

FEL 1: PROJETO CONCEITUAL DE ENGENHARIA DE UMA PLANTA PARA RECUPERAÇÃO DE CATALISADOR DESCARTADO EM EFLUENTE INDUSTRIAL UTILIZANDO MICROFILTRAÇÃO SUBMERSA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.4047

Guilherme Carneiro Meziat - guilhermeziat404@gmail.com
Pontifícia Universidade Católica

Roberto Bentes de Carvalho - rbcarvalho@puc-rio.br
PUC RIO

Resumo: Frente às Novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) dos Cursos de Graduação em Engenharia, dando maior foco ao desenvolvimento de competências comparado ao aprendizado de conteúdos, instituições de ensino vem se reinventando, na medida em que se adaptam aos métodos de aprendizado ativo voltado para soluções de problema ou para desenvolvimento de projetos. Entre eles, existem os Projetos de Engenharia de Processos (PEPs), os quais vieram a existir como um produto das revoluções industriais. Esses projetos geralmente possuem uma documentação de engenharia extensa, com uma ampla variedade de arquivos, desde listas até diagramas e diferentes memórias de cálculo. Metodologias de projeto vêm sendo adaptadas para reduzir o risco de erros e falhas graves durante sua execução, com a mais difundida atualmente recebendo o nome de Front-End Loading (FEL). Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo se utilizar dessa metodologia para desenvolver um projeto de uma planta de microfiltração submersa para tratar um efluente industrial líquido com presença de catalisadores, de forma a recuperá-los para o seu processo de produção. Para isso, três fases precisarão ser cumpridas, sendo este estudo a primeira delas: o projeto conceitual (FEL 1). Nessa fase, foram definidas as principais questões sobre o processo em uma tabela de processos (TP) e, com isso, foi gerado um diagrama de blocos de processo (BFD) do processo, representando de forma simples como a planta deve operar. Foi feito um balanço de massa preliminar baseado nas premissas da TP, onde definiu-se a composição das principais correntes do processo. Por fim, realizou-se uma estimativa do investimento fixo inicial necessário para a instalação da planta. Como uma forma de conectar a aplicação dessa metodologia ao tipo de ensino que as novas DCNs exigem, um questionário solicitando as descrições das dificuldades encontradas na construção de cada documento de engenharia e as competências desenvolvidas durante o FEL 1 foi preenchido pelos estudantes da disciplina de Projeto de Processos Químicos.



Pôde-se apontar com segurança que as competências mais desenvolvidas na percepção dos estudantes foram a proficiência na utilização de ferramentas de Computer-Aided Design (CAD), o conhecimento da metodologia de PEP e o trabalho em equipe, com outras competências, como conhecimento de conceitos básicos da engenharia química, adaptabilidade, liderança e comunicação seguindo logo atrás.

Palavras-chave: *Efluente; Recuperação de Catalisador; Microfiltração Submersa; FEL-1, Competências, Tabela de Processos, Diagrama de Blocos*



FEL 1: PROJETO CONCEITUAL DE ENGENHARIA DE UMA PLANTA PARA RECUPERAÇÃO DE CATALISADOR DESCARTADO EM EFLUENTE INDUSTRIAL UTILIZANDO MICROFILTRAÇÃO SUBMERSA

1. INTRODUÇÃO – O PROJETO DE ENGENHARIA DE PROCESSOS

O ensino de engenharia no nível superior está passando por recentes transformações. As Novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) dos Cursos de Graduação em Engenharia, disposta na Resolução CNE/CES nº 02/2019, estão atualmente em implementação. A Resolução tem por objetivo principal: "Elevar a qualidade dos cursos, mudando a concepção da formação de um paradigma com foco em conteúdo para o de construção de competências (habilidades + atitudes + conhecimento)". Dentre as competências mais mencionadas estão as habilidades de gerenciar, liderar e executar projetos de engenharia, o que torna importante saber elaborar e interpretar todos os documentos de engenharia desenvolvidos em um projeto. Além disso, a Resolução tem por objetivo criar engenheiros empreendedores e inovadores e oferecer atividades compatíveis com as demandas da sociedade, dando protagonismo ao estudante durante o processo de aprendizado.

Com o advento das revoluções industriais foi necessário se adaptar a uma nova realidade, onde a produção ocorre em massa, a partir de processos produtivos em plantas industriais (ZHANG *et al.*, 2021). Para isso, existe o Projeto de Engenharia de Processos (PEP), que se utilizam de metodologias consolidadas, desenvolvido em fases sequenciadas e interligadas, com desencadeamento lógico de informações, de uma visão macroscópica até um elevado grau de detalhamento, consolidadas na elaboração de diferentes documentos de engenharia, cada um com suas características próprias. No PEP define-se o escopo do processo industrial, desde o seu planejamento inicial, até a operação e manutenção da planta, com produção do produto propriamente dito, finalizando com a etapa de descomissionamento da planta (DA SILVA e DE CARVALHO, 2020).

Nesse contexto, uma das metodologias de PEP mais utilizadas atualmente é denominada de *Front-End Loading* (FEL), chamada também metodologia dos portões, de *Front-End Planning* (FEP), *Front-End Design* (FED) ou *Front-End Engineering Design* (FEED) (JERGEAS, 2009; SPANGLER, 2005). É uma técnica que vem sendo utilizada desde os anos 90 (TAFF *et al.*, 1991) e está amplamente difundida nos setores de óleo, gás e energia (SPANGLER, 2004), manufatura (MORITA *et al.*, 2011) e construção (JERGEAS, 2009; LARSEN *et al.*, 2021). Dito isso, essa metodologia ainda não está difundida de forma igual no mundo inteiro, inclusive no meio acadêmico, com uma grande lacuna de referências em ensino de engenharia aplicando as metodologias citadas.

A metodologia FEL, sendo uma das formas de se efetuar um PEP, não deixa de se utilizar dos mais diversos documentos de engenharia necessários. Alguns exemplos são: diferentes tipos de listas; memórias de cálculo diversas, memoriais descritivos de processo e de controle; relatórios técnicos; pareceres técnicos; folhas de dados; e diferentes tipos de fluxogramas e desenhos de engenharia, 2D e 3D, sempre em ordem crescente de complexidade. Esses documentos são então divididos em três fases: projeto conceitual (FEL 1), projeto básico (FEL 2) e projeto de detalhamento (FEL 3), onde este último é a interface entre o planejamento no papel e a construção da planta (SPANGLER, 2004).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é se utilizar da metodologia FEL, juntamente da documentação de engenharia normalmente utilizada em PEPs, para desenvolver um projeto conceitual (FEL 1) de uma planta industrial de forma didática. Os objetivos

específicos do trabalho são as elaborações: da Tabela de Processo; do Diagrama da Blocos; da Memória de Cálculo Preliminar de Balanço de Massa, definido os dados principais de entrada e saída do processo; e de uma estimativa preliminar de custos de investimentos para implementação da planta. Outro objetivo específico é discutir as dificuldades encontradas pelos estudantes na elaboração desses documentos da FEL 1.

2. MOTIVAÇÃO – MICROFILTRAÇÃO SUBMERSA DE UM EFLUENTE

Como objeto de estudo, projeta-se uma planta de MF submersa, com o objetivo de tratar um efluente líquido industrial, recuperando simultaneamente a água tratada, que pode ser reutilizada, e o catalisador, que pode também retornar para o seu processo produtivo, agregando valores financeiro e de sustentabilidade para a indústria.

A MF se trata de um Processo de Separação por Membranas (PSM), no qual separa-se sólidos suspensos presentes em água ou efluentes líquidos, analogamente ao funcionamento de, por exemplo, um coador de café. Esse tipo de processo foi concebido nos anos 20 do século passado e tem como força motriz o diferencial de pressão entre os dois compartimentos dos módulos de membranas: de alimentação/concentrado e de permeado. Na MF submersa temos uma pressão negativa aplicada no lado do permeado, água tratada pelo processo. As membranas de MF possuem poros superficiais com diâmetros equivalentes a 0,1 micrômetro, sendo capaz de reter, por diferença de tamanho, todos os sólidos suspensos presentes na água ou efluente líquido, bem como os materiais microemulsionados ou complexados, microrganismos e bactérias, todos maiores do que os poros presentes (REIF, 2006).

Um dos desafios principais da MF é a deposição de particulado na membrana, causando incrustações que diminuem o fluxo permeado do fluido tratado, podendo entupir-la por completo se não tratado. Sendo assim, vários cuidados devem ser tomados no PEP de forma a prevenir e minimizar esse problema como, por exemplo: (1) pesquisar o melhor material e tipo de superfície da membrana para filtrar o sólido em questão; (2) otimizar o planejamento de forma a estimar parâmetros de operação mais compatíveis com o processo; (3) interromper a operação periodicamente para realizar procedimentos de limpeza físicos ou químicos (CIP); (4) pré-tratamento na corrente de alimentação para diminuição da concentração de sólidos, reduzindo a taxa de deposição na membrana; e (5) operação da MF integrada ao processo de sedimentação, visando reduzir também a concentração de sólidos na alimentação e obter um efluente com sólido recuperado mais concentrado (HILAL *et al.*, 2005).

Atualmente, catalisadores são utilizados frequentemente em diversas operações industriais. Uma das suas principais aplicações se encontra na indústria de petróleo e gás, onde são utilizados para craquear o óleo bruto em frações mais leves (VERMEIREN e GILSON, 2009). São também amplamente utilizados na produção de polímeros, como silicones (LUKIN *et al.*, 2020), borrachas (WANG *et al.*, 2013) e plásticos puramente orgânicos, derivados do petróleo (CHENG *et al.*, 2013; KAMINSKY e SINN, 2013), além de auxiliarem em reações envolvendo gás de síntese (PALMA *et al.*, 2020), entre outras.

O processo de produção dos catalisadores envolve etapas de sedimentação, lavagens em esteiras filtrantes, concentração e secagem. Tais lavagens podem ocasionar perda de produto, que acabariam sendo descartados como efluente, aumentando sua carga poluidora. No projeto utilizou-se como base os resultados obtidos em testes com planta piloto operada em campo (DE CARVALHO e COELHO, 2014).

3. METODOLOGIA

Como previamente explicitado, o estudo atual explorará somente a fase de projeto conceitual da planta a ser desenvolvida (FEL 1). Essa fase é a fase de *kick-off* para a elaboração da documentação pertinente ao processo, da qual geralmente são tratados aqui:

3.1. Lista de Documentos Inicial

A Lista de Documentos geralmente é um dos primeiros documentos gerados em cada uma das fases do PEP. A sua geração serve para estimar quais serão os documentos a serem entregues ao longo do projeto, prevendo e locando os recursos humanos necessários, dentro do prazo estabelecidos. Aqui também podem ser definidos os critérios de nomenclatura de todos os documentos a serem elaborados, a partir do seu tipo, da empresa de interesse, da disciplina envolvida, da ordem de confecção, dentre outros. Cada empresa costuma ter uma norma interna, porém existem organizações, como a *International Standard Organization* (ISO) e *American National Standards Institute* (ANSI), que criam padrões que podem ser adotados pelo mundo inteiro (ANSI/ISA-5.1, 2009).

3.2. Cronograma do Projeto

O Cronograma do Projeto, de forma complementar à Lista de Documentos, estima quando cada documento deve ser entregue. Definir um cronograma exige bastante tato e experiência, para estimar um prazo realista. Por isso, existem diversos aplicativos atualmente que facilitam a geração, monitoramento e adaptação de um cronograma.

3.3. Tabela de Processos

A Tabela de Processos faz parte de uma dupla de documentos que simbolizam o começo da materialização do projeto, normalmente dispendo de questões gerais sobre cada etapa do processo a ser abordado. Essa tabela será abordada com mais detalhes na seção de resultados. É um documento importante, pois o resto do projeto se baseia nele e possibilita ao projetista/estudante uma familiarização prévia com o processo a ser projetado.

3.4. Relatório Técnico de Processo

Completando a dupla com a Tabela de Processos, o Relatório Técnico de Processo tem como objetivo transformar a tabela, com todas as questões respondidas, em um texto por extenso. Geralmente esse documento é produzido quando se é necessário entregar um planejamento para terceiros, de forma a melhorar a apresentação dos dados de base. Isso facilita a leitura e compreensão do projeto por pessoas externas do projeto.

3.5. Diagrama de Blocos de Processo

O Diagrama de Blocos de Processo (Block Flow Diagram, BFD) é o primeiro desenho de engenharia produzido, dispendo das suas partes principais. Esse diagrama possui o menor nível de detalhamento de todos os desenhos que serão produzidos ao longo de todo projeto, por apenas fazer uma representação macroscópica do processo, a famosa visão "caixa-preta". As correntes principais, de limpeza e drenagem são explicitadas da forma mais simples possível, mudando a cor de suas linhas, enquanto cada etapa é representada por um retângulo com o nome da etapa. Para facilitar a leitura do desenho, algumas convenções são utilizadas, como por exemplo: todos os fluídos de entrada estarem na extremidade esquerda do desenho, alinhadas verticalmente, dentre outras.

3.6. Memorial de Cálculo do Balanço de Massa Preliminar

O balanço de massa preliminar define os primeiros passos em relação ao dimensionamento do processo. No BFD só diz respeito às correntes principais, nas quais a matéria-prima é transformada no produto, e não envolve nenhuma corrente secundária, de limpeza ou de drenagem. Esse balanço dispõe de um equacionamento simplificado, porém utilizando como base a tabela de processos, que deve possuir fontes confiáveis.

3.7. Estimativa Preliminar do Investimento Fixo Inicial

No FEL 1 devemos obter pelo menos uma estimativa preliminar do investimento fixo inicial necessário para implementação da planta de MF submersa (CAPEX). Existem diferentes metodologias para fazer tal estimativa preliminar (TOWLER e SINNOT, 2009). Utilizaremos aqui um cálculo baseado na área de membranas de MF, item principal para dimensionamento da tecnologia.

4. RESULTADOS

Definidos os documentos de engenharia do FEL 1 e como a confecção de cada um é feita, o próximo passo é a sua aplicação no objeto de estudo proposto. Nessa seção, serão apresentados exemplos de cada documento pertinente, com imagens e explicações detalhadas, de forma a idealizar mais concretamente como é o corpo de um PEP.

4.1. Tabela de Processos

A Tabela de Processos, visível na página seguinte (Quadro 1), é uma forma de definir o processo de forma rápida e concisa. Uma planilha é o bastante para obter conhecimento total da metodologia e dos princípios e premissas básicas do processo. Por isso, essa tabela não deve ser preenchida a esmo, necessitando de pesquisas bibliográficas *a priori* para confirmar informações sobre o processo e obter outras potencialmente úteis também.

Essa tabela dispõe de algumas categorias de perguntas, onde são definidas algumas premissas. Essas categorias estão respectivamente realçadas no Quadro 1, a saber:

Definição da etapa

As primeiras perguntas da tabela, realçadas em azul, como nome, princípio de funcionamento, objetivo, aplicação, entre outras, servem para definir a etapa em termos básicos. Essas perguntas servem para extrair o que é a etapa, para que se quer utilizar essa etapa e qual característica física ou química se deseja utilizar para performar essa etapa. Dessa forma, tem-se uma base para começar uma pesquisa sobre as possibilidades da realização da etapa da forma desejada e, se necessário, alterar e corrigir algumas informações nessa categoria. Importante destacar que o nosso processo só terá uma etapa, que é a MF submersa, escolhida pela vantagem de operar com maiores concentrações de sólidos na alimentação, quando comparada com a microfiltração pressurizada. Escolheu-se cerâmica, como material da membrana, pela possibilidade de trabalhar em pH agressivo por mais tempo.

Revisão bibliográfica

As perguntas realçadas em verde são geralmente as que envolvem o maior teor de pesquisa bibliográfica, por serem questões gerais sobre os processos presentes. Aqui, é necessário definir questões limitantes para a operação da tecnologia escolhida na etapa, bem como a performance esperada e quais os parâmetros principais para dimensioná-la. Além disso, é nessa categoria que é definido o equacionamento que influencia diretamente na planta a ser construída e qual a melhor forma de monitorar seu desempenho.

Quadro 1 – Tabela de processos para a planta de microfiltração.

| Respostas para a etapa/tecnologia | |
|--|--|
| Nome da Etapa/Tecnologia | Microfiltração Submersa (MFS) com membrana plana cerâmica. |
| Aplicada para? | Recuperação de catalisador de efluente industrial. |
| Processo de separação ou reação? | Separção. |
| Princípio de Funcionamento? | Retenção de partículas em função da relação entre seu tamanho e o diâmetro do poro da membrana. |
| Força motriz? | Diferencial de pressão entre a alimentação/concentrado e o permeado (filtrado). A MFS opera com pressão negativa do lado do filtrado. |
| Remove ou degrada o que? | Remove catalisador. |
| Quais os solutos principais que se deseja que etapa/tecnologia remova ou reaja? | Catalisador. |
| Quais os solutos principais que se deseja que etapa/tecnologia mantenha? | Efluente tratado (água de reúso) + Concentrado de catalisador. |
| Qual o limite de concentração mínima dos solutos para aplicação da tecnologia? | Concentração que dispensa a aplicação do processo (~Zero). |
| Qual o limite de concentração máxima dos solutos para aplicação da tecnologia? | 15.000,0 mg/L de sólidos suspensos no efluente. |
| Qual a eficiência típica da etapa/tecnologia? | Eficiência em torno de 99,9%. |
| Quais os parâmetros principais para dimensionamento da etapa/tecnologia? | Recuperação em torno de 85,0%. |
| Quais as principais variáveis que devem ser monitoradas e controladas na etapa/tecnologia? | Área de filtração em função do fluxo permeado típico da MFS. |
| Quais as técnicas analíticas que melhor representam as composições dos fluidos da etapa/tecnologia? | Microfiltração: Concentração de catalisador, pressão de filtração, vazão de permeado, vazão de concentrado; Retrolavagem: pressão da retrolavagem, vazão da retrolavagem; |
| Apresentar equacionamento principal para dimensionamento da etapa/tecnologia. | O principal para a MFS seria um Analisador Transmissor (AT) de turbidez. Um outro AT de pH também seria necessário para acompanhar as operações de limpeza química. Fluxo permeado: $Q_p = \text{Vazão permeado} (Q_{\text{permeado}}) / \text{Área de filtração da membrana} (A_{\text{memb}})$; Permeabilidade: $L_p = J_p / \text{Pressão de operação} (P_{\text{op}})$. |
| Quais são as malhas de controle principais da etapa/tecnologia? | - Transmissor de pressão (PT) via inversor de frequência (VSD) nos motores das bombas de filtração e retrolavagem; - Válvula de controle por tempo (KV) para controle dos tempos de filtração e de retrolavagem de cada trem de MFS); - AT de pH via VSD da bomba dosadora de ácido (limpeza química); - Transmissor de vazão (FT) via válvula de controle de vazão (FV) para controle da aeração da MFS. |
| Quais são as malhas de intertravamento necessárias na etapa/tecnologia? Etapa/tecnologia com operação contínua ou em batelada? Manual ou automatizada? | Motor de Bomba via LT (filtração: tanque de membrana, retrolavagem: tanque do permeado). |
| Para operação contínua, deve ser previsto mais de um trem operando? Quantos serão, com que capacidade? | Operação contínua, automatizada. Sim. 5 trens de 25,0%. |
| Qual a operação principal da etapa/tecnologia em estudo? | Filtração. |
| Quais as correntes da etapa/tecnologia na operação principal? | Efluente bruto contendo catalisador e Ar de processo. |
| Na etapa/tecnologia existe operação secundária ou de limpeza? Quais? | Permeado (água tratada) e Concentrado de catalisador. Sim: (1) Retrolavagem Física (RTF); (2) Enxague Químico (EQ); (3) Limpeza Química (LQ); (4) Enxague Físico (EF). |
| Quais as correntes da etapa/tecnologia presentes na operação secundária ou de limpeza? | Entradas 1. RF: Permeado + Ar (ocorre em alternância com a operação de filtração); 2. EI: Fluido de Enxague (utilizando o permeado). Antes do EI, o trem de membranas em limpeza química deve ser drenado; 3. LQ: Solução de limpeza química (formada pela mistura de permeado e ácido cítrico); 4. EF: Fluido de Enxague (utilizando o permeado). Depois do EF, o trem de membranas em limpeza química deve ser drenado e, em seguida, cheio com permeado para ficar em stand-by, pronto para entrar em operação secundária ou de limpeza? Saídas 1. RF: Rejeito da retrolavagem (fica no tanque de membrana e é descartado junto do concentrado de catalisador); 2. EI: Rejeito de drenagem (realizado antes da EI) e Dreno inicial limpeza MF (rejeito do EI). Ambas as saídas são encaminhadas para o fluido de saída do processo - Dreno de efluente frio); 3. LQ: Rejeito de limpeza química (encaminhado para o fluido de saída do processo - Dreno de químicos); 4. EF: Rejeito de enxague (encaminhado para o fluido de saída do processo - Dreno de efluente frio). |
| Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual? | Sim. Drenagem geral da microfiltração. |
| Quais as correntes da etapa/tecnologia presentes na operação não contínua? | N/A |
| Quais os produtos químicos utilizados na operação principal? | Rejeito de drenagem (encaminhado para o fluido de saída do processo - Dreno de efluente frio). |
| Quais os produtos químicos utilizados na operação secundária ou de limpeza? | N/A |
| Quais as concentrações desses produtos químicos? | N/A |
| Quais as concentrações desses produtos químicos? | Limpeza química: Solução concentrada de ácido cítrico. pH ~3 |
| Alguma outra informação que considere relevante ser destacada? | 1 - Existe um trem de MFS que fica em stand-by ou limpeza química, enquanto os outros estão operantes; 2 - Na operação de filtração, a MFS passa por ciclos de filtração e retrolavagem, de forma que, no máximo, uma membrana está em retrolavagem em um dado ponto da operação. |

Fonte: Elaboração própria

Controle da etapa

As perguntas realçadas em roxo são sobre às malhas de controle e de intertravamento da etapa, que vão ditar os equipamentos e as instrumentações presentes na planta (bombas, válvulas, inversores etc.). É aqui que se leva em consideração como que a planta vai operar e como mitigar os riscos envolvidos nesse *modus operandi*.

Funcionamento da etapa

Finalmente, as perguntas da segunda metade da tabela, realçadas em laranja, dizem respeito à uma definição um pouco mais detalhada da etapa, com propriedades próprias ao projeto que aqui se desenvolve, como as operações principais, secundárias e manobras de parada/manutenção que a planta possui e os fluídos e as correntes envolvidas em cada uma dessas operações. Além disso, é dado ênfase aos químicos a serem utilizados, por serem geralmente de preocupação ambiental. Para finalizar, uma questão sobre pontos adicionais a serem notados, que talvez não coubessem em uma resposta aos outros itens presentes na tabela. É a segunda etapa mais intensiva em pesquisas bibliográficas.

O Quadro 1, no entanto, não mostra a totalidade da tabela de processo. Dados das condições das correntes de entrada e de saída do processo são especificadas em uma outra planilha (Tabela). Com esses dados, torna-se possível então a geração do Relatório Técnico de Processo. Entretanto, esse relatório não será tratado neste trabalho, devido à sua grande extensão, contendo geralmente mais de 5 páginas.

Tabela 1 – Condições da corrente de entrada (A) e de saída (B) do processo de microfiltração.

| A | B |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Pressão = 0,0 Barg | Pressão = -0,2 Barg |
| Temperatura = 25,0 °C | Temperatura = 25,0 °C |
| Vazão = 15,0 m ³ /h | Vazão = 2,25 m ³ /h |
| Turbidez = 600,0 NTU | Turbidez = 4000,0 NTU |

Fonte: própria

4.2. Diagrama de Blocos de Processo

A confecção do BFD representa o resultado de toda a pesquisa feita nessa fase do projeto. Em termos gerais, o BFD é a visualização de tudo que foi informado na tabela de processos e no relatório técnico de processo. Assim, correntes principais, secundárias e de limpeza devem ser representadas, bem como as etapas do processo e a ordem correta de progressão das correntes por cada etapa (Figura). Pode-se perceber na Figura 1 que o BFD é dividido em diferentes áreas, cada uma com sua finalidade própria. São elas:

Área de grid

Essa área serve de referência para localizar os fluídos, tecnologia e operadores na área gráfica. Ela está dividida em seções, representadas pelo gradeado que se encontra nas bordas, com numeração de 1 a 5 verticalmente e com letras de A a E horizontalmente.

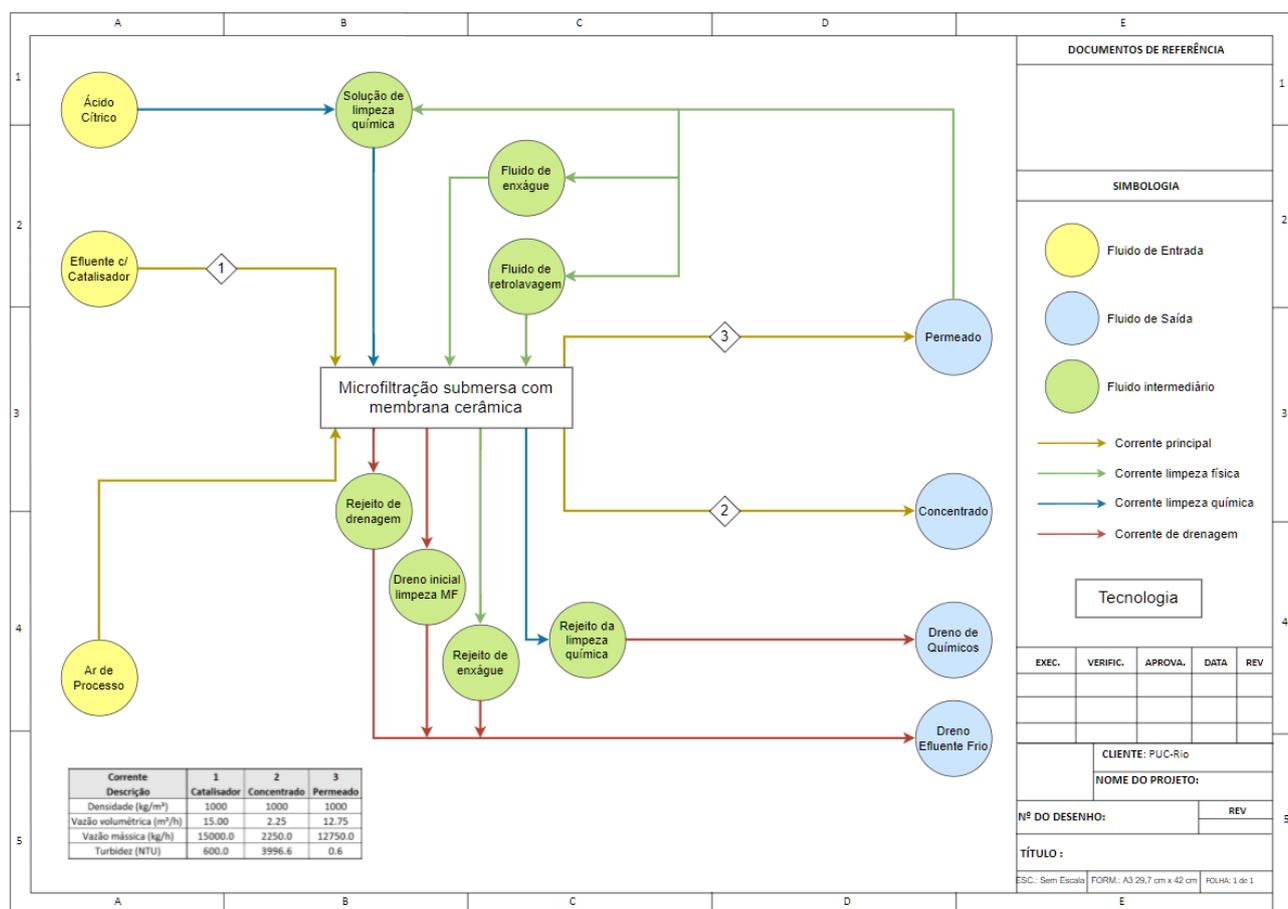
Área gráfica

É a área mais importante do BFD e a que contém a maior quantidade de informações. É nesta área que o processo está representado de forma visual. Por exemplo, a tecnologia de microfiltração submersa está na seção horizontal 3, entre as seções verticais B e C, e as correntes de entrada se encontram na seção vertical A. Em termos gerais, as correntes e tecnologias principais devem percorrer o BFD pelas seções horizontais intermediárias, na

medida em que as correntes de entrada permanecem à esquerda e as de saída à direita. Todas essas medidas são tomadas de forma a prover uma área gráfica de fácil visualização e compreensão.

Outras medidas secundárias, mas ainda importantes, envolvem posicionar correntes intermediárias gasosas acima de correntes intermediárias líquidas, além de manter correntes residuais e de dreno nas seções inferiores, na medida do possível. Fora isso, é bom evitar com que linhas se intersectem, especialmente da mesma cor, para evitar confusões na hora de interpretar o caminho das correntes no BFD.

Figura 1 – Diagrama de Blocos do Processo de MF Submersa para Recuperação de Catalisador Presente em um Efluente Líquido Industrial.



Fonte: Elaboração própria

Área de referências

É encontrada no canto superior direito do BFD. Nela é indicada os documentos utilizados como referência para a confecção do desenho. No caso do BFD deste projeto, o único documento de referência é a tabela de processos. O relatório técnico também pode ser inserido aqui, porém sua geração não ocorreu nesse estudo.

Área de simbologia

É localizada abaixo da área de referências, devendo ser indicados os símbolos utilizados na área gráfica, como: cores e setas utilizadas para os diferentes tipos de correntes; indicação das tecnologias (retângulos), operadores especiais, se for o caso, e dos fluídos de entrada, intermediários e de saída (círculos).

Área de revisão

A área de revisão, representada abaixo da área de simbologia, é uma tabela onde deve-se incluir os autores do PFD, bem como o número e a data da sua revisão. É uma área importante para rastreabilidade do desenho, devendo indicar quem elaborou, quem revisou e quem aprovou cada uma das versões do documento.

Área de títulos

No canto inferior direito, finalmente, pode ser localizada a área de títulos. Aqui, é indicado o cliente para o qual o BFD foi produzido, o título, o código e a revisão do desenho, bem como as características e tamanho da folha a ser utilizada na impressão do desenho.

Balanço de massa preliminar

Na parte inferior da área gráfica, se encontra o resultado do balanço de massa preliminar, destacada na Tabela . A vazão volumétrica do efluente bruto foi definida em 15,0 m³/h. A recuperação da MF submersa, relação entre as vazões de permeado e de alimentação, foi considerada a 85,0%. Assim, a vazão de permeado seria de 12,75 m³/h. A vazão de concentrado, contendo o catalisador, foi calculada pelo balanço de massa, sendo a diferença entre as vazões de alimentação e de permeado (2,25 m³/h).

A MF submersa tem uma eficiência de 99,99% de remoção dos sólidos suspensos presentes no efluente bruto, conforme teste piloto realizado (DE CARVALHO e COELHO, 2014). Assim, podemos calcular a concentração do permeado, representada pela turbidez (0,1 NTU), que possui uma relação linear com a concentração de sólidos suspensos. Pelo balanço, é possível calcular também a turbidez da corrente de concentrado (3999,7 NTU).

Tabela 2 – Balanço de massa preliminar da planta de MF submersa.

| Corrente | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------------|-------------|-------------|----------|
| Descrição | Catalisador | Concentrado | Permeado |
| Densidade (kg/m ³) | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 |
| Vazão volumétrica (m ³ /h) | 15,00 | 2,25 | 12,75 |
| Vazão mássica (kg/h) | 15000,0 | 2250,0 | 12750,0 |
| Turbidez (NTU) | 600,0 | 3999,7 | 0,1 |

Fonte: Elaboração própria

4.3. Estimativa do CAPEX

O CAPEX pode ser estimado através da área de membranas de MF necessária para realizar o serviço. O fluxo permeado foi considerado igual a 20 L/h.m². Assim, para vazão de permeado de 12.750,0 L/h, precisa-se de 637,5 m². Considerando R\$ 200,0 por m², teremos uma estimativa de R\$ 127.500,0, só para as membranas. Com essa faixa de capacidade da planta e pelo conhecimento acumulado na área, a membrana seria em torno de 40,0% do investimento total. Assim, o CAPEX preliminar estimado seria de R\$ 318.750,00. Nas fases do FEL 2 e FEL 3 esse valor será revisado, com cotação real dos equipamentos. Adicionalmente, a análise econômica será realizada, com cálculo dos indicadores financeiros, como: Valor Presente Líquido; Tempo de Retorno de Investimento; Taxa Interna de Retorno; dentre outros.

4.4. Discussão: Dificuldades Encontradas e Competências Desenvolvidas

Seguindo as novas DCNs, a aplicação da metodologia de PEPs na graduação gera novas oportunidades e experiências de aprendizagem para o corpo discente. Entretanto,



isso vem acompanhado de dificuldades na interação com os documentos de engenharia e normas utilizadas, normalmente, pela primeira vez.

Nas Tabela 3 e 4 são apresentados os resultados, obtidos em avaliações 360 feitas com os estudantes que cursaram a disciplina de Projeto de Processos Químicos, nos anos de 2020 e 2021, quanto às dificuldades encontradas nas confecções da Tabela de Processos e do BFD, respectivamente.

Temos, no total, respostas de 55 estudantes, sendo que podem aparecer mais de uma dificuldade por tipo de documento. Vale notar que, na Tabela 4, as áreas de revisão, títulos e de referências foram classificadas como "Áreas Auxiliares". Já "Normas gerais" dizem respeito às normas e convenções utilizadas para a geração do BFD, por exemplo: o tagging definido pela lista de documentos. Por fim, "Ferramenta CAD (*Computer-Aided Design*)" define o *software* utilizado para gerar o BFD.

Tabela 3 – Dificuldades encontradas pelos estudantes na construção da Tabela de Processos do projeto conceitual (FEL 1).

| Dificuldades Tabela de Processo | Citações |
|---------------------------------|-----------|
| Revisão bibliográfica | 38 |
| Funcionamento da etapa | 16 |
| Controle da etapa | 8 |
| Definição da etapa | 1 |
| Trabalho em equipe | 1 |
| Sem dificuldades | 3 |
| TOTAL | 67 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4 – Dificuldades encontradas pelos estudantes na construção do Diagrama de Blocos do projeto conceitual (FEL 1).

| Dificuldades BFD | Citações |
|--------------------|-----------|
| Área gráfica | 16 |
| Ferramenta CAD | 15 |
| Simbologia | 10 |
| Normas | 2 |
| Áreas auxiliares | 1 |
| Trabalho em equipe | 1 |
| Sem dificuldades | 15 |
| TOTAL | 60 |

Fonte: Elaboração própria

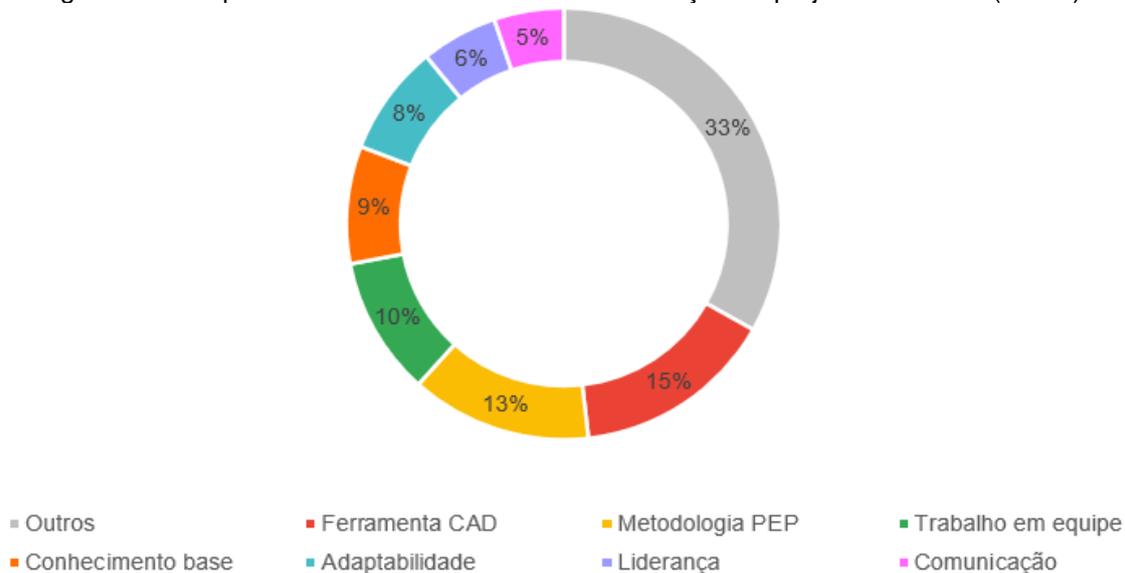
Percebe-se, na Tabela 3, que somente três estudantes não tiveram dificuldades na confecção da tabela de processo. Os demais estudantes encontram mais dificuldades com a pesquisa por dados sobre o processo (revisão bibliográfica), parcialmente devido à falta de experiência com pesquisas bibliográficas, porém também devido as informações desejadas para o PEP não estarem normalmente explícitas nas referências. Uma etapa trabalhosa, mesmo que não necessariamente difícil, mas que ajudará os documentos posteriores do projeto, sendo a principal referência para os FEL 2 e FEL 3.

Na Tabela 4 observa-se que quinze estudantes não encontraram dificuldades na elaboração do BFD. Esse número vem aumentando ao longo dos últimos períodos, muito em função da criação de vídeos curtos, pelos próprios estudantes, sobre o desenho, publicados na página no *Instagram* da Disciplina (@projetodeprocessosquímicos). As dificuldades listadas para o BFD se polarizaram em três: a organização/representação do processo na área gráfica; a utilização da ferramenta para a geração do BFD (*draw.io*); e a definição da simbologia do processo. É razoável que a Área Gráfica e a Ferramenta CAD possuam números quase idênticos de citações, visto que a falta de conhecimento e expertise em *softwares* de *design* geralmente leva as dificuldades de organização e representação. Por outro lado, a dificuldade na representação da simbologia tem a ver com a primeira interação dos estudantes com a metodologia de PEPs, onde não se tem um conhecimento do que exatamente é uma corrente principal, secundária ou de dreno.



A Figura 2 apresenta as competências que mais foram desenvolvidas durante a geração de projetos conceituais (FEL 1), segundo as percepções dos próprios estudantes. As dificuldades demonstradas na criação dos documentos são, na maior parte, bem traduzidas no gráfico de competências desenvolvidas, com Metodologia de PEP e Ferramenta CAD no topo (13,0 % e 15,0 %, respectivamente). O conhecimento de conceitos básicos da engenharia química, ficou logo atrás, com 9,0 %. Porém, aqui também surgem as competências em relação ao trabalho em equipe, como Trabalho em Equipe, Liderança e Comunicação (10,0 %, 6,0 % e 5,0 %, respectivamente). Uma categoria que aparece como produto da combinação desses dois fatores é a Adaptabilidade, com 8 %, devido à necessidade de se adaptar a imprevistos tanto na dinâmica da equipe quanto na elaboração do projeto de engenharia. Nota-se também a alta porcentagem da categoria "Outros" (33 %), mostrando que, além das competências mencionadas, os estudantes desenvolveram outras competências-satélites importantes que ainda não haviam tido a oportunidade de aprender.

Figura 2 – Competências desenvolvidas durante a criação do projeto conceitual (FEL 1).



Fonte: Elaboração própria

5. CONCLUSÃO

Demonstrados os documentos de engenharia principais para a fase de projeto conceitual (FEL 1) da planta de MF submersa, culminando no BFD do processo, conclui-se aqui a fase conceitual deste PEP. A partir dos dados obtidos em uma pesquisa inicial, foram criados os documentos pertinentes à fase de concepção do projeto, de forma a idealizar uma metodologia para cumprir o objetivo inicial: recuperar catalisador de um efluente industrial líquido. Além disso, foi demonstrado como o aprendizado se desenvolve ao decorrer desta fase do projeto.

O próximo passo a ser dado é iniciar a fase seguinte: o projeto básico (FEL 2). Nessa fase, o objetivo será especificar o equipamento a ser utilizado para performar as operações definidas no projeto conceitual, bem como representar as principais malhas de controle que foram citadas na tabela de processos. Para tal, além de revisar todos os documentos da FEL 1 aqui apresentados, novos tipos de documentos serão criados, tais como: Lista de Equipamentos do FEL 2, Fluxograma de Processo (*Process Flow Diagram*, PFD); diferentes Memórias de Cálculo (de balanço de massa e energia; de tanques; de bombas; de soprador; e da microfiltração submersa); Lista de Equipamentos Preliminar; Memorial

Descritivo de Processo; e Análise Econômica. Assim, o projeto deixa de ser algo conceitual, idealizado, e passa a tomar uma forma mais concreta, um passo mais próximo de sair do papel.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI/ISA-5.1-2009**: Instrumentation Symbols and Identification. North Carolina: ANSI/ISA, 2009.
- CHENG, R.; LIU, Z.; ZHONG, L.; HE, X.; QIU, P.; TERANO, M.; EISEN, M. S.; SCOTT, S. L.; LIU, B. Phillips Cr/silica catalyst for ethylene polymerization. **Advances in Polymer Science**, vol. 257, p. 135–202, 2013. DOI 10.1007/12_2013_222.
- CONSELHO NACIONAL DE EDUCAÇÃO/ CÂMARA DE EDUCAÇÃO SUPERIOR. **Parecer CNE/CES n°: 1/2019**: Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Graduação em Engenharia. Brasília: CNE/CES, 2019.
- DA SILVA, M. E. L. S. M.; DE CARVALHO, R. B. Definition of Preliminary Data of Process to Construction of Engineering Drawings: Application in the Elutriation Process. **I Congresso Brasileiro em Engenharia de Sistemas em Processos**, 2020.
- DE CARVALHO, R. B.; COELHO, D. B. Recuperação e concentração de particulado da indústria de catalisador. **Revista Hydro**, Junho 2014, Nº 92, p 46-51, 2014.
- HILAL, N.; OGUNBIYI, O. O.; MILES, N. J.; NIGMATULLIN, R. Methods employed for control of fouling in MF and UF membranes: A comprehensive review. **Separation Science and Technology**, vol. 40, no. 10, p. 1957–2005, 2005. <https://doi.org/10.1081/SS-200068409>.
- JERGEAS, G. **Improving Construction Productivity on Alberta Oil and Gas Capital Projects**. University of Calgary, 1–56 f., 2009 Available at: <https://vdocuments.net/improving-construction-productivity-5652f8208617e.html?page=3>. Accessed on: 24 April. 2022.
- KAMINSKY, W.; SINN, H. Methylaluminoxane: Key component for new polymerization catalysts. **Advances in Polymer Science**, vol. 258, p. 1–28, 2013. DOI 10.1007/12_2013_226.
- LARSEN, A. S. A.; KARLSEN, A. T.; ANDERSEN, B.; OLSSON, N. O. E. Exploring collaboration in hospital projects' front-end phase. **International Journal of Project Management**, vol. 39, no. 5, p. 557–569, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2021.04.001>.
- LUKIN, R. Y.; KUCHKAEV, A. M.; SUKHOV, A. V.; BEKMUKHAMEDOV, G. E.; YAKHVAROV, D. G. Platinum-catalyzed hydrosilylation in polymer chemistry. **Polymers**, vol. 12, no. 10, 2020. DOI 10.3390/POLYM12102174. Available at: www.mdpi.com/journal/polymers.
- MORITA, M.; FLYNN, E. J.; OCHIAI, S. Strategic management cycle: The underlying process building aligned linkage among operations practices. **International Journal of Production Economics**, vol. 133, no. 2, p. 530–540, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.09.003>.
- PALMA, V.; RUOCCO, C.; CORTESE, M.; RENDA, S.; MELONI, E.; FESTA, G.; MARTINO, M. Platinum based catalysts in the water gas shift reaction: Recent advances. **Metals**, vol. 10, no. 7, p. 1–74, 2020. DOI 10.3390/met10070866.
- REIF, O. W. Microfiltration membranes: Characteristics and manufacturing. **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, Berlin, Heidelberg, vol. 98, p. 73–103, 2006. <https://doi.org/10.1007/b104245>.
- SPANGLER, R. C. **Front End Loading (FEL) and Process Engineering Workflow**. University of Kansas, 2004. Available at: <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/939>. Accessed on: 24 April. 2022.
- TAFF, L. M.; BORCHERING, J. W.; HUDGINS, W. R. Estimeetings: Development Estimates and a Front-End Process for a Large Project. **IEEE Transactions on Software Engineering**, vol. 17, no. 8, p. 839–849, 1991. <https://doi.org/10.1109/32.83918>.
- TOWLER, Gavin P., SINNOT, Ray K., **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design**, 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
- VERMEIREN, W.; GILSON, J. P. Impact of zeolites on the petroleum and petrochemical industry. **Topics in Catalysis**, vol. 52, no. 9, p. 1131–1161, 1 Aug. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11244-009-9271-8>.
- WANG, H.; YANG, L.; REMPEL, G. L. Homogeneous hydrogenation art of nitrile butadiene rubber: A review. **Polymer Reviews**, vol. 53, no. 2, p. 192–239, 1 May 2013. DOI 10.1080/15583724.2013.776586.
- ZHANG, C.; CHEN, Y.; CHEN, H.; CHONG, D. Industry 4.0 and its Implementation: a Review. **Information Systems Frontiers**, 07 June 2021. <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10153-5>.

FEL 1: CONCEPTUAL ENGINEERING PROJECT OF A SPURNED CATALYST RECOVERY UNIT FROM INDUSTRIAL EFFLUENTS USING SUBMERGED MICROFILTRATION

Abstract: Due to the new National Curricular Guidelines (NCGs) for undergraduate courses in Engineering highlighting the importance of developing abilities and soft skills rather than learning theory, institutions around the country have been reinventing themselves as they adapt to active learning methodologies based on problem-solving and project developing. Amidst these projects are Process Engineering Projects (PEPs), which came to be as a product of the past industrial revolutions. These projects usually possess extensive and diverse documentation, with different kinds of lists and summaries, all the way to drawings, design bases and datasheets, to make scaling the project possible. Methodologies have been adapted to reduce the risk of major failures and errors during the execution of PEPs, with the most well-known method currently being called Front-End Loading (FEL). Therefore, the present study aims to utilize this methodology to create a PEP based on a microfiltration plant to treat a catalyst industrial effluent in such a way as to recover and return the catalysts to the main process. For this, three phases will have to be developed, with this study exploring the first one: the conceptual engineering project (FEL 1). In this phase, the main questions and premises were defined through the Project Description Table (PDT), which gave inception to the project's Block Flow Diagram (BFD), a simple and shallow representation of how the microfiltration plant should operate. A preliminary material balance was then performed on the process' main lines using the premises defined on the PDT. To wrap up, an initial capital expenditure (CAPEX) estimative was assessed to enable the plant's construction. A connection was established between the methodology and the new NCGs through a questionnaire about difficulties faced and developed competences during FEL 1, that was developed by one of the authors and answered by PUC-Rio students that enrolled in the Chemical Process Project course in 2020 and 2021. It was possible to safely conclude that the most developed competences were proficiency with Computer-Aided Design (CAD) software, PEP methodology knowledge and teamwork, with other competences such as basic engineering concepts, adaptability, leadership, and communication coming up not far behind.

Keywords: Process Engineering Project, Competences, Front-End Loading, Microfiltration, Catalysts, Conceptual Engineering Project, Project Description Table, Block Flow Diagram