

deve ser desenvolvido utilizando uma abordagem estruturada de análise, *design*, código, teste e manutenção (Menner, 1995).

ii) Simulação

A simulação é uma imitação de um processo real. Através de sua utilização é possível obter respostas temporais das variáveis de interesse (também chamadas variáveis dependentes) de um modelo, quando se causa algum tipo de perturbação conhecida em alguma das variáveis de entrada do sistema, a partir das condições iniciais das variáveis de interesse (UPRETI, 2017). Os estudos nessa área são desenvolvidos desde os computadores analógicos (1945 – 1970) e com o surgimento dos computadores digitais foram fortemente disseminados (GARCIA, 2005). Sua aplicação implica na construção de um protótipo.

A engenharia química foi, desde sua origem, uma ciência pautada na necessidade da indústria, com forte interação com outras ciências envolvidas em processos industriais e, embora não tenha perdido as bases teóricas de seus primórdios: operações unitárias, fenômenos de transporte, termodinâmica e cinética química, os recursos computacionais revolucionaram a forma como engenheiros químicos analisam processos (FINLAYSON, 2006). Atualmente, uma vasta gama de *softwares* está disponível como recurso importante para engenheiros químicos.

A tabela abaixo compila algumas das áreas de atuação da engenharia química e *softwares* que podem ser utilizados na modelagem e simulação de cada tipo de sistema.

Resumo de exemplos e áreas

Tabela 1 : Relação de softwares por aplicação

Mecânica dos fluidos	CFD (COMSOL), Excel CHEMCAD, MATLAB	Fluxo em tubulação; Encanamento; Fluxo de fluidos;
Transferência de calor	CFD (COMSOL) MATLAB	Condução em 2 dimensões
Transferência de massa	CFD (COMSOL)	Difusão em 2 dimensões;

	MATLAB	Transferência de massa e momento
	gPROMS	
Balanco de massa e de energia	gPROMS	Produção de amônia
	Excel	Oxidação de NH ₃
	Mathcad	Fornalha de CaCO ₃
		Síntese gasosa
Operações unitárias	MATLAB	Colunas de destilação;
	Excel	Torres de resfriamento;
	CHEMCAD	Captura de CO ₂
	gPROMS	
Engenharia de reatores	MATLAB	Conversão de SO ₂ em SO ₃
	gPROMS	
	Mathcad	Bioetanol de segunda geração
	GAMS	Reações simultâneas
		Reatores poliméricos
Controle e dinâmica	MATLAB/Simulink	Controle de resposta a partir de uma perturbação
Design de Equipamento	Excel/Mathcad, MATLAB	Evaporadores;
	CHEMCAD, gPROMS	Colunas de destilação;
		Trocadores de Calor;
Análise e design de processo	Excel, ASPEN-HYSIS	Produção de metanol
	CHEMCAD, GAMS	Síntese de amônia
	gPROMS	
Alocação de Planta	GAMS	Design da cadeia de abastecimento
Operação de Planta	AIMMS	Cronograma

Fonte: adaptada de *Introduction to softwares for Chemical Engineers* – Taylor e Francis Group (2015).

2.2.2. Softwares CAPE-Open

A modelagem e a simulação de processos tornaram-se instrumentos indispensáveis para a prática da engenharia química atualmente. Conforme visto,

existe uma ampla gama de sistemas computacionais (gratuitos e comerciais – com disponibilidade de licenças empresariais e acadêmicas), que buscam suprir a demanda nas áreas de *design* e controle de processos que permitem análise de viabilidade econômica e Ambiental, treinamento de operadores etc.

No entanto, ainda que disponham de um considerável acervo de modelos termodinâmicos e operações unitárias disponíveis, estes são genéricos, e mesmo que suas bases de dados sejam constantemente atualizadas, nem sempre é possível utilizá-los para descrever de forma acurada os equipamentos industriais e as substâncias químicas, envolvidas nos diversos processos (BATEN e PONS, 2014).

Em 1997 foi lançado o projeto CAPE-OPEN, com o objetivo de padronizar os componentes dos *softwares* de simulação da indústria de modo a realizar o chamado “*plug and play*” (conectar e usar) (BELAUD e PONS, 2002). Para compreender tal conceito pode-se exemplificar a fabricação de um carro. As partes são pré-montadas separadamente: bancos, lataria, equipamentos eletrônicos, e, por fim, as peças são colocadas na linha de montagem para que as partes sejam conectadas e o carro esteja pronto para o uso.

O CAPE-OPEN oferece um método que permite a operação de unidades e modelos termodinâmicos (elementos do *Computer-Aided Process Engineering*, CAPE) que possam ser conectados e utilizados em fluxos de diversos programas. A principal vantagem do CAPE-OPEN, é sua larga implementação em aplicativos de simulação, modelos de operação, pacotes termodinâmicos, o que foi reconhecido pela indústria e pela academia desde o início (BATEN e PONS, 2014). Atualmente, a maioria dos simuladores comerciais são compatíveis com o uso de CAPE-OPEN nos modelos de operação e modelos termodinâmicos.

Em 2001 foi fundada a CAPE-OPEN Laboratories Network (CO-LaN), uma organização sem fins lucrativos para a gestão do padrão CAPE-OPEN. Definindo as diretrizes e campos de interação entre *softwares* e componentes de CAPE para que a interoperação (comunicação, troca de informações de forma eficaz e eficiente, de como que os sistemas possam trabalhar conjuntamente) entre eles seja bem sucedida⁷. As interfaces CAPE-OPEN são divididas em: termodinâmica, operações unitárias, solucionador numérico e comuns genéricas (BATEN e PONS, 2014).

A utilização da interface CAPE-OPEN em qualquer um dos âmbitos de ação

⁷ Disponível em <https://www.colan.org/bylaws/french-october-15-2020/>

acima citados, diminui o esforço empregado no desenvolvimento e manutenção de *softwares*, e permite resultados de simulação consistentes em diferentes plataformas. Além de distribuir implementações sem necessidade de uma licença intelectual ou restrições de propriedade (BATEN e PONS, 2014).

2.3. Ensino dos *softwares* nos cursos de graduação Engenharia Química

O primeiro curso de engenharia química era essencialmente uma combinação de engenharia mecânica com conceitos de química⁸. Rapidamente, a demanda da indústria moldou o curso de graduação como o conhecemos hoje, com áreas de conhecimento que não são abrangidas por nenhuma outra profissão (LEITE et al, 2014). Os conhecimentos de operações unitárias, fenômenos de transporte, cinética e termodinâmica permanecem fundamentais, no entanto novas competências passaram a ser requeridas. Segundo a *ICHEME*⁹ a competência de trabalhar com *softwares* é uma das dez habilidades que os engenheiros químicos deveriam ter.

Os recursos computacionais transformaram completamente a forma como os engenheiros químicos estruturam e analisam processos, desde micro reatores até grandes equipamentos de separação. Muitos dos problemas de engenharia que hoje são exercícios para os estudantes de graduação têm complexidade similar aos problemas que há 60 anos atrás cabia aos estudantes de doutorado. (FINLAYSON, 2006). Já não é necessário que cada engenheiro escreva seu próprio *software*, diversos sistemas operacionais, gratuitos e pagos, estão disponíveis para as mais diversas aplicações, permitindo análises e decisões mais rápidas e confiáveis.

O progresso da engenharia, e em especial do seu ensino, está intimamente associado aos avanços da ciência e da tecnologia (SILVA, 2015). Para a chamada indústria 4.0, questões como: gerenciamento de qualidade digital; monitoramento e controle remotos; manutenção preditiva e consumo inteligente de energia são as preocupações atuais da indústria química (MCKINSEY DIGITAL, 2016). Estas exigem níveis avançados de ferramentas computacionais, e assim, devem orientar os

⁸ Disponível em: <https://cheme.mit.edu/about/history/> Acesso em 23 de out de 2020

⁹ De acordo com a *ICHEME*, ser apenas focado em solução e competências matemáticas, não descrevem suficientemente as habilidades demandadas do engenheiro químico. As dez habilidades e valores que os engenheiros químicos devem ter são: Criativos; Solucionadores de problemas; Trabalhadores de Equipe; Aprendizes ao longo da vida; Organizados; Inquisidores; Conhecedores de recursos computacionais; Líderes; Orientados para detalhes; Manter calma sob pressão.

conhecimentos transmitidos aos alunos, bem como de que ferramentas eles devem dispor para desenvolver tais habilidades.

Ainda que a inclusão de disciplinas de computação para alunos de engenharia química aconteça desde o início dos anos 1970 (DIAS, VASCONCELOS, BRITO, 2013), muitas instituições ainda não assimilaram as mudanças do mercado de trabalho ou materializaram tais mudanças em adaptações no ensino (SILVA, CECÍLIO, 2007). A boa notícia é que diante dos grandes avanços tecnológicos envolvendo as ferramentas computacionais, que podem ser aplicadas em análise e desenvolvimento industrial nas áreas relacionadas à engenharia química, cada vez mais universidades estão utilizando simuladores em seus projetos e pesquisas (FERNANDES, 2002).

Instituições ao redor do mundo trabalham analisando currículos dos cursos de Engenharia com o objetivo de garantir um conjunto mínimo de disciplinas que formam o núcleo de aprendizagem. No cenário internacional, pode-se destacar o Programa ABET (*Accreditation Board for Engineering and Technology, Inc.*), fundado em 1932 por sete sociedades de engenharia incluindo a AIChE. Ele atua na promoção da qualidade educacional, acreditando currículos de engenharia (e outras ciências)¹⁰, estabelecendo critérios para que os cursos ministrados em diferentes universidades de países diversos pudessem ser considerados equivalentes.

Quanto às habilidades computacionais nos currículos de engenharia, a posição da ABET é de que todos os alunos devem ter incluídas em seu currículo, experiências com *softwares*: cálculos técnicos, solução de problemas, controle de processos, *design* auxiliado por computador (CAD), de modo que ao final do curso o aluno possa demonstrar conhecimento de técnicas computacionais para problemas específicos da engenharia (KANTOR e EDGAR, 1996)

No Brasil, o Ministério da Educação, através do Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (SINAES), criado pela Lei nº 10.861, de 14 de abril de 2004, é responsável pela avaliação e reconhecimento dos currículos acadêmicos do ensino superior. Em 2002 foram estabelecidas as Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Graduação em Engenharia¹¹, determinando currículos mínimos dos cursos.

¹⁰ ABET CONSTITUTION - CURRENT AS OF 2015

¹¹ Conselho Nacional de Educação Câmara De Educação Superior Resolução Cne/Ces 11, de 11 de Março De 2002.

Essas diretrizes são particularmente importantes devido ao contexto histórico, uma vez que as escolas de engenharia no Brasil apresentam um atraso devido à instalação tardia das indústrias no país (TONINI, 2007).

A estrutura geral dos cursos de engenharia química é composta por quatro áreas: ciências básicas (matemática, física, química e informática), núcleo da engenharia (operações unitárias, fenômenos de transporte, reatores, termodinâmica, controle de processos, operações monitoradas por computador), disciplinas complementares (obrigatórias ou eletivas) e treinamento externo (através de estágios) (AZEVEDO, 2001). Ou seja, o objetivo é oferecer aos estudantes uma forte base físico-matemática associados a conhecimentos politécnicos, assim o engenheiro formado está apto a trabalhar nos diversos setores da indústria (LEITE et al, 2014).

No entanto, na maior parte das instituições, os alunos são apresentados às disciplinas de programação e métodos numéricos sem que estes conceitos sejam aplicados nas disciplinas específicas do curso (DIAS; VASCONCELOS; BRITO – 2013). Ainda que a prática da engenharia química tenha se tornado fortemente dependente da computação, a inserção dos *softwares* para os estudantes tem sido lenta, e muitas vezes se restringe apenas às tabelas e documentos de texto para relatórios das práticas de laboratório (KANTOR e EDGAR – 1996).

O não-uso dos *softwares* por estudantes de engenharia química é um problema discutido ao longo dos anos (JONES, 1998), no entanto a incorporação dos métodos de resolução de problemas baseados em computador é inadiável. As disciplinas fundamentais da engenharia química (termodinâmica, fenômenos de transporte, operações unitárias e reatores químicos) oferecem diversas oportunidades de resolver problemas realistas através de *softwares*, além de proporcionar aos estudantes um pensamento sistemático dos processos (DIAS; VASCONCELOS; BRITO – 2013).

Diante dessa realidade, cabe o questionamento: os estudantes estão aprendendo a resolver problemas realísticos da engenharia química ou estão apenas aprendendo a sintaxe de uma linguagem de programação específica no início do curso, quando ainda não possuem uma concepção integral do que é a engenharia química? Quando os estudantes aprendem as disciplinas específicas do curso (frequentemente apresentadas de forma independente), eles têm a oportunidade de utilizar suas habilidades de programação de modo que possam visualizar processos complexos?

2.3.1. Learn-by-doing

“Diga-me e irei esquecer, mostre-me e eu posso lembrar, envolva-me e eu entenderei.” Provérbio Chinês.

Como já foi discutido, o propósito da engenharia química, desde a sua criação, é empregar o conhecimento das ciências aliado às demandas da sociedade para projetar e otimizar máquinas, equipamentos, materiais e processos industriais (ZANROSSO; COSTA; KINAST, 2018). A ciência é o estudo do que existe, e a engenharia é a criação do que nunca existiu.¹² Desse modo, a ênfase não está em “o que o engenheiro sabe”, mas sim em “o que o engenheiro faz com o que sabe”. Assim, mesmo diante de situações novas é possível aplicar os conceitos já conhecidos para os desafios inéditos (REIGELUTH, 2013).

Duas metodologias têm sido aplicadas nas engenharias com objetivo de preparar os estudantes para os desafios do mercado ao final da graduação. *Learn-by-doing* (Aprender Fazendo, em tradução livre), que visa obtenção de conhecimentos através do envolvimento prático dos estudantes, aplicando os conhecimentos à medida que são apresentados, e não separados em nichos acadêmicos (BAREISS, SEDANO, 2012). E Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL do inglês *Problem-Based Learning*), que é determinada pelo uso de problemas reais para despertar o desenvolvimento de pensamento crítico que permita a utilização dos conceitos aprendidos para a resolução de tais problemas (MEIRELES, BONIFÁCIO, 2015).

A valorização das disciplinas de programação no currículo de engenharia química não é recente (KASSIM e CADBURY, 1996). Tais estudos podem desenvolver no aluno a habilidade de solução de problemas através da abordagem lógica e a possibilidade de conectar os conceitos das demais disciplinas. Ao trabalhar com *softwares* computacionais, os alunos desenvolvem também: autonomia para resolver problemas, raciocínio sistemático, planejamento e criatividade. Permitindo a vivência dos problemas técnicos industriais e absorvendo as competências que serão exigidas do jovem profissional pelo mercado.

A simulação por exemplo, permite aos estudantes ambientar-se com a prática de fenômenos complexos, de forma eficiente e com baixo custo, além de estar em um ambiente onde é possível realizar testes diversos, de forma segura e controlada

¹² The Essential Engineer – Why Science Alone Will Not Solve Our Global Problems – Henri Petroski, 2010

(LEVY, 1997). Indispensável para o mercado de trabalho da engenharia química, a simulação permite resoluções de problemas complexos e, com frequência, quase impossíveis de serem resolvidos de forma manual (ou que seriam demoradas) em poucos minutos. Além de ser de grande utilidade para que os alunos compreendam os conteúdos das disciplinas fundamentais entre si e com a realidade (SILVA e CECÍLIO, 2015).

Isso permite aos alunos que constantemente se sentem desencorajados com a aparente desconexão entre os conteúdos e não compreendem onde esses serão aplicados, possam pouco a pouco encaixar os conhecimentos adquiridos até aquele ponto (desde as disciplinas básicas necessárias para sustentar as profissionalizantes). O uso dos *softwares* faz com que o estudante esteja integrado e ativo no processo de aprendizagem, incorporando a prática à teoria e, através desta, adquirir as habilidades adequadas para o futuro profissional de engenharia (SILVA e CECÍLIO, 2015).

Diante de todo o desenvolvimento tecnológico já discutido, os estudantes de engenharia química precisam estar aptos para resolver problemas cada vez mais complexos. A programação, antes realizada por cada aluno em *softwares* como FORTRAN e MATLAB, agora é facilitada pelo uso de simuladores, onde não é mais necessário escrever seus próprios códigos e sim aplicar os conhecimentos teóricos para resolver problemas difíceis e o computador é uma ferramenta indispensável para tal.

Neste trabalho encontram-se apresentados problemas clássicos da engenharia química, que agregam, conhecimentos de diversas disciplinas e que representam bem o tipo de problema que os futuros engenheiros encontrarão nas diversas áreas de atuação. Foram solucionados utilizando os simuladores SimCentral – AVEVA, COCO (CAPE-OPEN to CAPE OPEN), os softwares iterativos SciLab e MatLab, além do Microsoft Excel, no entanto outros softwares também poderiam ser utilizados. Os problemas foram retirados e adaptados do livro *Introduction to Chemical Engineering Computing*, 2006 de Bruce A. Finlayson, desenvolvido com base na experiência em sala de aula desse professor na Universidade de Washington.

É importante salientar que existem inúmeras alternativas aos métodos e aos *softwares* aqui utilizados para a resolução dos problemas. Conforme já exposto o uso dos sistemas computacionais por si só, não são necessariamente objetivo final e sim, utilizá-los como ferramentas importantes para aprender e familiarizar-se com eles para

assim aplicá-los na resolução de problemas diversos.

Para demonstração foram escolhidos problemas sobre equilíbrio com reação química, balanço de massa com correntes de reciclo, reatores químicos, coluna de destilação e análise de perfil de velocidade em microcanal.

i) Equilíbrio com Reação Química

Em uma reação química onde há equilíbrio, este dita o limite máximo para a conversão, sendo assim é necessário conhecer a conversão no estado de equilíbrio da reação. Em seguida, a taxa da reação determina o volume necessário para o reator. Uma reação química com equilíbrio pode ser expressa por equações algébricas não lineares que são resolvidas simultaneamente. O equilíbrio é influenciado pela temperatura do sistema, e também pela pressão quando trata-se de uma reação envolvendo espécies gasosas. Além disso é possível adicionar catalisadores para tornar a reação mais rápida, o que influencia na composição final dos produtos. (ATKINS e JONES, 2001)

ii) Balanço de Massa com Correntes de Reciclo

Engenheiros utilizam balanços de massa para projetar e operar fábricas de produtos químicos, inclusive para avaliar se um processo é economicamente viável. Matematicamente falando, a formulação dos balanços de massa é simples, estes podem ser totais ou parciais e normalmente envolvem equipamentos como misturadores, separadores e reatores. No entanto, por motivos diversos os reagentes não são totalmente convertidos em produtos, sendo assim é adicionada uma corrente de reciclo ao processo, de modo que os reagentes não convertidos retornam à parte inicial do processo, de modo que não haja desperdícios. A adição da corrente de reciclo torna o balanço de massa mais complexo, assim, é necessário utilizar métodos iterativos de solução para solucioná-los (JANA, 2011).

iii) Reatores Químicos

Um dos aspectos que diferenciam um engenheiro químico de engenheiros de outras áreas é a habilidade de lidar com reações químicas, o processo de conversão de espécies químicas em outras de maior interesse. O entendimento das reações permite a eles modelar os equipamentos onde as reações ocorrem, os reatores. De acordo com a reação, a fase dos reagentes, velocidade da reação, necessidade de

agitação ou de catálise etc, é realizada a seleção do dispositivo. Para a resolução de problemas envolvendo reatores é necessário a utilização de equações diferenciais ordinárias como problemas de valor inicial, ou seja, a partir das condições iniciais do problema a equação diferencial atualiza seus valores expondo assim o comportamento do sistema ao longo do tempo (FOLGLER, 1992). Um reator CSTR (do inglês *continuous stirred-tank reactor*) é um reator de mistura considerada perfeita que opera em estado estacionário (STENSTROM e ROSSO, 2003).

A cinética enzimática estuda a velocidade das reações catalisadas por enzimas. Assim como qualquer catalisador as enzimas não alteram o equilíbrio da reação, no entanto, estas saturam-se. Isso ocorre porque as enzimas possuem entros catalíticos que se conectam com o substrato para formar um produto, em certo ponto quando todos os centros estão ocupados, o aumento da concentração do substrato não aumenta a conversão, uma vez que não há disponibilidade enzimática. A cinética de Michaelis-Menten é um dos modelos mais difundidos para descrever esse processo. Expressa-se na forma de equação que caracteriza a taxa das reações enzimáticas, associada à concentração de substrato (BORZANI, 2001).

iv) Coluna de Destilação

Dentre os processos de separação realizados na indústria química, a destilação é a mais difundida. A destilação (também conhecida como destilação fracionária) consiste na separação dos compostos químicos de uma mistura e é fundamentada na diferença entre os pontos de ebulição dos componentes envolvidos. Desse modo a mistura é aquecida até uma temperatura na qual as frações da mistura sofrem vaporização (ABDEL-AAL, 2017).

v) Análise de Perfil de Velocidade em Microcanal

A resolução desse problema envolve os conceitos aprendidos na disciplina de fenômenos de transporte: transferência de massa também conhecida como mecânica dos fluidos. A microfluídica é a área que estuda os sistemas que manipulam quantidades muito pequenas de fluido, usando canais com dimensões micrométricas (de 10^{-5} a 10^{-4} metros) conhecidos como microdispositivos. Muito do avanço na área deu-se através do desenvolvimento computacional. A fluidodinâmica computacional realiza a simulação numérica de sistemas de escoamento. Para a realização da simulação do fluxo gás-líquido (SILVA, 2018).

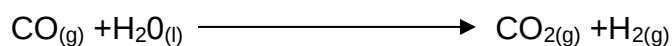
3. METODOLOGIA

3.1 Estudos de Casos

Os problemas escolhidos, bem como os softwares e métodos utilizados para suas respectivas resoluções são apresentados a seguir:

Problema 1 - Um processo para produção de hidrogênio utiliza gás de um reformador, o gás é alimentado em um reator onde a reação de deslocamento água-gás ocorre. Sob condições operacionais usuais, a corrente saindo do reator está em equilíbrio com a temperatura da saída. A taxa de alimentação para essa parte do processo (em lbmol/h) a 1778 °C e 1,36 atm é: CO – 1260; H₂ – 932; CO₂ – 140; Vapor – 1972. A corrente chega ao reator e a saída do reator está em equilíbrio à 3778 °C. A constante de equilíbrio a 3778 °C é 15,6. Encontre a composição de equilíbrio da corrente que sai do reator.

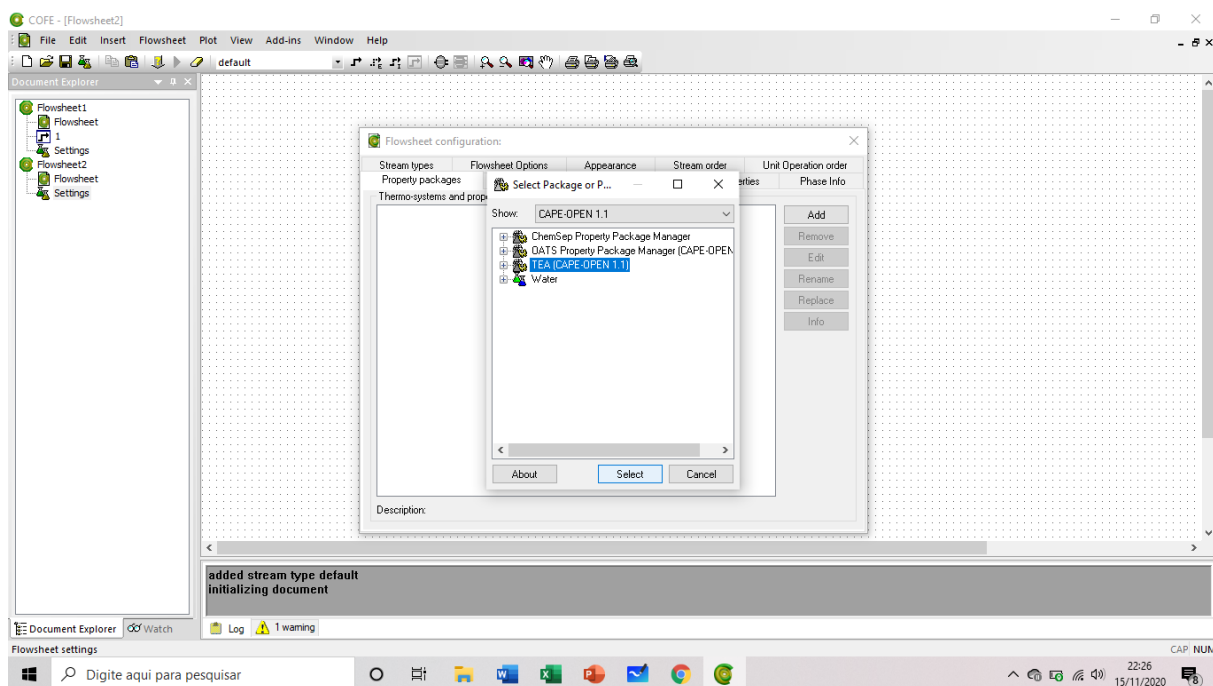
Resolução: Para resolver este problema é necessário conhecer a equação química referente à reação. Esta é dada por:



Identificando a reação química e as condições em que ela ocorre, pode-se realizar uma simulação, para conhecer a composição de equilíbrio na saída do reator. O ambiente computacional escolhido para a simulação foi o COCO (Cape Open to Cape Open) um *software* gratuito que permite a inserção de dados e equações. Embora seu acervo de modelos, de fluidos e pacotes termodinâmicos não seja tão volumoso, quanto de outros *softwares* pagos. Sua interface intuitiva e simplificada, torna-o uma opção relevante.

O primeiro passo é a definição dos componentes envolvidos e das grandezas termodinâmicas. Para tal, utiliza-se o pacote *Thermodynamics for Engineering Applications* (TEA, Termodinâmica para aplicações de Engenharia) onde é disponibilizado um banco de dados de substâncias químicas e métodos de cálculo de propriedades termodinâmicas. Todas as espécies químicas envolvidas na reação devem ser adicionadas.

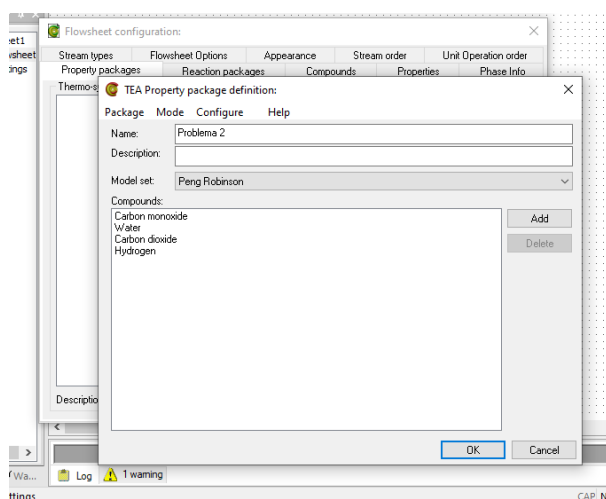
Figura 1 – Início simulação de reação química no software COCO.



Fonte: elaboração própria

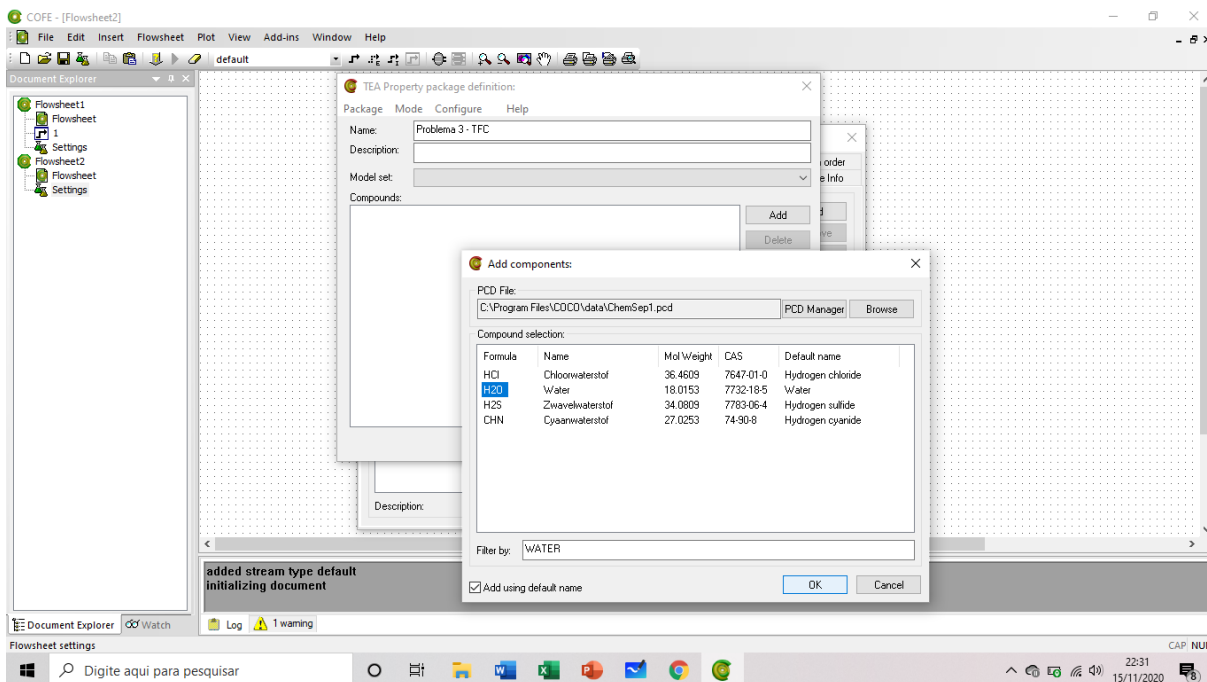
As substâncias podem ser encontradas, pelo nome, fórmula química, massa molar, e CAS (*Chemical Abstracts Service* – Serviço de Resumos Químicos, cada substância possui um código CAS único). A equação termodinâmica escolhida foi Peng-Robinson. A seleção dos componentes foi feita utilizando o caminho: File > New

Figura 2 – Seleção das espécies químicas envolvidas na reação.



Fonte: elaboração própria

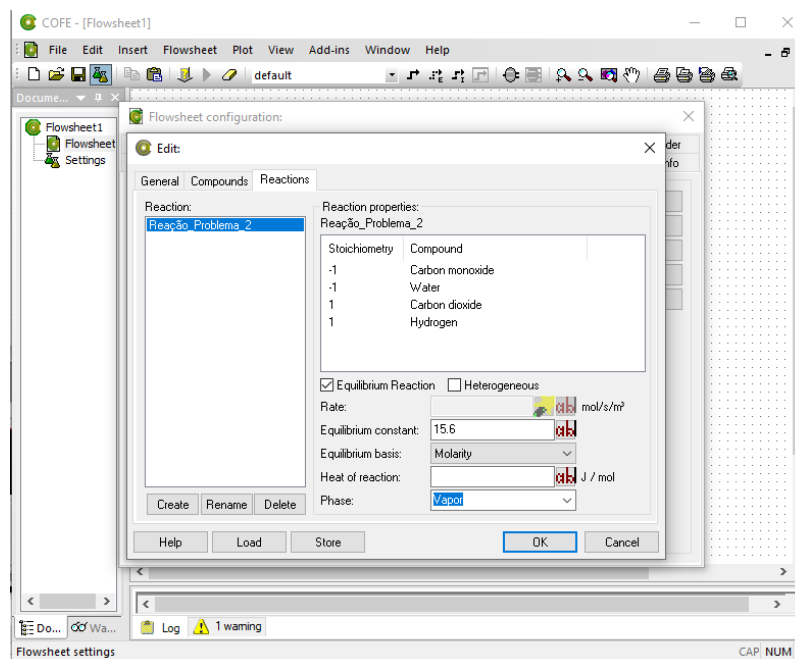
Figura 3 – Seleção das espécies envolvidas na reação e escolha do método termodinâmico



Fonte: elaboração própria

Essas espécies são adicionadas à guia de reações, onde é definido um nome para a reação e a estequiometria bem como a constante de equilíbrio devem ser informadas.

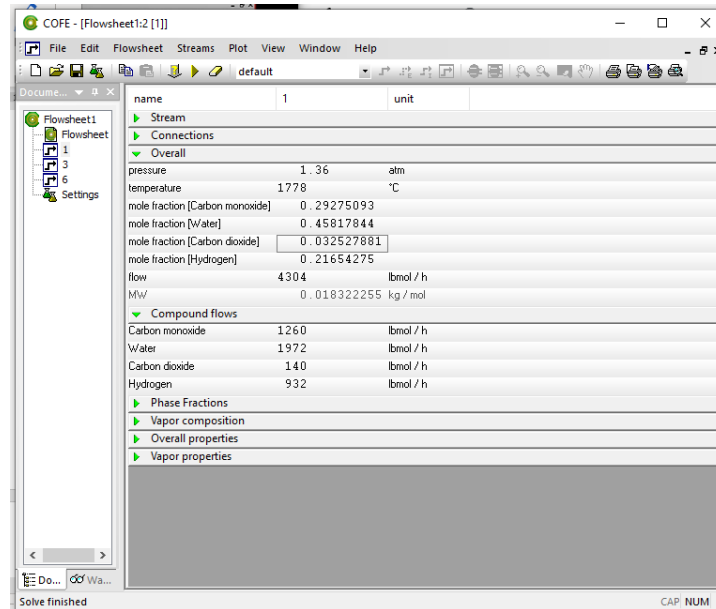
Figura 4 – Definição da estequiometria, fase e constante de equilíbrio da reação



Fonte: elaboração própria

Com tais seleções realizadas, é iniciada a construção do PFD no simulador. É necessário adicionar uma corrente e configurá-la nas condições de pressão, temperatura do problema. Além de definir às vazões de entrada dos reagentes.

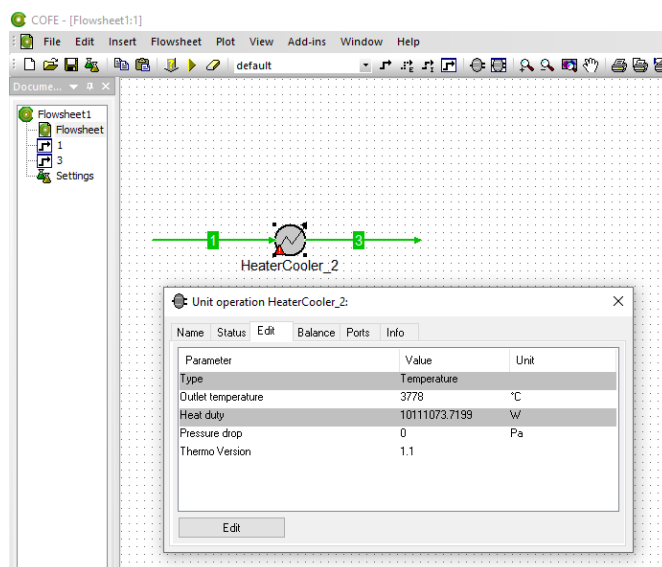
Figura 5 – Definição da temperatura, pressão e vazões da corrente de entrada



Fonte: elaboração própria

A constante de equilíbrio é referente a uma temperatura diferente da alimentação sendo assim é necessário adicionar um trocador de calor, e mais uma corrente que será a alimentação efetiva do reator.

Figura 6 – Trocador de calor para aquecimento da corrente de entrada do reator.



Fonte: elaboração própria

O reator de equilíbrio é então adicionado e configurado, e é adicionado uma

corrente de saída. Com a execução e convergência da simulação, é possível conhecer a composição de saída do processo.

Problema 2 - Cloreto de etila é manufaturado em um processo integrado. Complete o balanço de massa para esse processo. O etano reage com o gás cloro formando o cloro-etil e ácido clorídrico, e o etileno reage com o ácido clorídrico formando cloro-etil.

Figura 7 – Fluxograma do processo de produção do cloreto de etila

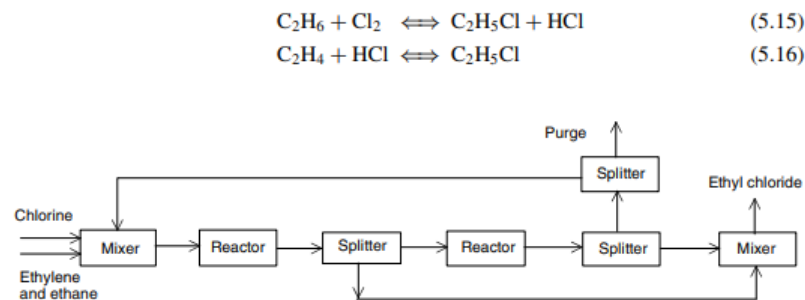
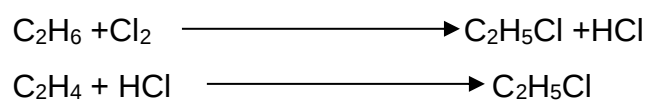


Figure 5.13. Ethyl chloride process.

Fonte: Stirling, 1984, p. 72

Esse processo é alimentado com três correntes: etano, etileno e gás cloro. As correntes de etano e o etileno tem a mesma vazão molar, e a razão entre o gás cloro e o etano mais etileno é 1,5. As correntes de alimentação são misturadas com uma corrente de reciclo de etileno e vão para o primeiro reator (reator de cloração) onde o etano reage com o gás cloro à 95 por cento de conversão por passe. A corrente de produto é resfriada e o cloro-etil é condensado e separado. Assuma que todo o etano e cloro-etil saem na corrente condensada. Os gases vão para outro reator (reator de hidrocloreção) onde a reação com etileno ocorre a 50% de conversão por passe. A corrente de produto é resfriada para condensar o cloro-etil, e os gases (predominantemente etileno e cloro) são reciclados. A purga é uma fração de corrente de reciclo (use 1%). Complete o balanço de massa para esse processo.

Resolução: Para este problema, duas reações são processadas, uma em cada reator.

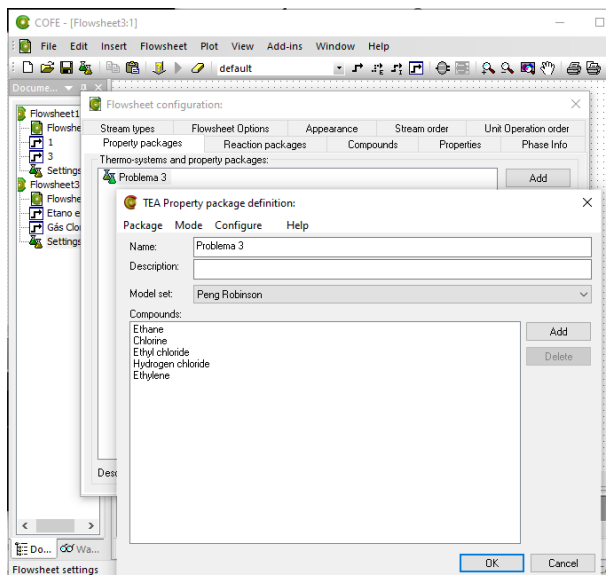


A metodologia de resolução é semelhante à utilizada no problema anterior. O

ambiente computacional utilizado foi novamente o COCO (Cape Open to Cape Open).

Novamente, todas as espécies químicas envolvidas nas reações devem ser adicionadas, o método termodinâmico escolhido foi o de Soave-Redlich-Kwong.

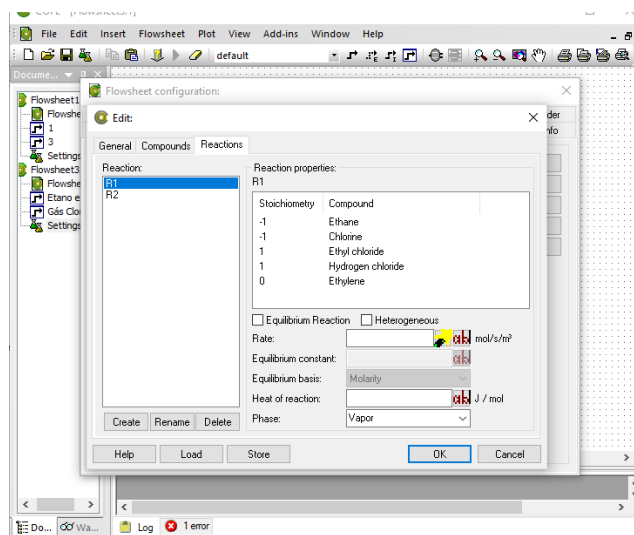
Figura 8 – Seleção das espécies químicas envolvidas nas reações.



Fonte: elaboração própria

Em seguida, foi especificada a fase e a estequiometria dos reagentes e produtos para cada uma das reações.

Figura 9 – Ajuste da estequiometria e fase da reação.



Fonte: elaboração própria

O problema não especificou as condições de operação do processo. Logo, optou-se por definir as condições de 1,5 atm e 30°C. Também não foram especificadas as vazões de alimentação, apenas a proporção entre elas. Desse modo a

configuração das entradas foi:

Figura 10 – Determinação do fluxo molar, pressão e temperatura das espécies químicas envolvidas nas reações

name	Etano + Etileno	unit
pressure	1	atm
temperature	30	°C
mole fraction [Ethane]	0.5	
mole fraction [Chlorine]	0	
mole fraction [Hydrogen chloride]	0	
mole fraction [Ethyl chloride]	0	
mole fraction [Ethylene]	0.5	
flow	400	mol / s
MW	0.0290611	kg / mol

name	Gás Cloro	unit
pressure	1	atm
temperature	30	°C
mole fraction [Ethane]	0	
mole fraction [Chlorine]	1	
mole fraction [Hydrogen chloride]	0	
mole fraction [Ethyl chloride]	0	
mole fraction [Ethylene]	0	
flow	600	mol / s
MW	0.070905998	kg / mol

Fonte: elaboração própria

As duas correntes foram misturadas, e mais à frente a corrente de reciclo será adicionada a este *mixer*. Em seguida é possível configurar o primeiro reator, onde ocorre o processo de cloração (primeira reação), uma vez que a conversão foi especificada no problema, foi escolhido o reator de conversão fixa. Ele opera isotermicamente na temperatura especificada ou com uma taxa de calor especificada. A corrente de saída do reator é conduzida para um separador. Pela estequiometria da reação, vemos reagente limitante é o etano.

Figura 11 – Configuração do reator de conversão constante

Parameter	Value	Unit
Pressure drop	0	Pa
Heat duty type	Isenthalpic	
Temperature	300	K
Heat duty	-23071916.6806	W
Enthalpy Type	Use EnthalpyF	
Thermo Version	1.1	
Conversion Ethane reaction R1	0.95	

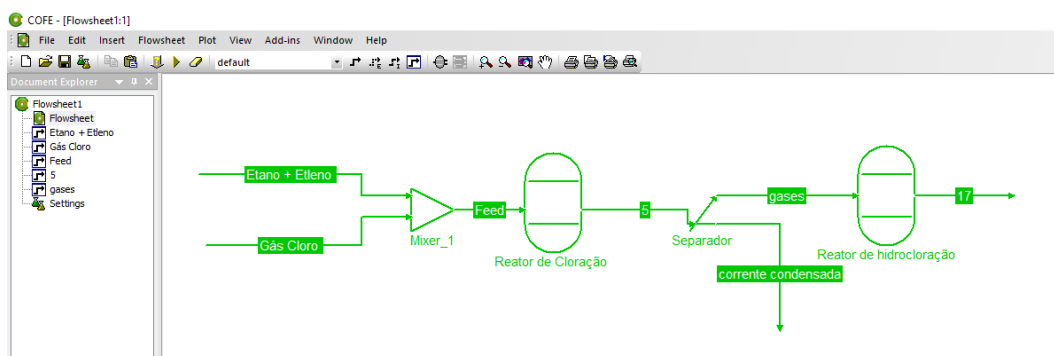
Conversion	Of Compound	In Reaction
0.95	Ethane	R1

Fonte: elaboração própria

Após a reação o etano e o cloro-etil são condensados e separados dos demais gases, que seguem para o segundo reator.

O segundo reator também é do tipo conversão fixa, sua configuração é semelhante à realizada no primeiro, o reagente limitante para essa reação é o ácido clorídrico.

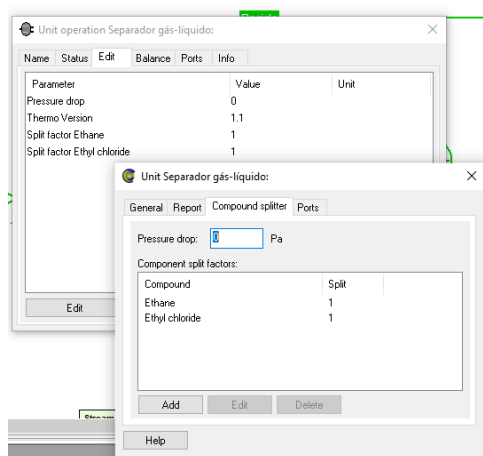
Figura 12 – PFD parcial do processo



Fonte: elaboração própria

As correntes de saída de cada um dos reatores passaram por um separador seletivo, o primeiro para separação do etano e cloro-etil, condensados (que serão adicionados à corrente condensada de saída do segundo reator, formando a corrente de produto do processo). O tipo separador utilizado, está exemplificado pelo separador da saída do primeiro reator.

Figura 13 – Separador de componentes



Fonte: elaboração própria

O separador usado para dividir a porção da purga da corrente de reciclo, é um separador convencional configurado para que a purga seja 1% da corrente gasosa. O PFD final do processo e as vazões das principais correntes encontram-se abaixo:

Problema 3 - No problema a seguir (retirado de Shuler, 1988) encontre o comportamento das concentrações de substrato, produto e biomassa no reator. O modelo de reação de Michaelis-Menten é governado por:

$$\text{taxa de reação} = \frac{k_0 S}{S + K_m}$$

Onde: k_m (constante cinética) = 10^{-4} mol/l; k_0 (constante cinética) = 5×10^{-6} mol/s mg de enzima; ε (carga enzimática) = $1,6 \times 10^{-4}$ mg de enzima/cm² e S (concentração na superfície).

Resolução: O ambiente computacional escolhido foi o SciLab, um *software* iterativo para computação numérica, é gratuito e tem interface muito semelhante ao o MatLab. O problema especifica a taxa de reação. Esta será inserida no algoritmo de resolução como uma função, onde são definidas as variáveis de entrada e de saída.

```
function dxt=processo(t, x)

    global D Km Si Eps mu

    X=x(1) //conc. de biomassa
    S=x(2) //conc. de substrato
    P=x(3) // conc. de produto

    // Taxa de reação
    mu=k0*S/(Km+S)

    //Balanços de massa
    dXt=(mu-D)*X
    dSt=D*(Si-S)-mu*X/Eps
    dPt=mu*X-D*P

    dxt=[dXt,dSt,dPt]

endfunction
```

Os parâmetros definidos como globais são utilizados ao longo de todo o algoritmo. Os balanços de massa nos permitem observar, a partir da taxa de reação a

```
//dados
D=0.3 // fator de diluição considerando um reator CSTR
Km=0.012 //constante cinética
Si=4 // conc. inicial de substrato
Eps=0.4 // carga enzimática
k0=0.54 //const. cinética em função da enzima

//Definição das Condições iniciais
X0=1
S0=Si
P0=0
```

formação do produto e o crescimento da biomassa enquanto ocorre o consumo do substrato. É necessário especificar os parâmetros envolvidos e as condições iniciais do problema, nesse caso as concentrações iniciais de biomassa, substrato e produto.

Esses dados são então aplicados em um método Runge-Kutta (de quarta ordem), que encontra uma solução numérica para as equações diferenciais ordinárias dadas as condições iniciais configuradas.

```
//Simulação Dinamica

t0=0 // tempo inicial
t=t0:0.1:15 // tempo de integração
x0=[X0;S0;P0] // matriz das condições iniciais

x=ode(x0,t0,t,processo) // runge-kutta

X=x(1,:) // linha da matriz de resultados com o comportamento da biomassa
S=x(2,:) // linha da matriz de resultados com o comportamento do substrato
P=x(3,:) // linha da matriz de resultados com o comportamento do produto
```

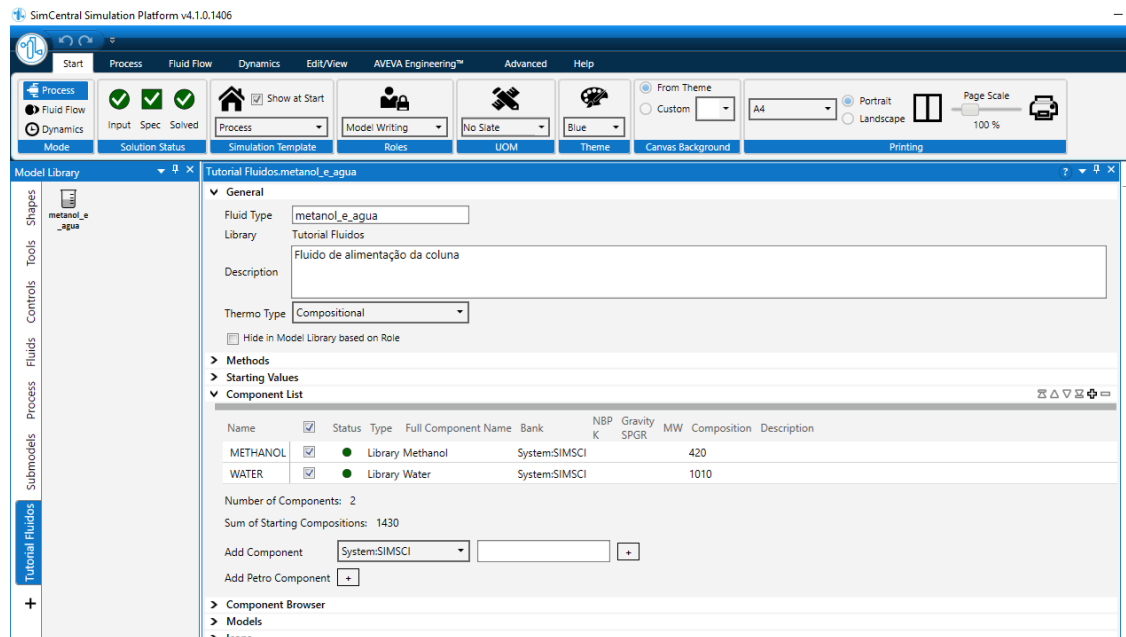
O método Runge-Kutta calcula os valores das concentrações de substrato, produto e biomassa, dentro do intervalo de tempo definido (15 segundos) com o intervalo selecionado. Para melhor visualização do comportamento das variáveis durante o processo, optou-se por pela plotagem de gráficos.

```
plot(t,X,t,S,t,P)
legend('Biomassa','Substrato','Produto')
xlabel('tempo')
ylabel('Concentração Mol/L')
```

Problema 4 – Coluna de Destilação

Para a determinação da razão de refluxo em uma coluna de destilação de uma mistura de metanol e água, o ambiente computacional escolhido foi o simulador SimCentral – AVEVA. Ainda que se trate de outro simulador o processo para solução é semelhante. Inicia-se com a seleção das espécies envolvidas e método termodinâmico.

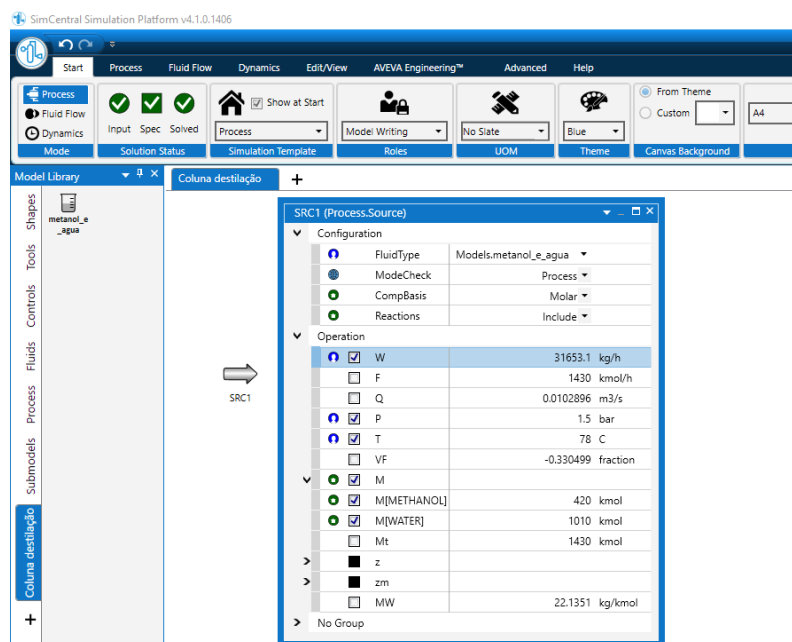
Figura 14 – Escolha dos componentes da mistura a ser destilada e seleção do método termodinâmico.



Fonte: elaboração própria

Em seguida é inserida uma fonte contendo o fluido customizado que foi criado. Esta será a alimentação da coluna. Foram determinadas a pressão e temperatura da alimentação, bem como a vazão mássica e as frações dos componentes.

Figura 15 – Configuração da alimentação da coluna de destilação.

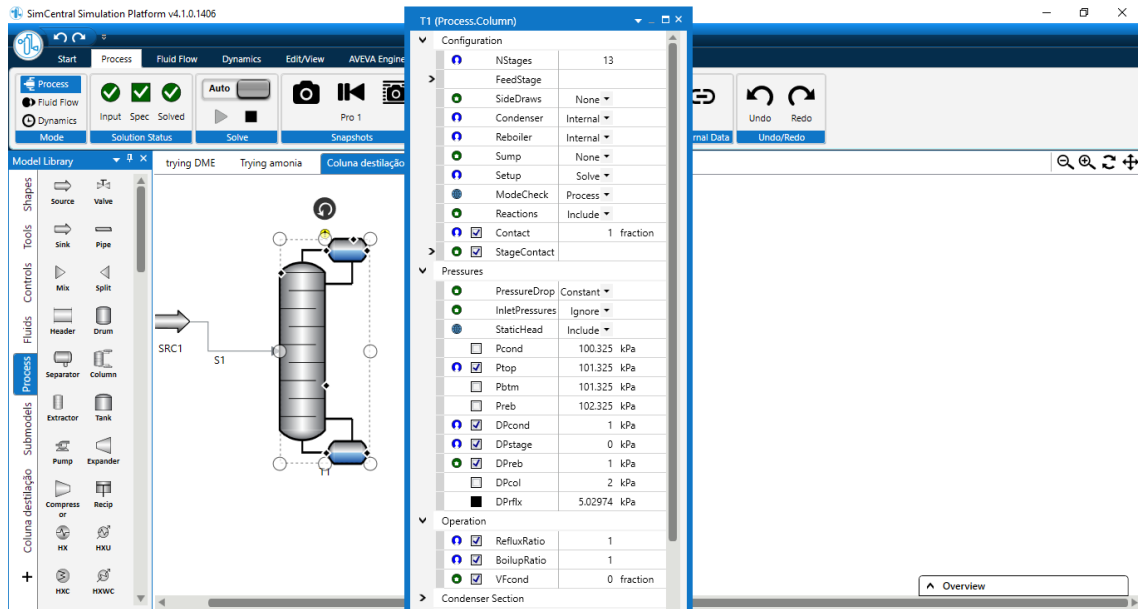


Fonte: elaboração própria

Com as configurações da alimentação bem definidas, foi conectada uma coluna de

destilação, que foi posteriormente configurada. A esta foram adicionados dois reservatórios: um para o produto de topo e outro para o produto de base.

Figura 16 – Configuração da coluna de destilação.



Fonte: elaboração própria

Inicialmente a razão de refluxo foi definida e como resultado obteve-se uma fração de 0.84 de metanol no produto de topo. Optou-se por especificar a fração de metanol no produto de topo, permitindo que a razão de refluxo fosse calculada para que a fração desejada fosse obtida.

Problema 5 – Transporte bidimensional - Análise de perfil de velocidade em microcanal.

Para fluidos incompressíveis e Newtonianos temos a Equação de Navier-Stokes que descreve o escoamento:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot u) + f \quad (1)$$

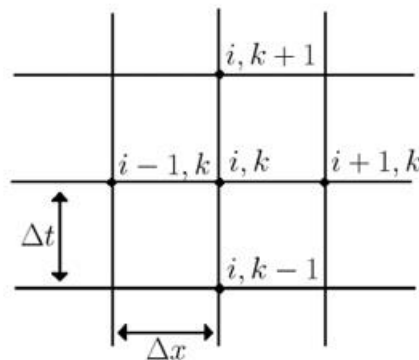
Assumindo que esses fluidos sejam incompressíveis ($\nabla \cdot u = 0$), algumas simplificações podem ser realizadas. Considerando um perfil plenamente desenvolvido não há variação de velocidade ao longo do eixo de escoamento. Além disso, $\rho = cte$. Assim, a equação de Navier-Stokes, para duas dimensões, em escoamento horizontal à baixo Re, é reduzida para:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \mu(\nabla^2 u)_z \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \mu \quad (3)$$

Podemos discretizar a área da secção transversal aplicando o método de diferenças finitas.

Figura 17 - Região discretizada. Malha computacional bidimensional.



Fonte: Adaptada de Vargas *et al* – Modelagem do fluxo de pedestres pela teoria macroscópica.

A equação obtida após a discretização permite o cálculo das velocidades ao longo da secção transversal, considerando $\Delta t = \Delta x = \Delta a$, tem-se que:

$$-\frac{\Delta P}{\mu L} = \frac{u_{i,k+2} - 4u_{i,k} + u_{i,k-2} + u_{i+2,k} + u_{i-2,k}}{4(\Delta a)^2} \quad (4)$$

Assim, a partir da equação anterior encontramos uma constante para todas as velocidades nas secções transversais:

$$k = -\frac{4(\Delta a)^2 \Delta P}{\mu L} \quad (5)$$

A equação (6) é um sistema de equações que na forma matricial é representada por:

$$UB = k \quad (6)$$

Supondo que seja aplicada uma discretização de n linhas e m colunas, temos que U é uma matriz coluna com $n \times m$ linhas, B é uma matriz com dimensão $n \times m$, obtida pelos coeficientes da equação (6).

Assim, a solução do sistema é dada por:

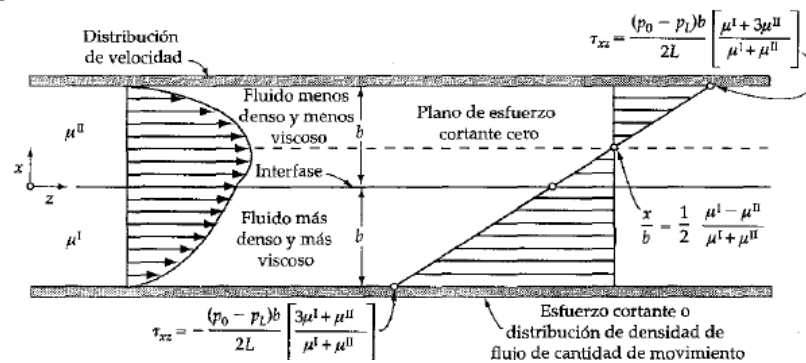
$$U = Dk' \quad (7)$$

Onde $D=B^{-1}$, é a matriz inversa dos coeficientes encontrados a partir da discretização e k' é a matriz transposta da constante para cada fluido (diferentes viscosidades).

Obtendo, dessa forma, a velocidade (U) em cada ponto da malha.

No entanto, como trata-se do escoamento de dois fluidos adjacentes imiscíveis, há considerações importantes a serem feitas em relação à interface entre eles: considerando uma interface plana e no meio do canal onde ocorre o escoamento, temos que a tensão de cisalhamento é igual para ambos, bem como as velocidades em cada ponto da secção transversal. Isso faz com que o processo de discretização seja diferente nesses pontos.

Figura 18 – Fluxo de fluidos imiscíveis.



Fonte: Bird, R.B., Stewart, W.E, e Lightfoot, E.N, (2004), Fenômenos de Transporte, 2a edição, Editora LTC. Página 64.

Para cada ponto da interface temos que:

$$\mu_1 u_1 = \mu_2 u_2$$

(8)

Logo:

$$u_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2} u_1 \quad (9)$$

Assim, para os pontos da interface temos que:

$$k = u_{i,k-1} + u_{i,k+1} + u_{i-1,k} + \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right) u_{i+1,k} - u_{i,k} \left(3 + \frac{\mu_1}{\mu_2}\right) \quad (10)$$

Os valores calculados para k na interface são inseridos na matriz k' da equação (4). Assim é possível obter o perfil de velocidade de ambos os fluidos ao longo do escoamento. Uma vez conhecidas as características do sistema e as equações que o descrevem, o software MATLAB® foi o ambiente computacional utilizado. Patiu-se inicialmente da geração das matrizes a partir das equações (6) e (10) de forma manual, para várias possíveis dimensões do problema, variando a quantidade de linhas e colunas na discretização. Após observação, foi possível, a partir dessas matrizes gerar um algoritmo que fosse capaz de descrever o comportamento do sistema para qualquer discretização.

```
%% _____TRABALHO FINAL DE CURSO _____ %
% _____BELIZA PATRÍCIA _____ %
%% Problema X: Processo de Transporte Bidimensional
clc; clear all;
%Inserindo os parâmetros da tubulação e propriedades dos fluidos envolvidos.
m1 = input('Viscosidade do fluido 1 em Pa.s = ');
m2 = input('Viscosidade do fluido 2 em Pa.s = ');
L = input('Comprimento do canal em m = ');
W = input('Medida do lado da seção transversal em m = ');
dP = input('Perda de carga em Pa = ');
d1 = input('Massa específica do fluido 1 = ');
d2 = input('Massa específica do fluido 2 = ');
nc = input('numero de colunas = ');
nl = input('numero de linhas = ');

%Inserindo as equações que descrevem o movimento.
mr = m1/m2;
mx = nc*nl;
my = mx;
n1 = fix(nc/2+1);

dA = W/(nc+1);

k1 = (-4*(dA^2)*dP)/m1*L;
k2 = (-4*(dA^2)*dP)/m2*L;
```

%Inserindo as relações matemáticas que retratam a discretização.

```

for i = 1:1:mx
    for j = 1:1:mx
        if j == i && i <= ((n1-1)*nc)
            B (i,j) = -4;
        else if j == i && i >= ((n1-1)*nc)+1 && i <= ((n1-1)*nc)+nc
            B (i,j) = -3-mr;
        else if j == i && i >= ((n1-1)*nc)+(nc+1) && i <= my
            B (i,j) = -4;
        end
    end
end
end
for i = 1:1:mx
    for j = 1:1:my
        if j == i && i >= ((n1-1)*nc)+1 && i <= ((n1-1)*nc)+nc
            B (i,j+nc) = mr;
        end
    end
end

D = inv (B);

for i = 1:1:mx
    if i <= ((n1-1)*nc)+nc
        k(i) = k1;
    else
        k(i) = k2;
    end
end

U = D*k';

```

3.2. Método de Pesquisa

O método de coleta de dados escolhido foi a pesquisa *survey*, um tipo de pesquisa quantitativa que tem por objetivo colaborar com a compreensão de determinado campo, através das informações recolhidas por intermédio de questionários ou entrevistas com os indivíduos envolvidos em tal campo (FORZA, 2002). A principal motivação da escolha dá-se pela possibilidade de utilização dos dados coletados para classificação do grau de relevância de aspectos pertinentes.

Além disso, pode-se destacar como benefícios desse método: atingir grande população de pesquisa, centrar os dados nas percepções dos indivíduos de interesse e não na instituição de ensino da qual estão vinculados, permitir extensa amplitude geográfica, envolvendo diversas unidades federais do país. A ferramenta para realização do *survey* foi o questionário, sendo este mais conveniente que a entrevista uma vez que não demanda deslocamento do pesquisador e pode ser realizado por diversos respondentes ao mesmo tempo (PEREIRA, 2007).

Uma das estratégias usadas no questionário foi a Escala Likert, desenvolvida por Rensis Likert em 1932, e amplamente empregado em pesquisas de opinião por permitir responder não-binárias, indicando o nível de intensidade de concordância do pesquisado em relação a uma declaração apresentada (COSTA, 2011)

A tabela abaixo apresenta o Esquema de Pesquisa, onde constam os seus objetivos específicos, atrelados a perguntas do questionário e ao método de análise que será usada para respondê-las.

Tabela 2 – Esquema da pesquisa

Objetivos Específicos	Perguntas do Questionário	Técnica de Coleta de Dados	Técnicas de Análise
<u>Avaliar</u> o uso de <i>softwares</i> em disciplinas específicas do curso de engenharia química em diferentes universidades.	(Em escala de Linkert) As disciplinas específicas do curso deveriam ser ministradas utilizando recursos computacionais na solução de problemas.	Revisão Bibliográfica Questionário	Análise Documental Estatística Descritiva

<u>Verificar</u> a disponibilidade dos <i>softwares</i> computacionais para estudantes de engenharia química.	Quais softwares você utilizou/utiliza durante a graduação? Você teve fácil acesso aos <i>softwares</i> ?	Questionário	Estatística Descritiva
<u>Analisar</u> a percepção dos alunos quanto à relevância do uso dos <i>softwares</i> .	(Em escala de Linkert) As disciplinas com recursos computacionais deveriam ser ministradas desde o início do curso.	Questionário	Estatística Descritiva
<u>Comparar</u> a percepção dos estudantes quando às suas habilidades e conhecimentos em relação ao uso dos <i>softwares</i> .	(Em escala de Linkert) <i>Softwares</i> são difíceis de utilizar. Sinto-me apto para fazer simulações e modelagem de processos.	Questionário	Estatística Descritiva
<u>Comparar</u> a percepção dos estudantes quanto à necessidade das ferramentas computacionais em relação ao mercado de trabalho.	(Em escala de Linkert) <i>Softwares</i> Computacionais são ferramentas indispensáveis ao Engenheiro Químico mediante ao avanço tecnológico.	Revisão Bibliográfica Questionário	Análise Documental Estatística Descritiva
<u>Analisar</u> a influência de um conjunto de fatores sobre as percepções dos universitários sobre <i>softwares</i> .	Qual a instituição de ensino você está matriculado?	Revisão Bibliográfica Questionário	Análise Documental Estatística Descritiva

Fonte: elaboração própria

Quanto ao método de escolhido, o *survey*, para Forza (2002) pode ser de três tipos: exploratória, descritiva ou explanatória. Sendo a primeira a mais adequada para o tipo de análise em questão uma vez que o objeto de pesquisa deste estudo é pouco explorado, muito se fala sobre o uso dos *softwares* por estudantes de engenharia química e pelo profissional em atuação, mas pouco se conhece sobre as percepções dos estudantes sobre o tema.

Foi também definido um *ranking* entre as instituições participantes da pesquisa: 23 universidades federais e 2 institutos federais. Os critérios adotados foram dois Indicadores da Qualidade de Ensino Superior, ambos sob responsabilidade do Ministério da Educação (MEC): Conceito Preliminar do Curso (CPC)¹³ e Exame Nacional de Desempenhos dos Estudantes (ENADE)¹⁴. Que são realizados anualmente (alternando entre os cursos superiores avaliados).

É importante salientar que nenhum dos índices avalia diretamente o uso dos softwares em sala de aula, o acesso dos estudantes aos sistemas computacionais ou alguma verificação, avaliação nessa área. De modo que avaliar as respostas dos alunos agrupados em ranking permite considerar uma relação entre o desempenho da instituição e as percepções dos alunos.

A pontuação utilizada para referência no ranking foi uma média entre as duas avaliações. As instituições foram então distribuídas em 3 grupos (A, B, C). De acordo com os seguintes parâmetros:

- Grupo A – Instituições com média maior que 4,0;
- Grupo B – Instituições com média entre 3,5 e 4,0;
- Grupo C – Instituições com média máxima de 3,5.

Parcela significativa das análises estatísticas foi realizada baseada nos grupos do ranking, com intuito de investigar como as percepções relacionadas aos *softwares* com as avaliações de qualidade dos cursos.

Tabela 3 –Distribuição das instituições em grupos

Universidades	n° de Respondentes	n° de Universidades
---------------	--------------------	---------------------

¹³ Segundo o MEC: O CPC é um indicador de qualidade que avalia os cursos de graduação. Seu cálculo e sua divulgação ocorrem no ano seguinte ao da realização do Enade, com base na avaliação de desempenho de estudantes, no valor agregado pelo processo formativo e em insumos referentes às condições de oferta – corpo docente, infraestrutura e recursos didático-pedagógicos.

¹⁴ Segundo o MEC: O Conceito Enade é um indicador de qualidade que avalia os cursos por intermédio dos desempenhos dos estudantes no Enade. Seu cálculo e sua divulgação ocorrem anualmente para os cursos com pelo menos dois estudantes concluintes participantes do exame.

A	28	4
B	126	11
C	179	10

Fonte: elaboração própria

O questionário foi desenvolvido com perguntas de múltipla escolha e declarações em que o respondente deveria ponderar seu nível de concordância com a afirmação, dispondo das opções: discordo totalmente, discordo, não concordo nem discordo, concordo e concordo totalmente.

3.2.1. Coleta de Dados

A baixa de retorno dos questionários é uma das mais notáveis dificuldades em pesquisas desse tipo. Se a taxa de retorno dos respondentes é muito baixa as conclusões realizadas a partir da pesquisa não podem ser universalizadas para toda a população em análise, uma vez que a amostra pode não ser representativa do conjunto (MALHOTA, 1998). As seguintes ações foram realizadas no período de coleta de dados com o objetivo de aumentar a taxa de retorno:

Elaboração da pesquisa utilizando o QuestionPro¹⁵, um *software* para coleta de dados que pode ser facilmente acessado em computadores, *tablets* ou celulares. A pesquisa não era extensa e a maior parte das questões podiam ser respondidas apenas assinalando uma das opções disponível. O link de acesso à pesquisa foi compartilhado com representantes dos Centros Acadêmicos e Empresas Juniores de Engenharia Química, além de professores.

O *software* da pesquisa produz um código de identificação para cada resposta, vinculado o *Internet Protocol* (IP) do meio eletrônico utilizado, além da localização geográfica, garantindo que uma mesma pessoa não responda duas vezes a pesquisa. Os dados coletados do *Software* foram adicionados a uma planilha do Microsoft Excel, onde foram realizadas as análises estatísticas.

3.2.2. Margem de erro

Uma vez que qualquer amostra aleatória é diferente e nenhuma pode ser exatamente igual à população estudada, as estimativas possuem algum grau de erro (ORNSTEIN, 2013). De forma simplificada a margem de erro é um termo adicionado ou subtraído do estimador, gerando assim um limite superior e um limite inferior, respectivamente) para formar um intervalo de confiança (SOUZA, 2014), de modo que

¹⁵ Disponível em <https://www.questionpro.com/pt-br/Pesquisa.html>

a inferência feita sobre a população quanto a análise de certa variável, esteja dentro desse intervalo.

A magnitude do erro está relacionada com o tamanho da amostra. De acordo com SOUZA, 2014 o erro amostral pode ser calculado pela relação:

$$erro = z \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Onde, σ é o desvio padrão da população estudada, n é o tamanho da amostra e z é um valor tabelado do escore- z ¹⁶. Desse modo, assumindo a distribuição normal para descrever o comportamento da variável e considerando que o desvio padrão da população não é deve-se assumir o valor de 50%, para o nível de confiança de 95% tem-se uma margem de erro de 5% para os resultados apresentados.

¹⁶ O escore z é tabelado e seus valores são dados de acordo com o nível de confiança desejado para uma pesquisa, representando a porcentagem de intervalos que iriam incluir tal parâmetro fossem reunidas amostras da mesma população repetidamente. Um nível de confiança de 95%, por exemplo, indica que 95% das possíveis amostras de uma certa população produzem intervalos de confiança dentro do parâmetro apresentado.

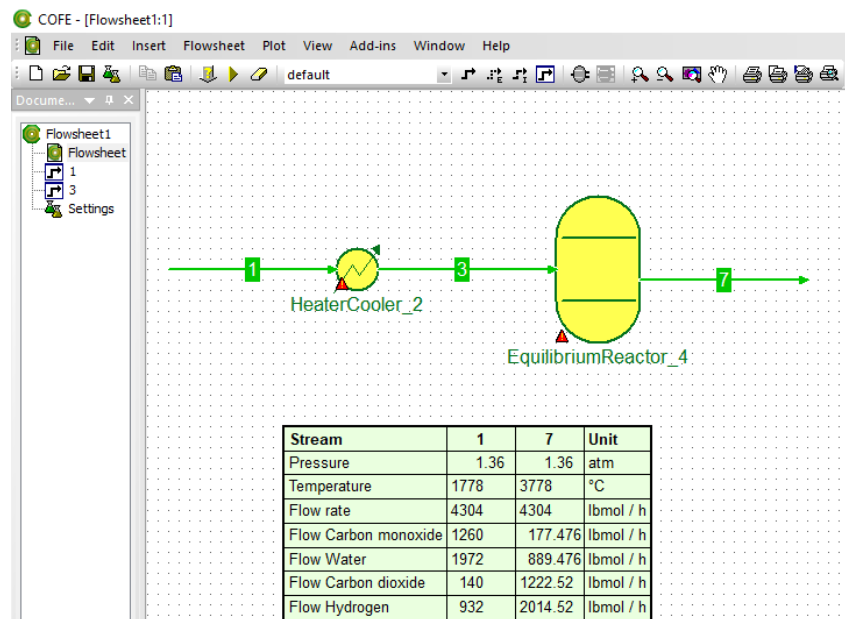
4. RESULTADOS

4.1. Resultados Referentes aos Estudos de Caso Propostos

Os resultados e análises dos Estudos de Caso Escolhidos encontram-se listados a seguir:

i) Problema 1

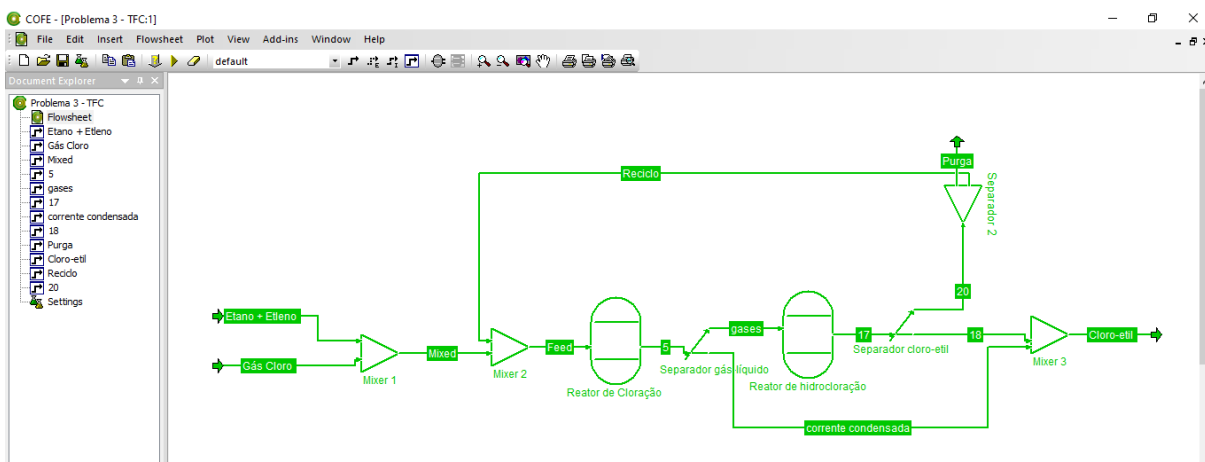
Figura 19 – PFD completo do processo e composição das correntes de entrada e saída.



Fonte: elaboração própria

ii) Problema 2

Figura 20 – PDF final do processo de produção de cloro-etil.



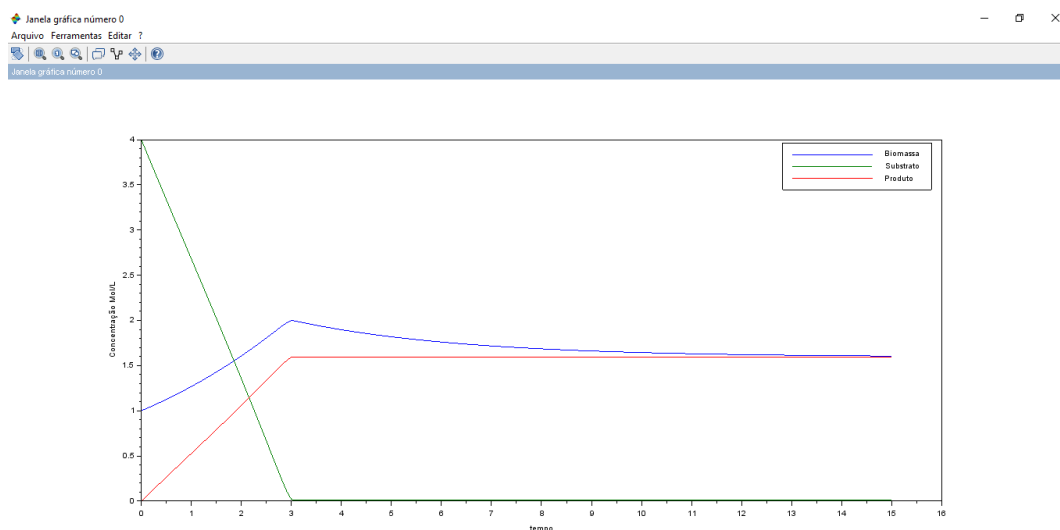
Fonte: elaboração própria

Tabela 4 – Composição das correntes do processo de produção de cloreto de etila

Corrente	Alimentação	Gases	Corrente condensada	Reciclo	Purga	Cloreto de etila	Uni.
Pressão	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	atm
T	26,9339	26,85	26,85	26,85	26,85	26,8496	°C
Vazão molar	42879,1	42679,1	200	41879,8	423,028	388,119	mol/s
Fluxo de ácido clorídrico	186,238	376,238	0	186,238	1,88119	0	mol/s
Fluxo de Etileno	1374,46	1374,46	0	1174,47	11,8634	0	mol/s
Fluxo de Cloro-etileno	0	0	190	0	0	378,119	mol/s
Fluxo de etano	200	0	10	0	0	10	mol/s
Fluxo de gás cloro	41118,4	40928,4	0	40519,1	409,284	0	mol/s

Fonte: elaboração própria

iii) Reatores Químicos

Figura 21 – Comportamento das variáveis ao longo da reação

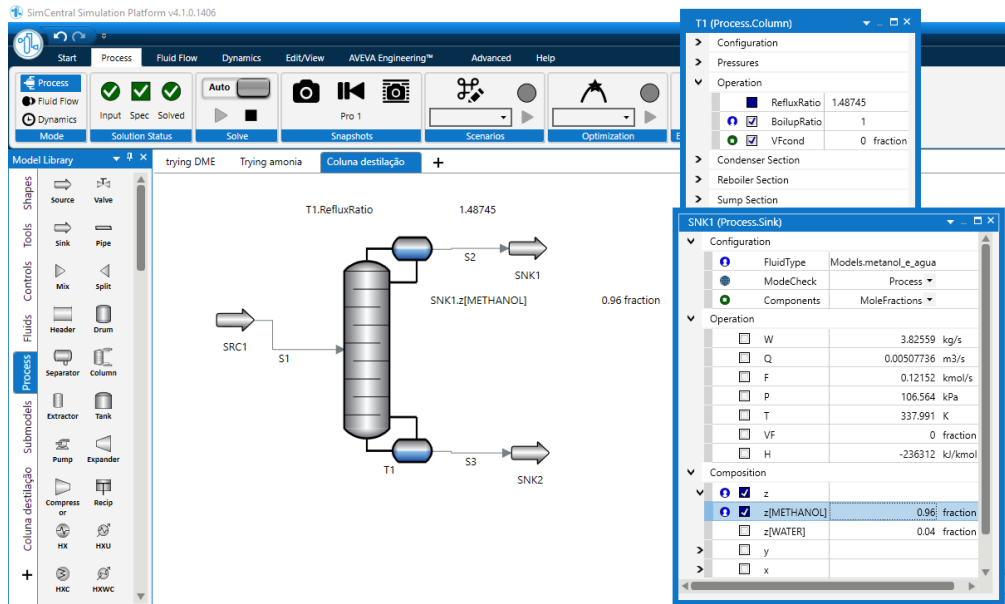
Fonte: elaboração própria

O gráfico permite observar o momento em que o substrato é totalmente consumido gerando o fim da formação de produto e diminuição do crescimento da biomassa.

v) Coluna de Destilação

A partir da simulação foi possível obter a razão de refluxo necessária para obter uma fração de 0.96 de metanol no produto de topo.

Figura 22 – PDF final do processo de destilação da mistura metanol-água

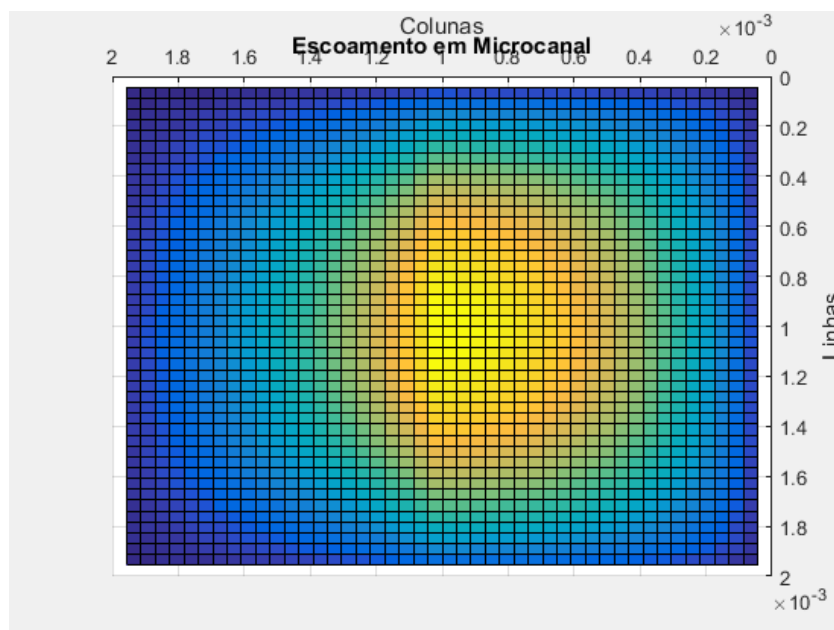


Fonte: elaboração própria

vi) Análise de Perfil de Velocidade em Microcanal

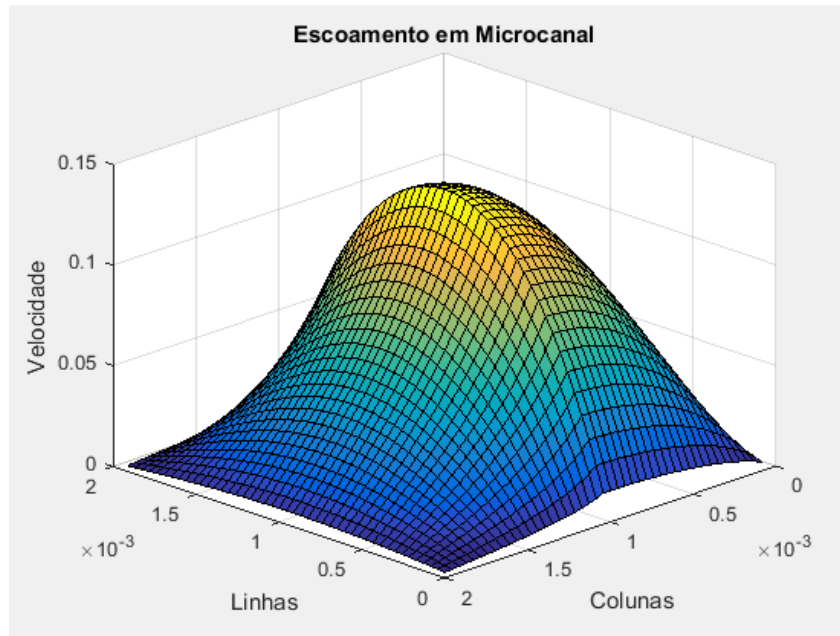
Para escoamento heterogêneo foram obtidos os padrões:

Figura 23 – Adaptado de MATLAB®. Gráfico da velocidade na secção transversal, em escoamento bidimensional



Fonte: Elaboração própria

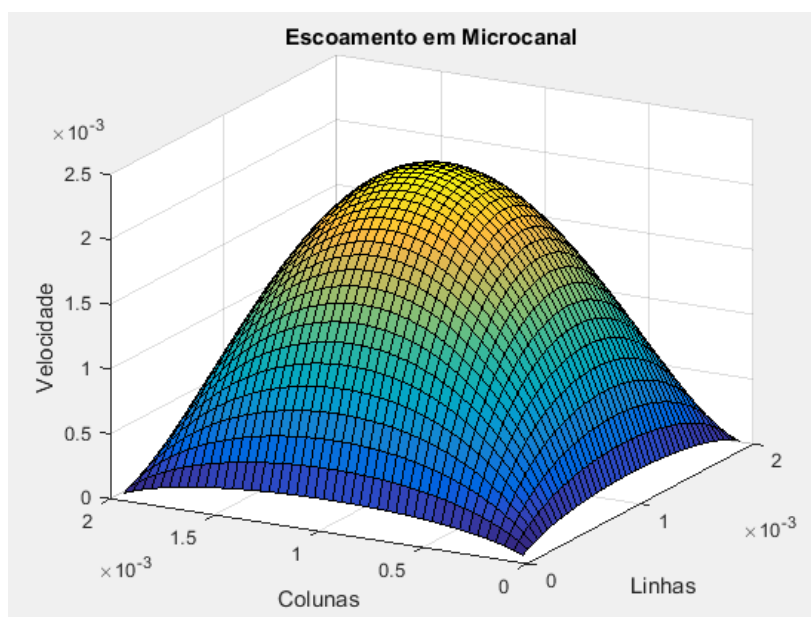
Figura 24 – Adaptado de MATLAB®. Gráfico do perfil de velocidade na secção transversal, em escoamento bidimensional.



Fonte: Elaboração própria

A descrição do perfil de velocidade é importante para analisar as transferências de calor e massa que podem ocorrer entre as fases. Os resultados precisam ser analisados para utilização adequadas. No segundo gráfico é possível claramente observar a diferença entre o comportamento do líquido e do gás. Deve-se atentar ao fato de que centenas de cálculos foram realizados para que fosse possível observar tal comportamento. Realizar tais cálculos manualmente seria impraticável. Além disso, o algoritmo permite analisar os comportamentos de diversos fluidos, apenas inserindo suas especificações, incluindo o comportamento de um único fluido conforme podemos ver no gráfico a seguir:

Figura 25 – Adaptado de MATLAB®. Gráfico do perfil de velocidade homogêneo.



Fonte: Elaboração própria

4.2. Resultados da Pesquisa Survey

A pesquisa teve no total 350 respondentes. No entanto, mesmo tratando-se de um questionário curto houve retornos incompletos, estes foram desprezados devido aos dados ausentes. A amostra total analisada possui 333

4.2.1. Distribuição dos Respondentes

Com o intuito de se compreender as características da amostra a distribuição dos respondentes por universidade e por ranking é apresentada nas tabelas na seguir.

A tabela 5 apresenta o número de discentes que integrou a população pesquisada, além das suas notas nos indicadores de qualidade do MEC, que definiram seus grupos.

Tabela 5 –Distribuição da população de discentes e critérios de ranking por instituição.

Universidade	ENADE 2019	CPC 2017	Média	Respondentes	Grupo Ranking
Norte					
Universidade Federal do Amazonas	3	3	3	3	C
Universidade Federal do Pará	3	3	3	1	C

Nordeste					
Universidade Federal da Paraíba	3	4	3,5	75	C
Universidade Federal do Ceará	4	4	4	3	B
Universidade Federal de Campina Grande	3	4	3,5	18	C
Universidade Federal do Maranhão	3	4	3,5	23	C
Universidade Federal Rural do Semi Árido	3	5	4	1	B
Universidade Federal de Alagoas	3	3	3	7	C
Universidade Federal da Bahia	4	4	4	1	B
Universidade Federal de Sergipe	4	4,5	4,25	2	A
Instituto Federal Bahia	5	5	5	4	A
Centro-Oeste					
Universidade de Brasília	4	4	4	9	B
Universidade Federal de Goiás	4	3	3,5	12	C
Sudeste					
Universidade Federal Fluminense	2	4	3	15	C
Universidade Federal do Triângulo Mineiro	4	4	4	4	B
Universidade Federal Espírito Santo	3	3	3	2	C
Universidade Federal de Minas Gerais	5	4	4,5	17	A
Universidade Federal de São Carlos	4	4	4	25	B
Sul					
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	5	4	4,5	5	A
Universidade Federal do Paraná	4	4	4	9	B
Universidade Federal de Santa Catarina	4	4	4	3	B
Universidade Federal de Santa Maria	3	4	3,5	23	C
Universidade Tecnológica Federal do Paraná	4	4	4	48	B
Universidade Federal da Integração Latino-Americana	4	4	4	6	B
Instituto Federal Pelotas	4	4	4	17	B

Fonte: elaboração própria

As respostas dos discentes foram transformadas em gráficos para melhor visualização da percepção do grupo. Os títulos das figuras referem-se às perguntas que foram enviadas através da pesquisa.

4.2.2. Apresentação dos dados

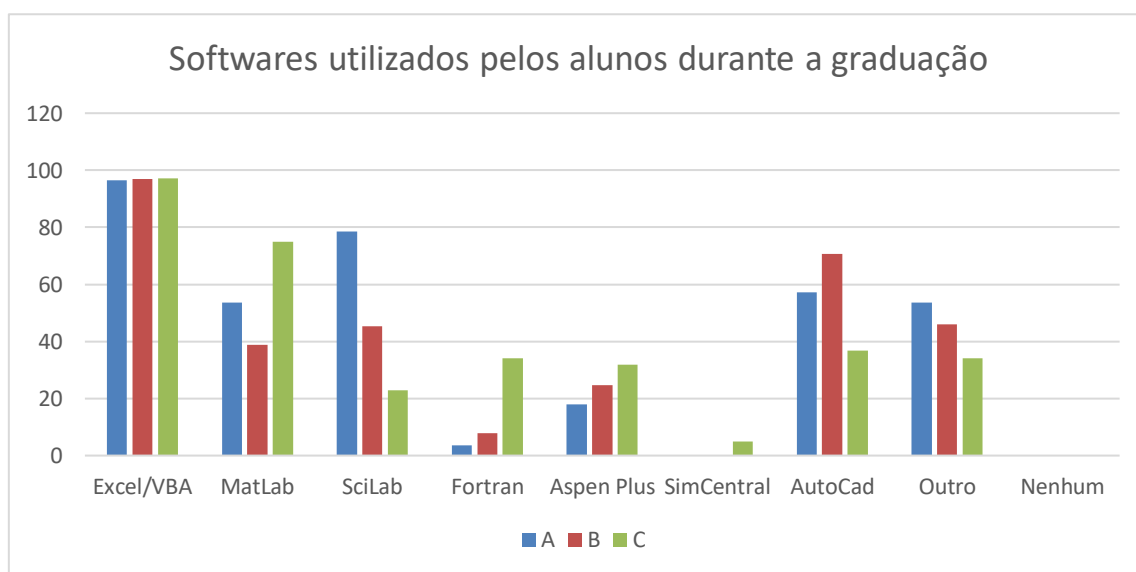
i) Softwares Utilizados

Os dados de quais *softwares* são utilizados pelos alunos são apresentados na tabela abaixo. Observa-se o pequeno uso de sistemas operacionais que realizam

simulações, que são de grande contribuição ao engenheiro, por permitir a visualização ampla de processos, bem como as operações envolvidas. Aproximadamente todos os alunos relataram a utilização do Microsoft Excel: um programa de tratamento de dados e construção de planilhas este, é enriquecido pelo recurso *Visual Basic for Applications* (VBA) que permite a automação de tarefas.

Os sistemas operacionais SciLab e MatLab são muito semelhantes, são softwares interativos voltados para o cálculo numérico que permitem a resolução de sistemas de equações complexos. E embora o MatLab ser mais difundido entre a comunidade acadêmica o SciLab tem ganhado espaço por ser gratuito. Já o AutoCad, é amplamente usado para desenho técnico em duas dimensões e criação de modelos tridimensionais. Na opção “Outros” encontram-se softwares como Enzo e PRO II, entre outros softwares computacionais comerciais e acadêmicos. Por vezes desenvolvidos por universidades, como é o caso do PETROX.

Figura 26 – Softwares utilizados pelos discentes durante a graduação



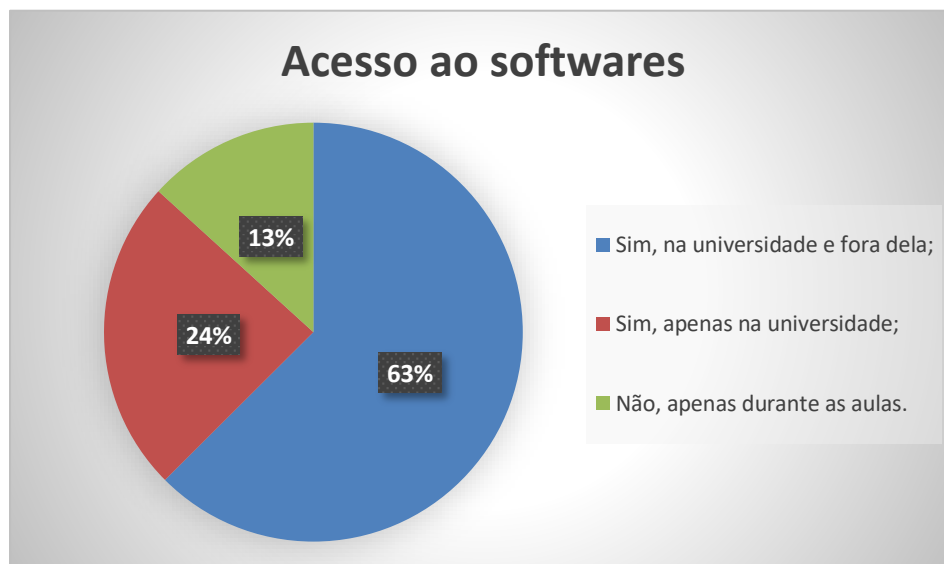
Fonte: elaboração própria

ii) Acesso dos discentes aos *softwares*

Ainda que a maior parte dos entrevistados tenha amplo acesso aos sistemas operacionais, uma parcela significativa não dispõe deles fora do ambiente universitário, dificultando assim realizar exercícios de aprendizagem no período de estudos complementar à aula. Dentre os fatores que influenciam essa realidade, temos o custo de um computador somado ao custo das licenças dos softwares que inviabilizam esse acesso, uma vez que segundo a Associação Nacional dos

Dirigentes das Instituições Federais de Ensino Superior (ANDIFES) a maior parte dos estudantes de Universidades Federais tem baixa renda¹⁷.

Figura 27 – Acesso dos estudantes aos softwares



Fonte: elaboração própria

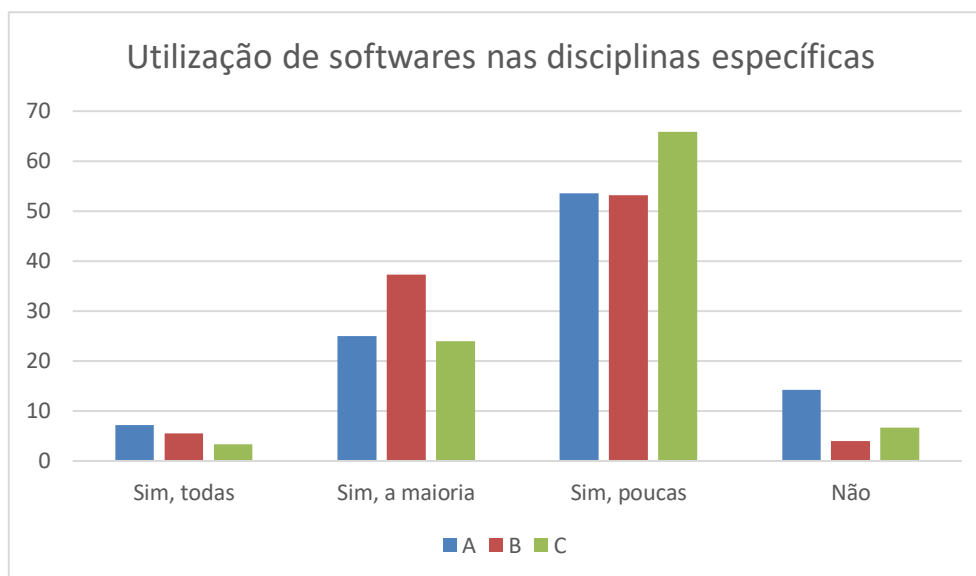
A criação de laboratórios de informática¹⁸ de livre acesso aos estudantes em diversas universidades tem sido uma ferramenta importante, oferecendo a possibilidade das atividades extraclasse disponibilizando não somente os computadores (*hardware*), como também os sistemas operacionais (*software*).

¹⁷ 5ª Pesquisa de Perfil Socioeconômico dos Estudantes das Universidades Federais – ANDIFES 2018. Em 1996, quando foi realizada a primeira edição da pesquisa, eles eram 44,3% do corpo discente, número relativamente próximo aos dos percentuais encontrados nos levantamentos realizados em 2003 e 2010. Porém, percebe-se que, a partir de 2014, ocorre salto e os estudantes nessa faixa de renda passam a ser 66,2% do total de estudantes da graduação, chegando a 70,2% em 2018.

¹⁸ Centro de informática UFPB. **Laboratórios**. Disponível em: <http://ci.ufpb.br/laboratorios/laboratorios/>. Acesso em 19 de nov. 2020

iii) Utilização dos *softwares* nas disciplinas específicas do curso

Figura 28 – Utilização de softwares nas disciplinas específicas de Engenharia Química



Fonte: elaboração própria

É notável o uso reduzido dos sistemas operacionais nas disciplinas profissionalizantes. Este não é um problema recente, segundo JONES (1998) é comum que os docentes não estejam familiarizados com tais ferramentas, sendo assim não compreendem como a utilização eficiente dos *softwares* é relevante na formação dos estudantes, e assim permanecem alheios à indispensabilidade de ensinar aplicando novas abordagens de resolução de problemas, aquelas que efetivamente serão utilizadas nos projetos que serão desenvolvidos pelo futuro engenheiro.

As licenças são outro empecilho, não é suficiente apenas dispor de um computador (*hardware*) que já configura um investimento significativo. Softwares são propriedade intelectual e, portanto, resguardada por direitos autorais, sendo sua distribuição e uso limitados. Softwares livres embora sejam ferramentas úteis, de modo geral não possuem uma base de dados tão ampla quanto os pagos.

iv) Substituição de Carga Horária Experimental por Computacional

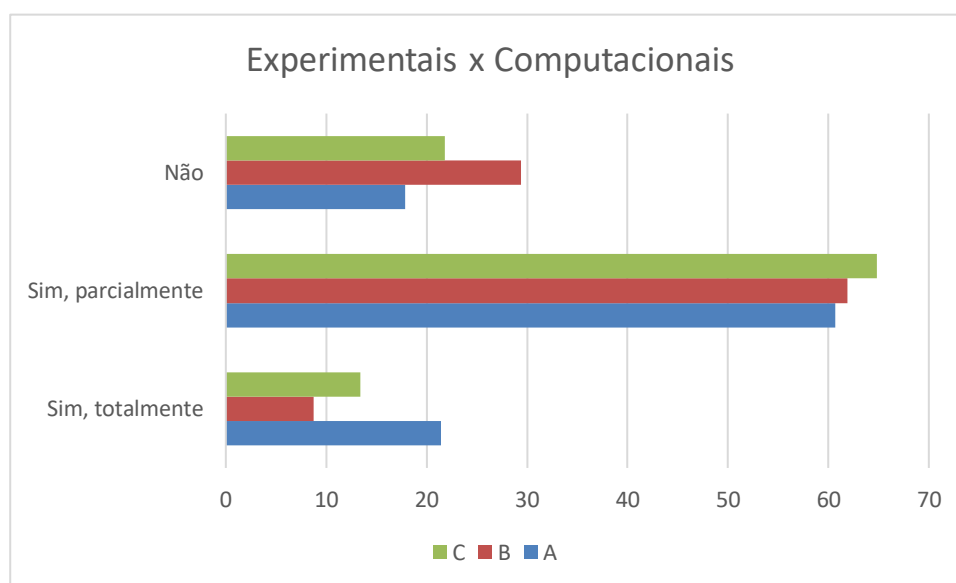
As disciplinas experimentais permitem aos alunos melhor compreensão dos conteúdos teóricos, através da possibilidade de manejar tecnologias básicas, e a partir de experimentos orientados desenvolver familiaridade com circunstâncias semelhantes às que irão deparar-se no campo profissional (PEKELMAN, MELLO –

2004). De acordo com BANKS (1998) a simulação é uma imitação dos processos, e é usada para descrever e investigar o comportamento de um sistema e em particular como reage a perturbações.

Ora, um laboratório de experimentos proporciona aos alunos uma prática semelhante. Desse modo, as aulas experimentais em laboratórios podem ser complementadas e em parte substituídas, por aulas onde ocorra a simulação computacional. Nota-se que os alunos compartilham dessa percepção, embora ainda seja importante as aulas presenciais em laboratórios para habituar-se ao uso de equipamentos.

A Caterpillar (CAT), empresa multinacional fabricante de máquinas, é um exemplo de organização que expõe seus novos colaboradores ao treinamento de simulação antes do campo de trabalho. Alegando que trabalhar no ambiente seguro permite que os novos operadores treinem sem ansiedade e que cheguem ao campo familiarizados com os processos¹⁹. As metodologias que ocorrem na indústria devem impulsionar as que são empregadas na universidade.

Figura 29- Substituição de Carga Horária Experimental por Computacional



Fonte: elaboração própria

No momento da realização da pesquisa e redação desse trabalho a pandemia do COVID-19²⁰, fazendo com que muitos alunos tenham atrasos significativos nas

¹⁹ <https://catsimulators.com/pt/how-aecon-mining-trains-operators-with-cat-simulators/>

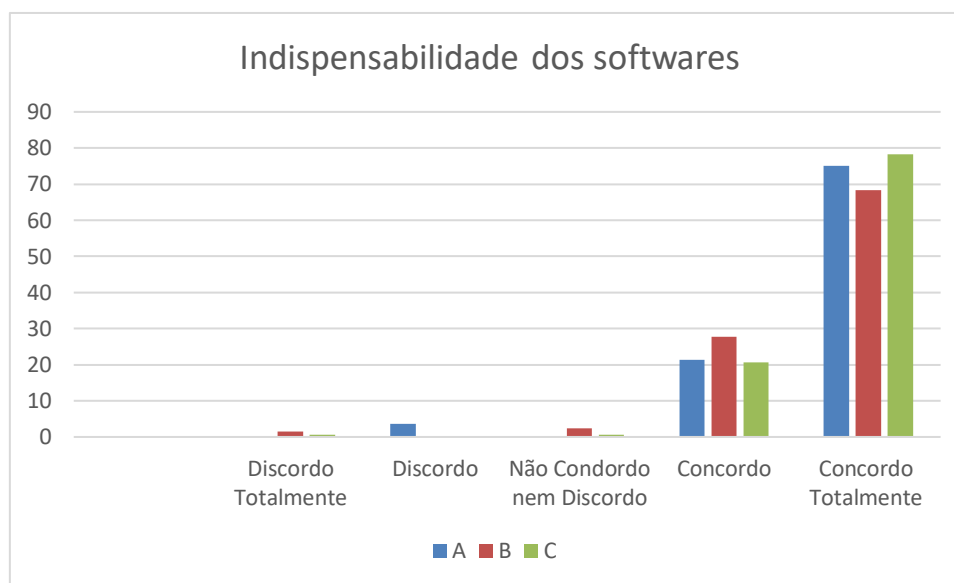
²⁰ Também conhecida como pandemia do coronavírus, até o dia 24 de novembro de 2020 havia 59 124 016 casos confirmados da doença em 191 países. Devido ao alto nível de contágio, como medida de contenção da doença as aulas presenciais em instituições federais foram suspensas. As aulas teóricas continuaram na modalidade on-line e diversas medidas foram tomadas para assistir os

disciplinas experimentais. A possibilidade de realizar as disciplinas experimentais de modo remoto através da simulação e modelagem mostra-se como uma alternativa que favoreceria o prosseguimento da graduação.

v) Indispensabilidade dos *softwares*

Os estudantes reconhecem a importância do conhecimento de sistemas computacionais. A indústria 4.0 é caracterizada pelo intenso uso de ferramentas computacionais. E o ambiente onde os futuros-engenheiros devem receber treinamento para estar apto a se inserir nessa indústria é a universidade. De modo que tal realidade é conflituosa com a resposta obtida no gráfico x (Utilização de softwares nas disciplinas específicas de Engenharia Química) onde observamos que as disciplinas específicas do curso não utilizam tais recursos.

Figura 30 - Softwares Computacionais são ferramentas indispensáveis ao Engenheiro Químico mediante ao avanço tecnológico.



Fonte: elaboração própria

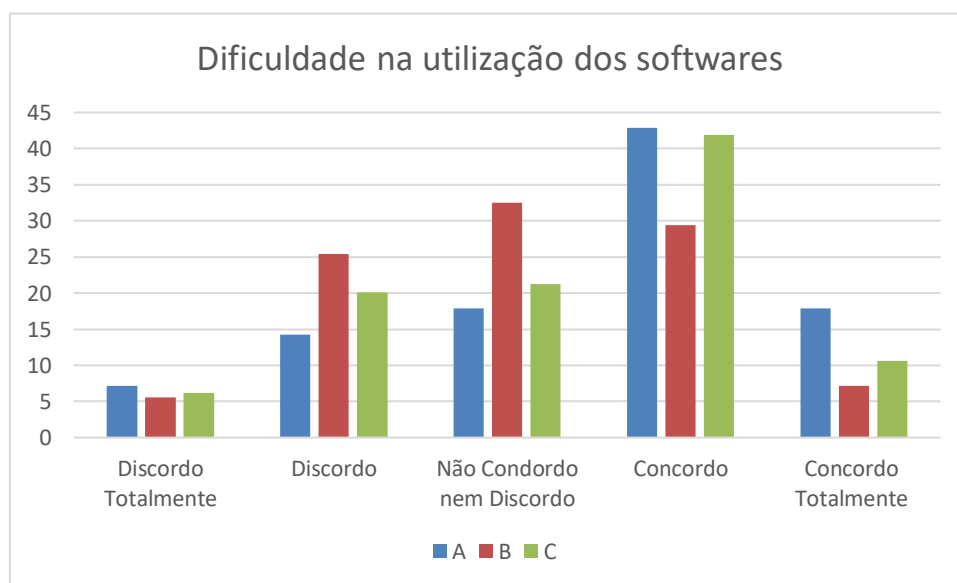
Devido às características altamente não lineares dos problemas típicos da engenharia química, essas disciplinas devem ofertar os fundamentos que serão necessários à resolução de problemas nas disciplinas específicas/profissionalizantes. O uso dos computadores não é somente o objetivo e sim um meio para melhorar a compreensão, desenvolver raciocínio sequenciado e voltado para resolução de

problemas, de formas mais eficazes e rápidas.

vi) Dificuldade na utilização dos *softwares*

O efeito da não utilização dos softwares nas disciplinas específicas gera dificuldade na utilização prática deles. Todas as instituições observadas possuem disciplinas de apresentação e introdução ao uso de sistemas computacionais, uma vez que estas são parte obrigatória dos currículos de engenharia química. A apresentação das ferramentas, sem oportunidades práticas de como aplicá-las não permite aos alunos que estes dominem o uso real destas ferramentas, como deverão ser aplicados no meio profissional.

Figura 31 - Tenho dificuldade na utilização de softwares para compreensão e visualização de projetos e plantas químicas



Fonte: elaboração própria

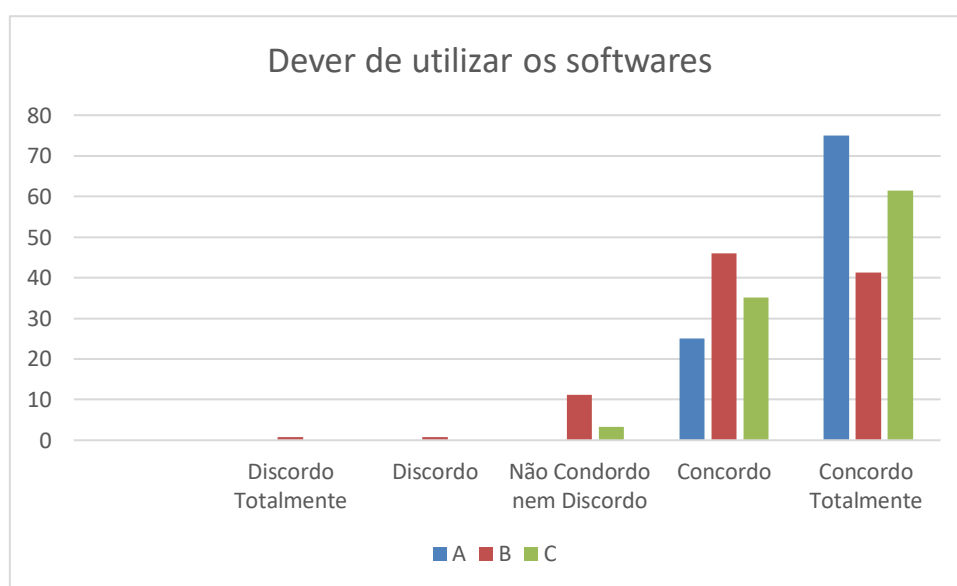
vii) Quanto ao dever da utilização de softwares nas disciplinas específicas

É notável a grande percepção dos alunos da necessidade da aplicação dos sistemas operacionais nas disciplinas profissionalizantes para maior contato com o tipo de problemas que encontrarão no mercado de trabalho. Nesse contexto o professor deve promover nas aulas expositivas, na resolução de problemas e elaboração de projetos. No entanto a figura do professor-engenheiro carrega duas problemáticas:

A primeira é a falta de experiência do docente como engenheiro. Este finaliza a pós-graduação e ingressa na carreira acadêmica, onde são valorizadas as áreas de ensino e pesquisa, de modo que é difícil transmitir aos discentes como a teoria vista em sala de aula está associada à prática na indústria. O segundo é o engenheiro que adentra na docência, não possui capacitação pedagógica, resultando também em dificuldades no desenvolvimento das disciplinas (MOLISANI, 2016).

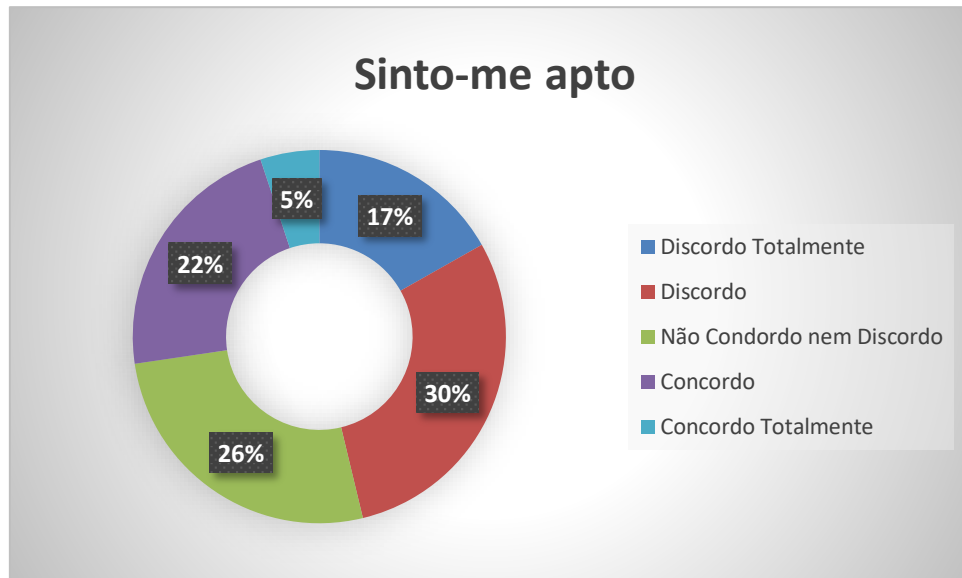
Desse modo o ambiente acadêmico acaba não promovendo o desenvolvimento das habilidades que serão requeridas dos futuros profissionais da engenharia química pelo mercado. O não-uso dos softwares nas disciplinas profissionalizantes resulta no cenário que observa-se a seguir.

Figura 32 - As disciplinas específicas do curso deveriam ter os conhecimentos teóricos associados à aplicação de softwares para solução de problemas.



Fonte: elaboração própria

viii) Habilidade em Sistemas Computacionais

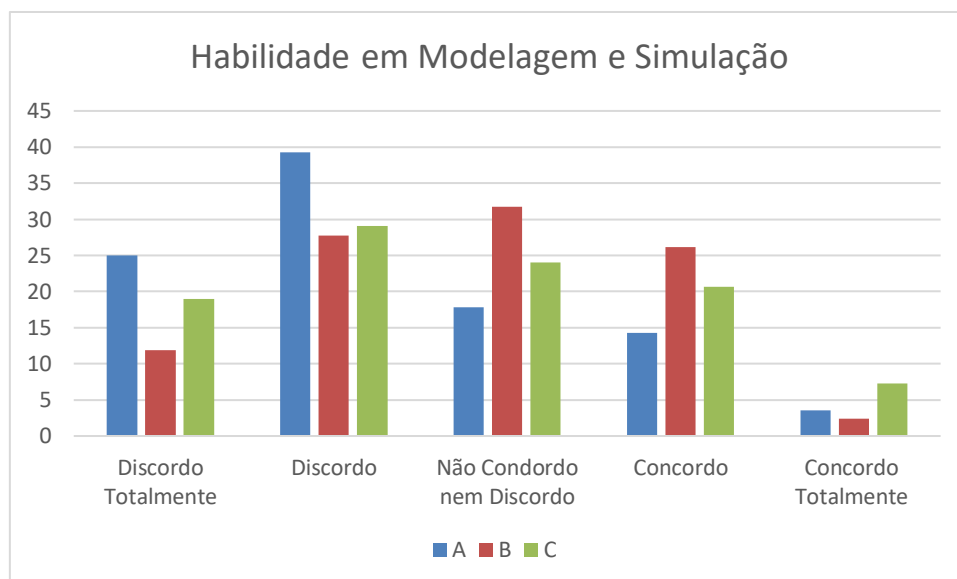
Figura 33 - Sinto-me apto para fazer simulações e modelagem de processos.

Fonte: elaboração própria

Devido à gama de oportunidades para a atuação de um engenheiro químico é impraticável que os estudantes tenham experiências aprofundadas em todas as áreas possíveis. No entanto todas elas envolvem o uso de *softwares*. E isso não se restringe somente aos engenheiros graduados, as empresas que oferecem estágio já buscam no estudante a habilidade de utilizar *softwares*.

A competências dos profissionais são incompatíveis com a realidade do mercado industrial. O método de ensino é focado nas práticas tradicionais através de aulas puramente expositivas, e poucas práticas laboratoriais, a avaliação é feita através de provas. Essa metodologia é ineficiente, desmotiva os discentes. A utilização dos *softwares* aplicando a metodologia de *learn-by-doing*, por exemplo, permite que os estudantes desenvolvam senso crítico e seus próprios roteiros de solução de problemas. O contato com a problemática que eles efetivamente enfrentarão na indústria é o que fará com que sintam-se aptos para tal.

Figura 34 - Sinto-me apto para fazer simulações e modelagem de processos, divisão por ranking

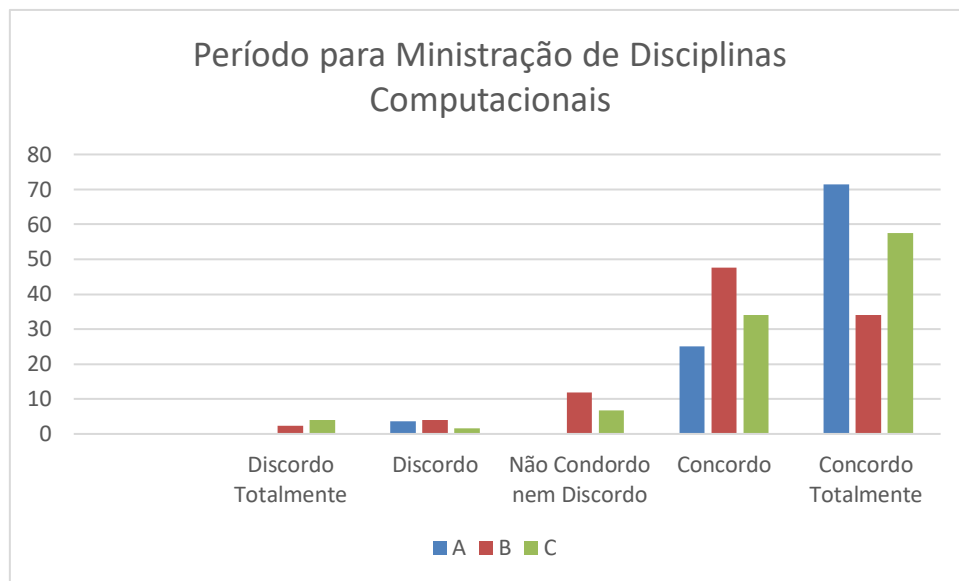


Fonte: elaboração própria

ix) Período Adequado para iniciar o contato com disciplinas computacionais

Segundo o MEC, a carga horária mínima necessária para a obtenção do título de bacharel em engenharia química é de 3600 horas. Desse modo os cursos costumam ter duração de 5 anos (10 semestres). Dentre os cursos em que houve respondentes, havia cursos que iniciavam a introdução aos sistemas computacionais entre o primeiro e o quarto semestre. A introdução aos uso dos *softwares* no início da graduação permite conhecer bem as ferramentas que devem ser empregadas nas disciplinas profissionalizantes que os alunos irão deparar-se mais à frente.

Figura 35 - As disciplinas com recursos computacionais deveriam ser ministradas desde o início do curso.



Fonte: elaboração própria

5. CONCLUSÕES

Nas discussões deste trabalho, buscou-se entender a percepção dos discentes de engenharia química sobre a utilização e a importância dos sistemas computacionais como método de solução de problemas, compreensão de processos químicos e equipamentos industriais. Para isso, construiu-se um percurso metodológico que nos permitiu, a partir do conhecimento teórico sobre o desenvolvimento da engenharia química determinado pelas demandas da indústria, que são dinâmicas, entender as exigências e oportunidades advindas da Indústria 4.0.

Apura-se que, diante do cenário atual, os *softwares*, antes utilizados como ferramentas auxiliares, passam a ter um papel fundamental na prática da engenharia química contemporânea, dado os desenvolvimentos potencializados pela quarta revolução industrial. Como consequência, entende-se que os cursos de graduação nesta área também devem acompanhar a evolução tecnológica, de modo que os futuros profissionais possam desenvolver no ambiente acadêmico as habilidades computacionais que lhes serão requeridas no mercado de trabalho.

No apanhado teórico, também foi possível visualizar a dificuldade por parte dos docentes de implementar os métodos computacionais aprendidos pelos discentes nas disciplinas específicas do curso, o que gera uma lacuna entre os conteúdos ministrados em sala de aula e sua aplicação prática. Uma das consequências disso é a errônea percepção de desconexão entre os conteúdos da fase profissionalizante do curso.

Através dos casos ilustrativos, observa-se que a modelagem de equipamentos e a simulação de processos permite uma interação do discente com os métodos de produção de químicos, compreensão da conduta de substâncias sob situações diversas, visualização de transformações, comportamentos de fluxos e interações entre espécies químicas, entre outros. As interfaces de modelagem e simulação são de uso intuitivo. De modo que unindo os conhecimentos fenomenológicos e de programação foi possível solucionar os problemas selecionados, sendo estes problemas típicos do cotidiano de indústrias químicas. Os dados computacionais são obtidos em um ambiente seguro e são essenciais para tomadas de decisão, de modo que não se restringem ao uso acadêmico.

Foi a partir dessas noções que construiu-se o esboço das perguntas veiculadas no *survey*. As respostas coletadas foram agrupadas com base nas pontuações das

instituições nos Indicadores de Qualidade da Educação Superior. A análise estatística mostrou que uma porcentagem razoável dos alunos sequer tem acesso aos *softwares* essenciais à sua formação. Outra parcela teve acesso apenas na universidade, porém, é sabido que a carga de estudos dos cursos de engenharia química não se restringe apenas ao ambiente físico das instituições, sendo uma barreira na construção do profissional.

Também foi possível observar que parte significativa dos estudantes sentem dificuldade em aplicar os recursos computacionais como ferramenta de visualização e compreensão de processos químicos, tal realidade leva à ideia de que esses alunos não estarão aptos a performar esse tipo técnica. Os resultados da pesquisa corroboram a seguinte teoria: a maior parte dos discentes não se sente apta para a realização de modelagem e simulação de processos.

Assim como vislumbrou-se no apanhado teórico, na análise dos resultados do *survey* foi possível confirmar a inclinação de não aplicabilidade dos sistemas computacionais nas disciplinas profissionalizantes do curso, ainda que todos possuam componentes curriculares apresentando e manipulando *softwares*. Acreditamos que este cenário tem forte relação com aspectos de: alta evasão do curso, considerando a aparente desconexão dos conteúdos e a consequente desmotivação do alunado; a percepção de despreparo para manejar as ferramentas computacionais, uma vez que tais disciplinas deveriam tornar o futuro engenheiro apto para os desafios com que este se deparará na indústria e com a própria dificuldade de assimilação das etapas envolvidas em um processo químico, devido a complexidade da visualização prática.

Uma das etapas da pesquisa buscou entender a opinião dos estudantes quanto a uma possível substituição parcial da metodologia utilizada em disciplinas experimentais obrigatórias, empregando parte de sua carga horária em conteúdos de uso de sistemas computacionais, diminuindo assim o tempo investido em laboratórios acadêmicos. Observou-se a receptividade dessa ideia, o que parece estar alinhado às atuais práticas do mercado industrial. Entender como tal substituição poderia acontecer é um assunto à parte, que pode e deve ser explorado em novas pesquisas, considerando a complexidade e os impactos de uma mudança desse porte.

Em suma, podemos avaliar que existe uma tendência à insatisfação e despreparo do alunado em relação ao atual sistema de aprendizagem de *softwares*. Unindo a resposta dos estudantes ao levantamento teórico quanto as necessidades históricas e atuais da indústria, também percebe-se uma incompatibilidade entre as

práticas acadêmicas e aquelas que efetivamente são exigidas do profissional da engenharia química.

Acredita-se por fim que os objetivos dessa monografia foram alcançados dentro da proposta de delimitação da pesquisa. Os gráficos e as análises estatísticas cumpriram a função de apresentar a realidade quanto a percepção dos discentes de engenharia química em relação ao uso de *softwares*, mostrando um cenário acadêmico ainda distante daquele que seria compatível com as atuais demandas do mercado industrial.

6. REFERÊNCIAS

ABDEL-AAL, Hussein K. **Chemical Engineering Primer with Computer Applications**. Taylor & Francis Group, 2017.

ABET CONSTITUTION. 2015. Disponível em: <<https://www.abet.org/wp-content/uploads/2020/02/Ratified-ABET-Constitution-2015-Public.pdf>>. Acesso em 19 de nov. 2020.

American Institute of Chemical Engineers. **AIChE Constitution** - As amended to January 17, 2003. 2010. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20110813121650/http://www.aiche.org/About/WhoWeAre/Governance/Constitution.aspx>>. Acesso em 19 de nov. de 2020.

ANDRADE, Pedro Simões Antunes de Moura. **A Quarta Revolução Industrial e sua relação com a produtividade atual**: uma revisão da literatura. Monografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ARAUJO MOREIRA, F. M. O primeiro curso de engenharia física do brasil - um projeto já concretizado. **Anais do XXVIII Congresso Brasileiro De Ensino De Engenharia - COBENGE**. 2000.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de Química** – Questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre, 2001.

AZEVEDO, Sebastião Feyo de. Which Education of Chemical Engineers in 2020? **CHEMPOR'01**. p. 107-120. 2001.

BANKS, Jerry. **Handbook of Simulation**: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. 1998.

BAREISS, Ray; SEDANO, Todd. A Gentle Introduction to Learn By Doing. **Software Engineering Education Conference, Proceedings**. p. 81-84. 2012.

BELAUD, Jean-Pierre; ATOFINA, Michel Pons. Open Software Architecture For Process Simulation: The Current Status of CAPE-OPEN Standard. **Computer Aided Chemical Engineering**. v. 10, p. 847-852, 2002.

BIRD, R.B., STEWART, W.E, e LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de Transporte**. ed. 2. Editora LTC. 2004.

BOETTCHER, M. **Revolução Industrial** - Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0. LinkedIn, 2015. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-de-hist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

BORZANI, Walter. Cinética de reações enzimáticas. In: **Biotecnologia industrial: engenharia bioquímica**. 2001.

BRANDALISE, Ingo Luiz Boff. **Desenvolvimento de software para problemas de dimensionamento de reatores CSTR**. Monografia. Francisco Beltrão, 2019

BUENO, Cátia. **Planejamento Operacional de Refinarias**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2003.

CHEN, Wai-Kai. **Linear Networks and systems**: algorithms and computer aided implementation. ed. 2, 1990.

COHEN, Clive. The early history of chemical engineering: a reassessment. **The British Journal for the History of Science**. v. 29, ed. 2. p. 171 – 194. 1996.

Conselho Nacional De Educação Câmara De Educação Superior. **RESOLUÇÃO CNE/CES 11, DE 11 DE MARÇO DE 2002**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES112002.pdf>>. Acesso em 19 de nov. 2020.

COSTA, F. J. **Mensuração e desenvolvimento de escalas**: aplicações em administração. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011.

CREMASCO, Marco Aurélio. **Vale a pena estudar Engenharia Química**. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2015

Departamento de Engenharia química Escola Poli técnica da USP. **História**. Disponível em: <<http://pgi.poli.usp.br/departamento/historia/>>. Acesso em 19 de nov. 2020

Department of Chemical Engineering and Biotechnology. **History: 1945 to date**. Universidade de Cambrigde. Disponível em: <<https://www.ceb.cam.ac.uk/about/history>>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

DIAS, Ruan; VASCONCELOS, Luís; BRITO, Romildo. On the Necessary and Sufficient to Efficient Use of Software in the Teaching of Chemical Engineering. **Modern Applied Science**. v. 7, n. 3. 2013.

DUARTE, Ana Paula S.; CAMPOS, Renato P. O.; ORELLANA, Manolo H. B. Uso do software livre aplicado à Engenharia Química. **Anais do UEADSL 2011.2**. v. 2, n. 2. 2011. Disponível em: <<http://www.periodicos.letras.ufmg.br/index.php/ueadsl/article/view/2845>>. Acesso em 19 de nov. 2020.

FERNANDES, Fabiano A. **Use of Process Simulators for the Unit Operations Education of Undergraduated Engineers**. 2002.

FINLAYSON, Bruce A. **Introduction to chemical engineering computing**. 2006.

FOGLER, H.S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. ed. 2, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 1992.

FORZA, Cipriano. Survey Research in Operations Management: A Process-Based Perspective. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 22. p. 152-194. 2002.

GARCIA, Claudio. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. v. 1. EdUSP, 2005.

GORENDER, Jacob. Globalização, tecnologia e relações de trabalho. **Estudos Avançados**, v. 11, p. 311– 361. 1997.

HERMANN, Mario; PENTTEK, Tobias; OTTO, Boris. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. 2015. Disponível em: <http://www.iim.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf>. Acesso em 19 de nov. 2020.

Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **Indicadores da qualidade do ensino superior – MEC**. Disponível em: <<https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/indicadores-de-qualidade-da-educacao-superior>>. Acesso em 19 de nov. 2020.

JANA, Amiya K. **Chemical Process Modelling and Computer Simulation**. ed. 2, PHI Learning Private Limited, 2011.

JONES, J. B. The Non-Use of Computers in Undergraduate Engineering Science Courses. **Journal of Engineering Education**. 1998.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group**. 2013. Disponível em: <<https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

KANTOR, Jeffrey C; EDGAR, Thomas F. Computing skills in the chemical engineering curriculum. **Computers in ChE**. 1996.

KASSIM, H.O.; CADBURY, R.G. The place of the computer in chemical engineering education. **Computers & Chemical Engineering**. v. 20. 1996.

KVIZ, F.J. Toward a standard definition of response rate. **Public Opinion Quarterly**. v. 41. p. 265 – 267. 1977.

LEI Nº 10.861, de 14 de abril de 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2004/lei/l10.861.htm>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

LEITE, J. P.; BELTRÃO, M. J. C.; CHEBAR, I. E.; RAMIREZ, N. I. B., Avaliação preliminar do impacto de softwares de simulação no ensino das Engenharias Química e de Petróleo, **Engevista**. v. 16, n. 1, p. 28-40, 2014.

MAITLAND, G. **Ten skills chemical engineers should be talking about (Day 114)**. IChemE. 2014. Disponível em: <<https://ichemeblog.org/2014/09/18/ten-skills->

[chemical-engineers-should-be-talking-about-day-114/>](#). Acesso em 19 de nov. 2020.

MALHOTRA, M. K. GROVER, V. Na assessment of survey research in POM: from constructs to theory. **Journal of Operations Management**, v. 16. 1998.

McKinsey Digital. **Industry 4.0 after the initial hype**: where manufacturers are finding value and how they can best capture it. 2016. Disponível em: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/getting%20the%20most%20out%20of%20industry%204%20/mckinsey_industry_40_2016.ashx>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

MEIRELES, Maria Costa. BONIFÁCIO, Bruno. Uso de Métodos Ágeis e Aprendizagem Baseada em Problema no Ensino de Engenharia de Software: Um Relato de Experiência. **Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação**. 2015.

MENNER, William A. **Introduction to Modeling and Simulation**. 1995. Disponível em: <https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V16-N01/16-01-Menner.pdf>>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

MOLISANI, André Luiz. Evolução do perfil didático-pedagógico do professor-engenheiro. **Educ. Pesqui.**, São Paulo, v. 43, n. 2, p. 467- 482, 2017. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-97022017000200467&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 24 nov. 2020.

NORTON, Lewis. **The journal of the american Society**, v. XV. 1893. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja02115a001>>. Acesso em 19 de nov. 2020

OEHME, Friedrich; SEITZER, Dieter. Learn by doing: How to include new requirements of research in engineering education. **European Journal of Engineering Education**. p.131-137. 2000.

ORNSTEIN, Michael. **A Companion to Survey Research**. 2013

OUDSHOORN, M. J. et al. Understanding the New ABET Computer Science Criteria. **Proceedings of the 49th ACM Technical Symposium on Computer Science Education**. 2018.

PEKELMAN, Helio; MELLO, Antônio Gonçalves. A importância dos laboratórios no ensino de engenharia mecânica. **Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE**. 2004. Disponível em: http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/15/artigos/01_219.pdf>. Acesso em 19 de nov. 2020.

PEREIRA, Marco Antonio Carvalho. **Competências para o ensino e a pesquisa** – um survey com docentes de engenharia química. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007.

PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. **Engenharia de processos** – Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos. 1ª edição. 2005.

PERRIN, Laurent; LAURENT, André. Current situation and future implementation of

safety curricula for chemical engineering education in France. **Education for Chemical Engineers**. 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250755060_Current_situation_and_future_implementation_of_safety_curricula_for_chemical_engineering_education_in_France>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

POLING, Bruce; PRAUSNITZ, John; O'CONNELL, John. **The Properties of Gases and Liquids**. ed. 1. 2001.

PORTO, Luismar Marques. **A Evolução da Engenharia Química** - Perspectivas e Novos Desafios. Revista de Graduação da Engenharia Química, São Paulo, SP, v. 5, n.10, 2002.

PRESSMAN, Roger S. **Ingenieria del Software**: un enfoque práctico. 7ª Edição. 2010.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico**: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo - Rio Grande do Sul: Universidade Feevale, 2013. 277 p. v. 1.

REIGELUTH, Charles M. **Instructional-design Theories and Models**: A new paradigm of instructional theory. v. 2. 1983.

ROSSETTI, Adroaldo; MORALES, Aran Bey. **O papel da tecnologia da informação na gestão do conhecimento**. Ci. Inf. [online]. v. 36, n.1, p.124 -135. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0100-19652007000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

SAKURAI, Ruudi; ZUCHI, Jederson Donizete. As revoluções industriais até a indústria 4.0. **Revista Interface Tecnológica**. v. 15, n. 2, 2018. Disponível em: <<https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/386>>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

SANTOS, Moises; VIANNA JR, Ardson; CARRILLO LE ROUX, Galo. Programming skills in the industry 4.0: are chemical engineering students able to face new problems? **Education for Chemical Engineers**. 2018.

SCHULTZ, Guilhermina; et al. Modelagem e simulação dos reatores químicos BR e PFR no EMSO e GNU OCTAVE. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.10, n.18; p. 2014. Disponível em: <<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2014a/ENGENHARIAS/MODELAGEM.pdf>>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

SILVA, Beliza Patrícia da. **Simulação do transporte de massa e calor em sistemas heterogêneos gás-líquido em microcanais**. PIVIC – Universidade Federal da Paraíba, 2018.

SILVA, Leandro Palis; CECÍLIO, Sálua. A mudança no modelo de ensino e de formação na engenharia. 2007. **Educação em revista**. n. 45. Belo Horizonte. 2007.

SILVA, M. C. A.; GASPARIN, J. L. A Segunda Revolução Industrial e suas Influências sobre a Educação Escolar Brasileira. In: HISTEDBR, 2006, Campinas. **VII Seminário Nacional de estudos e Pesquisas**. Campinas: UNICAMP - Faculdade de Educação,

2006.

SILVA, Silvia Helena dos S. C. **Quando engenheiros tornam-se professores: trajetórias formativas de docentes do curso de engenharia elétrica** (IFPB/João Pessoa). Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Educação Profissional (PPGEP), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. 2015.

SOUZA, Tatiene Correia de. **Intervalo de confiança – Margem de erro**. Universidade Federal da Paraíba. 2014. Disponível em <<http://www.de.ufpb.br/~tatiene/Disciplinas/2014.2/Slides/MargemErro.pdf>>. Acesso em 26 de nov. 2020

STENSTROM, Michael K., ROSSO, Diego. **Fundamentals of Chemical Reactor Theory**, Los Angeles, 2003.

SUDMAN, Seymour; BRADBURN, Norman M. **Asking questions: a practical guide to questionnaire design** — for market research, political polls, and social and health questionnaires. ed. 1, 1982.

Taylor e Francis group. **Introduction to softwares for chemical engineers**. 1ª edição. 2014.

TONINI, A. M. Implementação de atividades complementares nos currículos dos cursos de engenharia. **Revista de Ensino de Ciências e Engenharia**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 2, p. 63-74. 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/revemat/article/view/1981-1322.2013v8n2p162/26026>>. Acesso em: 19 de nov. 2020.

UPRETI, Simant Ranjan. **Process modeling and Simulation for Chemical Engineers**. Wiley, 2017

VAN BATEN, J.; PONS, M. CAPE-OPEN: Interoperabilidade em Software de Simulação de Flowsheet Industrial. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 86, p. 1052 – 1064, 2014.

VAZZOLER, Alex. **Introdução ao estudo das viabilidades técnica e econômica de processos químicos** - Estimativas de custo para projetos conceituais e anteprojetos. Campinas, 2017.

WALKER, W. H.; LEWIS, W. K.; MCADAMS W. H.; GILLILAND, E. R. Principles of Chemical Engineering. *The Journal of Physical Chemistry*. **1937**. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/j150387a017>>. Acesso em 19 de nov. de 2020.

XU, Min; DAVID, Jeanne M.; KIM, Suk Hi. The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. **International Journal of Financial Research**. v. 9, n. 2. 2018. Disponível em: <https://cdn.lgseta.co.za/resources/research_and_reports/4IR%20Resources/The%204IR_Opportunities_and%20Challenges_Min%20Xu,%20Jeanne%20M%20David%20and%20Suk%20Hi%20Kim_2018.pdf>. Acesso em 19 de nov. 2020

YOUNG, B.R; SVRCEK, W.Y; MAHONEY, D.P. Real-Time Simulation Workshops for

Undergraduate Process Control Education. **IFAC Proceedings Volumes**. v. 33. ed. 31. p. 187 – 191. 2000.

ZANROSSO, Crissie; ANDREATTA-DA-COSTA, Luciano; KINAST, Eder. Análise da Dimensão Didático-pedagógica no Desempenho de Estudantes de Engenharia Química do Rio Grande do Sul. **Revista Meta**: v. 10, n. 30, p. 555 -578. 2018.

7. Apêndice A

Questionário da Pesquisa

SOFTWARES COMPUTACIONAIS NA FORMAÇÃO DO ENGENHEIRO QUÍMICO

Q1 - Olá, leva apenas 3 minutos para responder essa pesquisa. Em qual instituição de ensino você está matriculado?

Qual(is) Software(s) você utiliza/utilizou durante a graduação?

- Excel/VBA
- MatLab
- SciLab
- Fortran
- Aspen Plus
- SimCentral
- AutoCad
- Outro
- Nenhum

Q2 - Você teve fácil acesso aos softwares?

- Sim, na universidade e fora dela;
- Sim, apenas na universidade;
- Não, apenas durante as aulas.

Q3 - As disciplinas específicas do curso utilizaram recursos computacionais para melhor visualização e entendimento prático dos problemas, processos e projeto de equipamentos?

- Sim, todas
- Sim, a maioria
- Sim, poucas
- Não

Q4 - Você concorda que carga horária das disciplinas experimentais pode ser substituída por disciplinas computacionais?

- Sim, totalmente
- Sim, parcialmente
- Não

Q5 - Assinale seu nível de concordância com as afirmações a seguir:

	Discordo Totalmente	Discordo	Não discordo nem concordo	Concordo	Concordo Totalmente
Softwares Computacionais são ferramentas indispensáveis ao Engenheiro Químico mediante o avanço tecnológico					
O software contribuiu na sua formação como engenheiro químico.					
As disciplinas específicas do curso deveriam ter os conhecimentos teóricos associados à aplicação de softwares para solução de problemas.					
Tenho dificuldade na utilização de softwares para compreensão e visualização de projetos e plantas químicas.					
Softwares são difíceis de utilizar.					
As disciplinas teóricas do curso são ministradas utilizando recursos computacionais na solução de problemas.					
As disciplinas com recursos computacionais deveriam ser					

ministradas desde o início do curso.					
Sinto-me apto para fazer simulações e modelagem de processos.					