

FEL 2.1: CONSTRUÇÃO DA ÁREA GRÁFICA DO FLUXOGRAMA DE PROCESSO DE MICROFILTRAÇÃO SUBMERSA PARA RECUPERAÇÃO DE CATALISADOR DESCARTADO EM UM EFLUENTE INDUSTRIAL

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2022.4049

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

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

Resumo: A microfiltração submersa se apresenta com uma alternativa viável para recuperação de catalisadores, partículas inorgânicas suspensas presentes em efluentes industriais líquidos, gerados nas suas etapas de produção. Os dados para o dimensionamento do processo foram obtidos a partir de trabalhos anteriores desenvolvidos, em operação de planta piloto e no desenvolvimento de um projeto conceitual, seguindo a primeira etapa da metodologia de elaboração de projetos de engenharia Front-End Loading (FEL), na qual foram definidas as principais questões sobre o processo e como a planta deve operada. O presente trabalho tem como objetivo iniciar o desenvolvimento do projeto básico de engenharia da planta, relativo a segunda fase da metodologia FEL (FEL 2). Para tal, foi dado foco no documento mais importante dessa fase: o Fluxograma de Processos (PFD), de forma a auxiliar na descrição do processo como um todo, que também foi feita nesse trabalho. O PFD desenvolvido apresentou 30 correntes, entre as operações de filtração, retrolavagem física, retrolavagem com químicos, limpezas químicas e drenagens. Os controles de pressão via inversores de frequência, presentes nas bombas, foram identificados como as malhas de controle principais do processo, atuando tanto na operação de filtração como na operação de retrolavagem. Frente às demandas das Novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) dos Cursos de Graduação em Engenharia, estudantes que cursaram a disciplina de Projeto de Processos Químicos nos anos de 2020 e 2021 preencheram um questionário sobre as dificuldades encontradas na construção da área gráfica do PFD. Os resultados mostraram que o maior desafio nessa parte inicial do FEL 2 é, justamente, dar o zoom no processo e detalhá-lo de forma própria, posicionando corretamente equipamentos e instrumentos utilizados, bem com suas respectivas figuras pictóricas.

Palavras-chave: Efluente; Recuperação de Catalisador; Microfiltração Submersa;



FEL 2; Competências; Fluxograma de processos



FEL 2.1: CONSTRUÇÃO DA ÁREA GRÁFICA DO FLUXOGRAMA DE PROCESSO DE MICROFILTRAÇÃO SUBMERSA PARA RECUPERAÇÃO DE CATALISADOR DESCARTADO EM UM EFLUENTE INDUSTRIAL

1. INTRODUÇÃO

A realidade imposta pela implementação atual da engenharia digital na indústria vem demandando necessidades de transformações no ensino de engenharia no nível superior (ZHANG *et al.*, 2021). Em resposta ao teor prático das profissões, as Novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) foram recentemente aprovadas para os Cursos de Graduação em Engenharia pela Resolução CNE/CES nº 02/2019, atualmente em implementação. A Resolução propõe a mudança da concepção da formação com foco pragmático em conteúdo para experiências de aprendizagem que visem o desenvolvimento de competências esperadas nos estudantes. As habilidades em gerenciar, liderar e executar projetos de engenharia são algumas das principais competências desejadas.

Uma das metodologias de projeto de engenharia mais empregada industrialmente é denominada de *Front-End Loading* (FEL), chamada também metodologia dos portões. Na FEL, o projeto de engenharia de plantas industriais desenvolve-se 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 e desenhos de engenharia, cada um com seus objetivos e suas características próprias, com normas pré-estabelecidas para suas construções (ANSI/ISA, 2009; BASSANE *et al.*, 2019; SPANGLER, 2005).

Em trabalhos anteriores, um deles submetido também para o presente evento, foi realizado teste em planta piloto (CARVALHO e COELHO, 2014) e desenvolvida a primeira fase da metodologia FEL: o projeto conceitual (FEL 1). O objeto de estudo foi uma planta de microfiltração (MF) submersa, utilizada para tratar um efluente líquido industrial, recuperando simultaneamente a água tratada, que pode ser reutilizada, e o catalisador, que pode também retornar ao seu processo produtivo.

No projeto conceitual citado foi criado o conjunto inicial de documentos de engenharia, tais como: a Tabela de Processos (TP), o Diagrama de Blocos (*Block Flow Diagram* - BFD), a memória de cálculo do balanço de massa preliminar do processo e a estimativa de investimento fixo inicial da planta (CAPEX).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver os documentos de engenharia iniciais do projeto básico (FEL 2), avançando o maior detalhamento do projeto de engenharia, estabelecido pela metodologia FEL. Os resultados, documentos e desenhos de engenharia elaborados nos trabalhos anteriores servem como base para o desenvolvimento da fase atual do FEL 2.

Por ser uma fase já bem mais robusta e complexa do que o FEL 1, será dado um foco inicial maior para a construção da área gráfica do Fluxograma de Processo (*Process Flow Diagram* – PFD). O processo será descrito de forma detalhada, demonstrando a diferença entre as representações do mesmo processo no BFD e no PFD.

Um objetivo específico é também realizar uma análise das percepções dos estudantes dos quatro períodos, dos anos de 2020 e 2021, da Disciplina de Projeto de Processos Químicos, realizada no último semestre do curso de engenharia química, em relação suas dificuldades encontradas durante a confecção da área gráfica do PFD no Projeto de Engenharia desenvolvido em equipe durante o período.

2. METODOLOGIA

Da documentação presente no FEL 2, o estudo atual explorará o desenho de engenharia que é o documento mais importante para a descrição do processo na fase. O PFD gerado, em questão de suas diferentes áreas, é parcialmente similar ao BFD, contendo as áreas: de documentos de referência; de simbologia; de notas gerais; de revisão; de títulos; de balanços; e gráfica. No entanto, a maioria delas contém mais detalhes e existe uma nova área, denominada de área de equipamentos, onde são listados os equipamentos presentes na área gráfica, com suas quantidades, TAGs e capacidades. Para preencher essa área, é necessário desenvolver as memórias de cálculo dos diferentes equipamentos (bombas, compressores, tanques, vasos, trocadores de calor e tecnologias, MF submersa no nosso caso), com os seus dimensionamentos explicitados nelas, considerando os dados de entradas calculados nos balanços de massa e energia.

Diferentemente da área de balanços do BFD, além do balanço de massa mais detalhado, com dados de vazão, pressão, temperatura e composição das correntes presentes, temos também no PDF o balanço de energia. A tabela adicionada no PFD tem origem nas suas respectivas memórias de cálculo de balanço de massa e energia, um outro documento existente no FEL2. Aqui, dependendo das características do processo, pode-se utilizar ferramentas de modelagem e simulação para realizar todos os cálculos necessários da área de balanços.

Destaca-se que o presente estudo irá focar apenas na elaboração da área gráfica do PFD, permanecendo vazias as áreas de balanços, de documentos de referências, de equipamentos, de revisão e de títulos.

2.1. Simbologia

A simbologia do PFD será bem mais detalhada, contendo figuras pictóricas dos equipamentos e instrumentos utilizados, como: tanques, a tecnologia de MF submersa, bombas, agitadores, inversores, instrumentos transmissores ou indicadores e válvulas. Além disso, o PFD também possui as malhas principais de controle do processo baseadas na TP gerada no FEL 1, que também deverão ser representadas na área de simbologia.

2.2. Notas Gerais

Ocasionalmente também presente no BFD, a área de notas gerais é outra área que aparece somente no FEL 2 para este projeto. Essa área, que fica no lado direito do PFD, geralmente abaixo da área de simbologia, tem como objetivo facilitar o entendimento de uma representação potencialmente ambígua dentro da área gráfica, descrevendo por extenso o que tal representação significa. Por exemplo, ao representar transmissores analíticos, se utiliza a sigla "AT", insuficiente para especificar que tipo de análise está sendo performeda. Sendo assim, utilizar uma nota é essencialmente obrigatório, para descrever que tipo de analisador transmissor está presente no processo.

Ao utilizar esse recurso, deve-se posicionar uma indicação da nota perto da área ou equipamento de interesse na área gráfica, enumerando-a. Então, na área de notas gerais, deve-se descrever a nota indicada de forma a eliminar a ambiguidade presente.

3. RESULTADOS

3.1. ÁREA GRÁFICA DO PFD

Na Figura 1 apresenta-se o PFD da planta de MF submersa utilizada para recuperação de catalisador presente no efluente industrial líquido.

Com relação ao estudo passado, é possível perceber, de forma imediata, a diferença no detalhamento entre os desenhos de engenharia. No BFD representou-se apenas a tecnologia principal do processo, ao redor da qual todas as correntes, os fluídos e diferentes operações a orbitavam. Já agora no PFD representa-se o mesmo processo mais detalhadamente, com os equipamentos que não foram representados no BFD, e demais características, como identificação de instrumentos e malhas principais de controle do processo.

No PFD existe ainda um tagging muito mais abrangente, com as correntes do processo, equipamentos e instrumentos recebendo um TAG para facilitar a sua identificação. Esses TAGs seguem os seus respectivos materiais ao longo de toda a vida útil da planta, estando interligado diretamente com o controle de ativos da indústria. Por exemplo, o tanque TQ-104, entre as seções 2D e 2E da área de grid, é utilizado para preparo da solução de ácido cítrico, usada para limpeza química das membranas de MF, identificada rapidamente pela cor da linha (laranja), bem como várias outras operações da planta.

No equipamento principal, localizado próximo ao centro do fluxograma (MFS-101, seção F5), agora torna-se possível diferenciar as diferentes partes que o compõem: o aerador, o tanque sedimentador e os módulos de MF submersa. No TAG da MFS-101 percebe-se os sufixos A/B/C/D/E/F. Isso indica que temos seis conjuntos independentes de módulos de membranas, chamados normalmente de trens, cada um com 20% da capacidade necessária, com 5 em operação e 1 em limpeza ou *stand-by*. Não é ainda objetivo do PFD detalhar toda a parte hidráulica da planta, com representação de apenas um trem de MFS. Tal detalhamento hidráulico ocorre na elaboração futura do Fluxograma de Engenharia de Tubulação e Instrumentação (*Piping and Instrumentation Diagram - P&ID*).

Nota-se que as correntes em azul, correntes principais da planta, estão posicionadas e numeradas de forma específica para demonstrar como o processo é realizado, que será descrito em detalhes a seguir. O processo de MF submersa funciona com ciclos entre filtração e retrolavagem das membranas. Como pode ser visto do PFD, a retrolavagem utiliza a própria água filtrada produzida, no sentido contrário da filtração. Tal estratégia tem como objetivo minimizar as incrustações próximas à superfície das membranas, garantindo um fluxo de permeado mais estável.

Torna-se possível notar também que existe uma diferença crucial entre o que foi definido inicialmente no projeto conceitual e o que está sendo demonstrado no primeiro documento do projeto básico, que será explicado detalhadamente no item 3.2. Mesmo sendo utilizado como base para elaboração do projeto básico, o maior detalhamento do processo pode levar identificação de erros ou necessidades de ajustes no projeto conceitual, sendo a ação mais apropriada revisar todas as documentações anteriores para manter ambos os projetos alinhados em suas propostas e consistentes nas informações disponibilizadas.

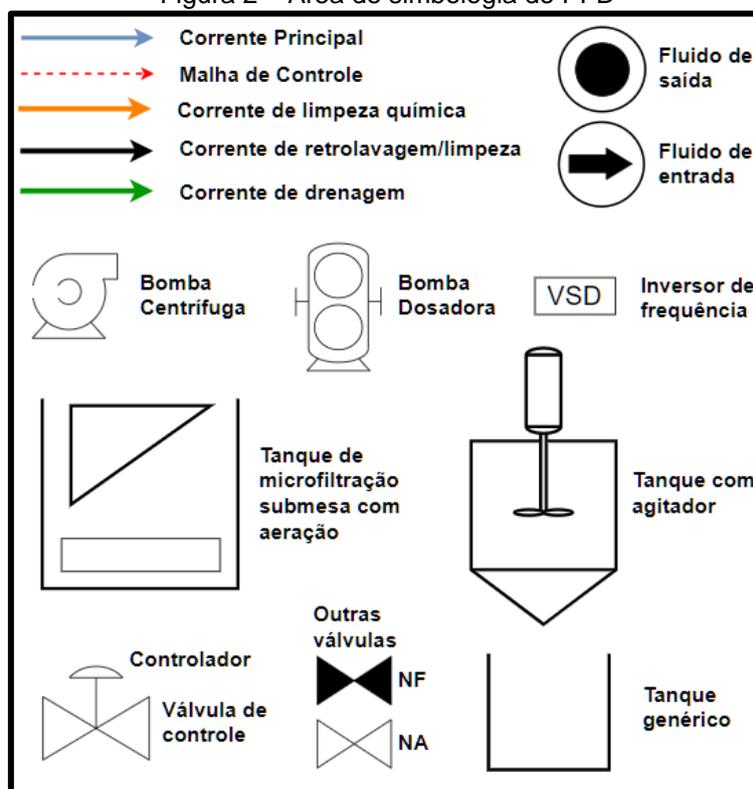
3.2. O processo descrito

Antes de descrever o processo em si, é necessária uma explicação prévia da área de simbologia do PFD, conforme representada em detalhes na Figura 2. Como mencionado anteriormente, a área está muito mais completa, com figuras pictóricas dos equipamentos e instrumentos presentes, bem como a representação das linhas de malha de controle. Aqui objetiva-se ajudar o usuário que realiza a leitura do desenho, facilitando o entendimento da área gráfica e dos seus componentes presentes.

Observa-se, por exemplo, a representação dos conectores de fluídos de entrada e de saída. A necessidade de tais fluídos no processo foi identificada previamente no projeto básico. Na área gráfica esses conectores são alinhados nas extremidades do desenho, com os fluídos de entrada na extremidade esquerda e os fluídos de saída na extremidade direita. Notação que ajuda o rápido entendimento do processo.

Outro exemplo seria a identificação das válvulas NA (normalmente aberta) e NF (normalmente fechada). Tais válvulas seriam aqui meramente ilustrativas, só sendo realmente especificadas e instaladas no P&ID. A posição normal indica o circuito de filtração da MF submersa. Os acionamentos das válvulas NFs seriam feitos nas diferentes operações de retrolavagem, limpeza química e drenagem do processo de MF submersa.

Figura 2 – Área de simbologia do PFD



Iniciando a descrição do processo, armazena-se o efluente bruto contendo catalisador (corrente 1) no tanque pulmão (TQ-101), que tem a função de acomodar flutuações de vazão desse nosso fluido de entrada. A vazão da corrente 1 é medida através do transmissor de vazão presente (FT-101).

Na saída do tanque TQ-101 temos bombas centrífugas (BC-101 A/B/C) que alimentam o efluente bruto nos tanques de membranas (MFS-101 A/B/C/D/E/F). A corrente 2 localiza-se na saída do TQ-101 e entrada das bombas BC-101 A/B/C. Já a corrente 3 sai dessas bombas e entra nos tanques de membranas.

Os sufixos A/B/C presentes nessa primeira bomba do processo indicam que foi adotada no projeto a premissa de 3 bombas, com cada uma possuindo 50% da capacidade necessária. Assim, teremos sempre duas bombas em operação e uma em manutenção/*stand-by*. Veja que na área gráfica do PFD temos representada apenas uma

bomba, pois ainda não seria foco aqui o detalhamento de toda a parte hidráulica do processo, o que só será feito futuramente na construção do P&ID.

Para minimizar as incrustações nas superfícies seletivas das membranas, é injetado ar de processo para promover turbilhonamento no efluente bruto a ser filtrado. Torna-se necessário o controle da vazão desse ar, feito pela malha de controle de vazão (FT-102) via válvula de controle de vazão (FV-101). A corrente 4 de ar localiza-se antes da FV-101, com a corrente 5 de ar sendo depois dessa válvula e na entrada da MFS-101 A/B/C/D/E/F.

Outras bombas à jusante da membrana operam em pressão negativa (BC-102 A/B/C), de forma a garantir a força motriz necessária para a MF submersa, com o efluente tendo contato inicial com a superfície das membranas que possuem poros de 0,1 micrômetro, sendo capaz de reter, por diferença de tamanho, todos os sólidos suspensos presentes no efluente líquido, com eficiência de 99,99% na remoção do catalisador de interesse.

Na corrente 6, a água tratada gerada sai das membranas e entra nas bombas de filtração BC-102 A/B/C. Verifica-se uma válvula NA nessa corrente 6 e outra válvula NF nas correntes 13 e 16, o que garante o bombeamento da água tratada pelas bombas de filtração.

A água tratada segue para um tanque de processo (TQ-102), identificando-se a corrente 7, localizada na saída das bombas BC-102 A/B/C e entrada do TQ-102. A vazão da água tratada é medida pelo transmissor de vazão FT-103. Realiza-se o controle da pressão de filtração (PT-101) através dos inversores de frequência (VSD-101 A/B/C) presentes nos motores das bombas BC-102 A/B/C. Tais bombas e inversores, por possuírem os sufixos A/B/C, possuem as mesmas características da BC-101 A/B/C, com 3 equipamentos presentes, dois em operação e um em *stand-by* ou manutenção.

Observa-se, na saída do TQ-102, as bombas BC-103 A/B, que realizam a distribuição da água tratada produzida, tendo o fluido de saída de permeado. Essas bombas são acionadas pelo nível do tanque, representados futuramente com detalhes no P&ID. Mede-se a vazão da água tratada pelo transmissor de vazão FT-104.

Temos as correntes 8 e 9 do PFD localizadas antes e depois das BC-103 A/B. Os sufixos A/B dessas bombas indicam a presença de duas bombas, cada uma com 100% da capacidade necessária, com uma em operação e outra em manutenção/*stand-by*.

O catalisador recuperado, retido pela MF submersa, na forma de uma solução concentrada, é retirado pelo fundo dos tanques de membranas (MFS-101 A/B/C/D/E/F). As bombas centrifugas BC-104 A/B realizam o bombeamento do catalisador recuperado de volta ao seu processo produtivo, pelo fluido de saída de concentrado. Temos as correntes 10 e 11 do PFD localizadas antes e depois das BC-104 A/B. A vazão da corrente de catalisador recuperado (FT-105) é controlada pelos inversores de frequências (VSD-102 A/B) presentes nos motores das bombas BC-104 A/B.

Ao longo do tempo de operação, deposições mais severas, que não podem ser minimizadas somente através da aeração, tendem a diminuir constantemente o fluxo permeado da água tratada produzida, o que prejudica o processo. Assim, é necessária uma etapa para uma ação adicional para prevenir essa redução de fluxo, denominada de retrolavagem. Essa etapa consiste em alimentar água tratada no sentido contrário ao fluxo da filtração normal.

Para que tal operação de retrolavagem ocorra, a válvula NA da corrente 6 deve ser fechada e a válvula NF das correntes 13 e 16 deve ser aberta. A retrolavagem é realizada pelas bombas centrífugas BC-105 A/B, que utilizam a água filtrada do TQ-102 (corrente 12), alimentando os módulos de membranas, no sentido contrário da filtração, pela corrente 13.

Mede-se a vazão da corrente de retrolavagem pelo transmissor de vazão FT-106. Realiza-se o controle da pressão de retrolavagem (PT-102) através dos inversores de frequências (VSD-103 A/B) presentes nos motores das bombas BC-105 A/B. Igualmente ao descrito anteriormente, os sufixos A/B indicam que temos duas BC-105 e dois VSD-103, um conjunto em operação e outro em manutenção/*stand-by*.

Essa etapa de retrolavagem dura poucos instantes, com o equipamento operando em ciclos de filtração, na ordem de minutos, e de retrolavagem, na ordem de segundos. Na operação automatizada, inicialmente, todos os trens de membranas operam filtrando, com uma defasagem entre eles. Entra-se um trem de membranas por vez para a realização da retrolavagem, o segundo só entrando ao final da retrolavagem do primeiro. Sendo, assim, sucessivamente, até a realização da retrolavagem do quinto trem de membranas, quando os cinco trens voltam a operar conjuntamente em filtração. Na futura representação do P&ID necessita-se adicionar válvulas automatizadas que possibilitem os ciclos de filtração/retrolavagem desejados.

Aqui se encontra a diferença crucial previamente citada, entre o projeto conceitual e o início do projeto básico, diferentemente do que foi proposto inicialmente no BFD. Para uma maior flexibilidade operacional, visando aumentar as estratégias de limpeza das membranas, a etapa de retrolavagem neste PFD deve utilizar, além da operação física de retrolavagem descrita acima com água, uma retrolavagem com adição de ácido cítrico. Para tal, utiliza-se o mesmo caminho hidráulico citado para a retrolavagem física, só que agora com as correntes laranjas ativas, com entrada de solução concentrada de hipoclorito pela corrente 14, e a retrolavagem sendo feita pela corrente 16.

Observa-se, na Figura 1, que as correntes 17, 18, 19 e 20 são de drenagem dos diferentes tanques de processo: TQ-101, TQ-102, TQ-103 e MF-101 A/B/C/D/E/F. Todas essas correntes de drenagem são encaminhadas para o fluído de saída de dreno de efluente frio. Para acionamento das drenagens basta abrir as válvulas NFs presentes em cada corrente citada. As correntes de drenagens têm suas correntes indicadas no a cor verde no PFD.

Finalmente, após alguns ciclos de retrolavagem, essa etapa passa a não ser eficaz o bastante, sendo necessário então isolar um dos trens de membrana e colocar em operação o trem de membrana que estava em *stand-by*. Esse trem isolado passará pelas etapas de limpezas sequenciadas: drenagem do tanque; enxague inicial com água; limpeza química; e enxague final.

Antes de começar, é necessário drenar o efluente presente nos tanques do trem de membranas em limpeza, que segue para o dreno de efluente frio. Essa operação, assim como todas as outras nesta etapa, ocorre com intervenção manual do operador. Após o enxague inicial com água, drena-se novamente os tanques do trem de membranas em limpeza e inicia-se a operação de limpeza química, operação principal da etapa. É ela que vai limpar as deposições mais profundas e regenerar a membrana quase que por completo. Assim como na retrolavagem com químicos, é importante monitorar o pH da solução de entrada na membrana, de forma a evitar danos por acidez excessiva. Finalizada essa

operação, os tanques do trem de membranas em limpeza são drenados, porém através de outra linha, a de dreno químico (corrente 29). Esse dreno geralmente segue para uma última etapa de tratamento antes do seu descarte ou reaproveitamento e possui tubulação com material específico para lidar com o químico em questão, no caso, ácido cítrico. Isso acontece devido ao perigo de danificação da tubulação dedicada ao efluente frio, além da possível contaminação de solos ou águas próximas, uma grande preocupação ambiental atualmente. Após a drenagem dos químicos, é feito um enxague final, novamente com água, seguido de nova drenagem, dessa vez para a linha de efluente frio. Nesse caso, apesar de ainda haver presença de ácido cítrico da etapa anterior, ele está muito diluído para alterar de forma significativa a acidez da solução, sendo então seguro descartá-lo através da linha comum de efluente frio. Após todas essas etapas de limpezas, o trem de membranas fica em *stand-by*, pronto para entrar em operação, caso outro trem de membranas entre em limpeza química.

Para enchimentos dos tanques do trem de membranas em limpeza, tanto com água como com solução de ácido cítrico, observa-se a utilização do tanque TQ-103 e das bombas centrífugas BC-106 A/B. O ácido cítrico é fornecido na forma sólida, o que requer um agitador (AG-101) e um tanque (TQ-104) para o preparo da solução concentrada, adicionada, via bomba dosadora (BD-101 A/B), na linha da bomba BC-106 A/B. O tanque TQ-104 deve ser drenado para a linha de dreno de químico (corrente 30).

Na Figura 3 mostra-se um detalhe da área de notas gerais do PFD. Percebe-se aqui todos os analisadores transmissores (AT) utilizados no processo, conforme notas 1, 2, 3 e 4 presentes na área gráfica; Os analisadores de turbidez das correntes de efluente bruto, efluente tratado (água) e catalisador concentrado são utilizados para fechamento do balanço de massa do processo, sendo indicador da eficiência de remoção da MF submersa. Já o analisador de pH é utilizado para monitoramento da solução de limpeza química das membranas de MF submersa.

Figura 3 – Área de Notas Gerais do PFD

NOTAS GERAIS
Nota 1: Analisador/Transmissor de turbidez do efluente não tratado
Nota 2: Analisador/Transmissor de turbidez do efluente tratado
Nota 3: Analisador/Transmissor de turbidez do catalisador concentrado
Nota 4: Analisador/Transmissor de pH da corrente de limpeza que entra na membrana

Geralmente, a descrição do projeto como realizada acima se encontra em um documento da fase de projeto detalhado (FEL 3) da planta, denominado memorial descritivo de processo final. Porém, esse documento possui mais informações sobre as malhas de controle e intertravamento do processo, que estão disponíveis somente no P&ID, fluxograma gerado no FEL 3.

3.3. Discussão: Dificuldades Encontradas

De forma similar ao FEL 1, as dificuldades encontradas na geração da área gráfica do PFD estão apresentadas na Tabela 1. Essas informações foram obtidas em avaliações 360 feitas com os estudantes que cursaram a disciplina de Projeto de Processos Químicos, nos anos de 2020 e 2021, sendo apresentadas por períodos cursados. Nos períodos de 2020.1 e 2020.2, 11 estudantes cursaram a disciplina, enquanto 15 estudantes cursaram os períodos de 2021.1 e 2021.2. Adicionalmente, observa-se a possibilidade de se relatar mais de uma dificuldade por estudante, logo o total de citações tende a superar o número total de estudantes que cursaram a disciplina em cada período.

Nessa tabela, diferentes partes da área gráfica e da simbologia foram representadas de forma individual. Por exemplo, "Detalhamento" diz respeito às figuras pictóricas e ao posicionamento de novos equipamentos, linhas e instrumentos que não estavam mostrados no BFD anteriormente. O item "Malhas de controle" está relacionado aos sistemas principais de controle representados no PFD. "Múltiplos PFDs" representa o fato de que somente uma área gráfica não oferece espaço o bastante para representar o processo inteiro no FEL 2, em algumas situações, o que leva a dificuldades na organização das etapas. "Conhecimento" engloba a necessidade de conhecer mais sobre bombas, válvulas e outros equipamentos/instrumentos para poder realizar o PFD e, finalmente, "Ferramenta CAD (Computer-Aided Design)" define o *software* utilizado para gerar o PFD.

Tabela 1: Dificuldades encontradas pelos estudantes na construção da área gráfica do Fluxograma de Processos do projeto básico (FEL 2).

Dificuldades PFD	2020.1	2020.2	2021.1	2021.2	TOTAL
Detalhamento	3	5	8	6	22
Ferramenta CAD	5	1	3	3	12
Malhas de controle	2	4	0	4	10
Tagueamento	1	0	3	3	7
Múltiplos PFDs	1	0	2	2	5
Conhecimento	0	1	1	0	2
Trabalho em equipe	0	0	1	0	1
Sem dificuldades	3	2	2	2	9
TOTAL	15	13	20	20	68

É possível perceber, nessa tabela, que as únicas dificuldades citadas por estudantes de todos os períodos são: "Detalhamento" e "Ferramenta CAD", além de serem também as dificuldades com o maior número total de citações. Entretanto, a dificuldade em detalhar o PFD é citada quase o dobro de vezes, sendo a mais citada em 3 dos 4 períodos avaliados. Isso demonstra que o maior desafio na construção do PFD é dar um *zoom* nas etapas descritas previamente no FEL-1, se utilizando da competência de visão segmentada, para posicionar equipamentos e instrumentos no processo com as figuras pictóricas correspondentes.

Com menos citações totais do que no FEL 1, o *software* utilizado para o PFD vem se tornando mais fácil de utilizar, apesar de ainda ser uma das principais dificuldades citadas, tomando o primeiro lugar no período de 2020.1. Apesar disso, a tendência é

que esse número diminua ainda mais no FEL 3, conforme os estudantes ganham prática com a ferramenta.

A introdução de malhas de controle dentro do PFD, por sua vez, proporcionou outro grande desafio para os estudantes, por demandar extenso conhecimento de instrumentação, que possui uma disciplina disponível, porém não obrigatória ainda no currículo de Engenharia Química atualmente. Inclusive, é interessante notar que o nível de dificuldade encontrado pelos estudantes tem relação inversa com o nível de frequência nas aulas de Instrumentação. Por exemplo, nenhum estudante citou ter dificuldades em determinar as malhas principais de controle do processo no período de 2021.1, tendo a maioria já cursado a matéria de Instrumentação previamente.

Em comparação ao BFD no FEL 1, percebe-se que o número de estudantes que não citaram nenhuma dificuldade caiu 40 %, de 15 para 9, demonstrando o salto de complexidade na geração da área gráfica do PFD. Vale lembrar que isso não inclui a geração das memórias de cálculo de balanço de massa e de dimensionamento de equipamentos, que também fazem parte do PFD. Nesse caso, a tendência é que o número caia mais ainda no FEL 3, onde ocorre a geração do P&ID e memoriais descritivos de processo e de controle.

4. CONCLUSÃO

Foi possível desenvolver a primeira parte do projeto básico (FEL 2), dedicando a sua elaboração à construção da área gráfica do PFD, com simbologia e notas gerais representadas, bem como uma descrição mais detalhada do processo, com representação dos equipamentos através de suas figuras pictóricas próprias, identificação das malhas de controle principais e realização das numerações das correntes de processo presentes.

Foram apresentadas e discutidas também as dificuldades encontradas pelos estudantes ao decorrer da construção da área gráfica do PFD, com maiores números de citações a dificuldade no "Detalhamento" do desenho e no uso de "Ferramenta CAD.

Os passos futuros serão dar prosseguimento ao FEL 2, com elaboração das memórias de cálculo de balanço de massa e energia, dimensionamento dos equipamentos e definição das suas capacidades, de forma a finalizar com a geração do PFD completo e a análise econômica da planta.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI/ISA-5.1-2009**: Instrumentation Symbols and Identification. North Carolina: ANSI/ISA, 2009.

BASSANE, B. C.; ANTUNES, M. R.; VILANI, C.; CARVALHO, R. B. Projeto conceitual e análise econômica preliminar do processo de pervaporação para recuperação do aroma do suco de abacaxi. In: VOIGT, C. L. (coord.). **Impacto das Tecnologias na Engenharia Química 2**. Ponta Grossa: Atena, 2019. Cap. 29., p. 257-273.

CONSELHO NACIONAL DE EDUCAÇÃO/ CÂMARA DE EDUCAÇÃO SUPERIOR. **Parecer CNE/CES nº: 1/2019**: Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Graduação em Engenharia. Brasília: CNE/CES, 2019.

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.

SPANGLER, R. C. **Front End Loading (FEL) and Process Engineering Workflow**. University of Kansas, 2004. Available in <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/939>.

Access in: 22 de abril de 2022.

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 2.1: CONSTRUCTION OF THE GRAPHIC AREA OF THE SUBMERSE MICROFILTRATION PROCESS FLOW DIAGRAM FOR THE RECOVERY OF DISPOSED CATALYST IN AN INDUSTRIAL EFFLUENT

Abstract: *Submerged microfiltration is presented as a viable alternative to recover catalysts, inorganic particles present in liquid industrial effluents, generated during the production stages. Process dimensioning data was obtained from previous works, which operated a pilot plant and developed a conceptual project, following the first stage of the engineering project execution method, Front-End Loading (FEL), which defined the main points about the process and how the plant should operate. The objective of this work is to initiate the next stage of this methodology (FEL 2) which involves the development of the basic project of the plant. For that, more attention was given to the most important document in this stage: the Process Flow Diagram (PFD). To aid the description of the process from head to tail, which was also done in this work. The developed PFD had 30 lines, between the filtration, backwashing, chemical backwashing, chemical cleaning-in-place operations and draining lines. Pressure control via variable speed drives, present in pumps, were identified as the process' main control circuits, acting on the main operations: filtration and backwashing. Regarding the New National Syllabus Guidelines (NSG) for undergraduate courses in Engineering, students that enrolled in the Chemical Process Project course in the years of 2020 and 2021 filled in a questionnaire about difficulties faced during the creation of the PFD. Results showed that, indeed, the biggest challenge of this document is being able to properly zoom into the process' details, correctly positioning necessary equipment and instrumentation with their corresponding figure representations.*

Keywords: *Effluent; Catalyst Recovery; Submerged Microfiltration; FEL 2; Competences; Process Flow Diagram*