



APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PBL EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS: UM ESTUDO DE CASO DA SEPARAÇÃO DE ÓLEO-ÁGUA UTILIZANDO HIDROCICLONE EM PLATAFORMAS OFFSHORE DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5235

Autores: ROBERTO BENTES DE CARVALHO, MARIA CLARA DE CARVALHO AGUIAR

Resumo: O presente trabalho utilizou a metodologia de Aprendizagem Baseada em Projetos (Project-Based Learning - PBL) na unidade curricular de Operações Unitárias do curso de graduação em Engenharia Química. As diretrizes curriculares de Engenharia de 2019 incentivam uma formação abrangente que combina competências técnicas e habilidades humanas aos engenheiros em formação. Metodologias ativas, como o PBL, são essenciais para alinhar a educação às demandas do mercado. O problema apresentado para resolução durante o período foi o tratamento de água oleosa produzida na extração de óleo e gás em plataformas offshore. O projeto envolveu várias etapas, desde a identificação da operação unitária que resolve o problema apresentado (hidrociclone) até a elaboração de documentos e desenhos de engenharia, como: tabela de processo; diagrama de blocos; memória de cálculo de balanços de massa preliminar; memória de cálculo do hidrociclone; e folha de dados do hidrociclone. Os resultados incluem o reconhecimento da operação unitária e a especificação do processo de separação óleo-água, o dimensionamento do hidrociclone com base em vazão, tamanho de partículas e eficiência de separação, além da identificação do modelo mais eficiente de hidrociclone. O hidrociclone do tipo Rietma foi o mais adequado, necessitando de vinte e um equipamentos em paralelo para alcançar a eficiência desejada. Conclui-se que houve sucesso na aplicação da metodologia PBL, com a familiarização dos estudantes com documentos de engenharia e processos reais de separação de óleo-água, além do desenvolvimento de habilidades práticas e teóricas necessárias para os futuros engenheiros.

Palavras-chave: Hidrociclone, Separação Óleo-água, Aprendizagem Baseada em Projetos, DCNs.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PBL EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS: UM ESTUDO DE CASO DA SEPARAÇÃO DE ÓLEO-ÁGUA UTILIZANDO HIDROCICLONE EM PLATAFORMAS OFFSHORE DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

1 INTRODUÇÃO

As recentes Diretrizes Curriculares para o ensino de Engenharia, aprovadas em 2019, propõem uma abordagem abrangente e integrada na formação, visando não apenas a capacitação técnica, mas também a construção de um cidadão-engenheiro plenamente inserido na sociedade. Além das competências técnicas, destacam-se habilidades humanas e sociais, como comunicação eficaz, colaboração em equipes multidisciplinares, liderança, capacidade de lidar com contextos complexos e a disposição para aprendizado contínuo (CNE/CES nº 1/2019).

É notável uma mudança de foco em direção ao desenvolvimento de competências, substituindo a tradicional abordagem de assimilação de conteúdo para posterior aplicação. A ênfase não se limita apenas ao "como fazer", derivado da absorção de conhecimentos, mas também ao "porquê fazer", relacionado à aplicação desses conhecimentos em contextos específicos (Souza *et al.*, 2015). Conforme a definição de competência por Silveira (2005), essa capacidade implica mobilizar saberes, habilidades, aptidões e atitudes para resolver desafios em situações específicas.

Apesar dessas orientações, algumas instituições de ensino ainda resistem à adaptação, mantendo uma abordagem conteudista em que o professor detém todo o conhecimento e o aluno atua como mero receptor. Uma pesquisa encomendada pela CNI/SENAI e IEL indica que os engenheiros formados no Brasil carecem de habilidades demandadas pelo mercado, como empreendedorismo, gestão, comunicação, liderança e trabalho em equipes multidisciplinares (IEL, 2006). Este descompasso entre os valores acadêmicos e as expectativas do mercado é evidente.

Silva e Tonini (2018) argumentam que tanto o mercado de trabalho quanto a sociedade buscam indivíduos que tenham incorporado diversos saberes: saber pensar, fazer, ser e agir, tornando-se aptos a enfrentar desafios cotidianos. Nesse contexto, as metodologias ativas desempenham um papel crucial, proporcionando dinamismo e autonomia no aprendizado por meio de atividades práticas e solução de problemas interdisciplinares.

Uma metodologia em ascensão é o ensino baseado em projetos, conhecido como *Project Based Learning* (PBL). Segundo Ribeiro *et al.* (2005), tal metodologia envolve a abordagem de problemas complexos para estimular o desenvolvimento do pensamento crítico e habilidades de resolução de problemas. Essas estratégias pedagógicas buscam alinhar o ensino de Engenharia às demandas contemporâneas, capacitando os futuros profissionais para os desafios do mercado e promovendo uma formação mais holística e adaptável.

Em disciplinas cruciais, como de Operações Unitárias, obrigatórias na grade curricular do curso de Engenharia Química, a complexidade dos temas surge da necessidade de compreensão profunda e integrada das bases que envolvem diversos processos industriais. Cada processo é singular, exigindo uma integração extensa de princípios e conceitos provenientes de disciplinas como termodinâmica, transferência de massa, transferência de calor, balanço de massa e energia, cinética química, mecânica dos fluidos, entre outras.

A completa compreensão dessas disciplinas, frequentemente categorizada conforme tipos de processos e grupos de conhecimentos, é fundamental para os processos industriais na Engenharia Química. As operações unitárias abrangem as etapas individuais nas quais a matéria-prima é transformada nos produtos desejados, sendo essenciais para o projeto, otimização e operação de unidades industriais. Vale ressaltar que cada Operação Unitária permanece a mesma, independentemente da natureza química dos componentes envolvidos e da indústria onde está sendo aplicada.

É crucial destacar a distinção entre Processo e Operação Unitária, conforme Cremasco e Hofsetz (2014). Um Processo envolve diversas etapas realizadas em unidades específicas, chamadas de unidades de processo, cada uma com um fluxo de entrada e saída de material. Por outro lado, o conceito de Operação Unitária, explicitado por Arthur Dehon Little em 1915, refere-se a uma etapa básica, como transferência de calor, transferência de massa, transporte de gases, líquidos e sólidos, filtração, destilação, cristalização, evaporação, secagem, armazenamento, entre outras.

Em uma abordagem educacional, a metodologia PBL foi aplicada em uma turma de Dimensionamentos de Equipamentos, com ênfase em Operações Unitárias II no Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial, no Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil no Rio de Janeiro (SENAI CETIQT/RJ). Essa categoria específica abrange conhecimentos aplicados a processos mecânicos, como moagem, peneiramento, filtração e separação de sólidos e fluidos por força centrífuga.

Neste trabalho, foi desenvolvido o dimensionamento completo de um hidrociclone para aplicação na separação de óleo-água em plataformas *offshore* de produção de petróleo, chamada do inglês FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). Iniciou-se desde a identificação do equipamento e operação unitária adequada ao processo de separação dos fluidos até a avaliação final das famílias de hidrociclone dimensionadas mais adequadas conforme eficiência de separação.

Na implementação do PBL, os estudantes da turma foram individualmente responsáveis para solução de um problema específico, proporcionando uma abordagem diversificada para cada tipo de operação unitária a ser aplicada. Esses processos foram propostos pelo professor, que atuou como mediador, seguindo a abordagem proposta por Harun *et al.* (2012). Essa metodologia enfatiza a importância do professor como facilitador, promovendo a motivação dos estudantes por meio de projetos contextualizados, claros em seus propósitos e com aplicações práticas e reais. Essa abordagem estimulou a busca por conhecimentos variados e promoveu a comunicação efetiva dentro da turma.

2 MOTIVAÇÃO– HIDROCICLONE EM SEPARAÇÃO DE ÓLEO RESIDUAL EM ÁGUA PRODUZIDA

O projeto desenvolvido para a Operação Unitária de separação de frações de óleo em água por meio de um hidrociclone foi uma abordagem prática e aplicada para lidar com um desafio comum na indústria do petróleo. O objetivo principal deste projeto foi projetar e dimensionar um hidrociclone para ser utilizado em um FPSO, onde a água produzida, um subproduto do processo de extração de petróleo, precisa ser separada do óleo de forma eficiente e econômica, para que possa ser reutilizada para reinjeção no poço ou descartada conforme parâmetros ambientais.

A metodologia adotada no projeto envolveu diversas etapas, estruturadas e interligadas. Primeiramente, foi apresentado o problema a ser resolvido: *remoção de óleo*

residual insolúvel presente na água produzida em plataformas flutuantes de produção de petróleo, previamente tratada por separação convencional água-óleo e por eletrocoagulação.

A estudante, coautora do presente trabalho, identificou a operação unitária que resolveria o problema apresentado, destacando-se o papel crucial do hidrociclone nesse contexto. Em seguida, foi elaborada uma tabela de processo detalhada, contendo informações completas sobre a operação unitária de hidrociclone, incluindo princípio de funcionamento, características operacionais, especificações técnicas e requisitos de desempenho e de dimensionamento.

Com base nos dados da tabela de processo, foi elaborado um diagrama de blocos ilustrativo do processo, proporcionando uma representação visual clara e detalhada das operações e correntes principais presentes na operação unitária. Após a identificação das correntes presentes, realizou-se o balanço de massa, onde são desenvolvidas planilhas e memórias de cálculo para quantificar e caracterizar os fluxos de entrada e saída do sistema, garantindo assim a eficiência e a precisão do projeto.

O dimensionamento do hidrociclone foi uma etapa central do projeto, onde foram determinadas as especificações necessárias para o equipamento, levando em consideração parâmetros como vazão, tamanho das partículas a serem separadas e eficiência de separação requerida. Por fim, foram elaboradas folhas de dados técnicos contendo informações relevantes sobre o hidrociclone projetado, incluindo características construtivas, capacidades operacionais e requisitos de manutenção. As etapas do projeto foram:

1. Apresentação do problema a ser resolvido;
2. Identificação da operação unitária para resolver o problema;
3. Elaboração da tabela de processo detalhada;
4. Criação do diagrama de bloco ilustrativo do processo;
5. Identificação das correntes principais do processo;
6. Realização do balanço de massa com desenvolvimento das memórias de cálculo;
7. Dimensionamento do hidrociclone;
8. Busca e seleção no mercado do equipamento projetado;
9. Elaboração da folha de dados utilizando o equipamento selecionado como modelo de referência.

3 RESULTADOS

3.1 Reconhecimento da Operação Unitária

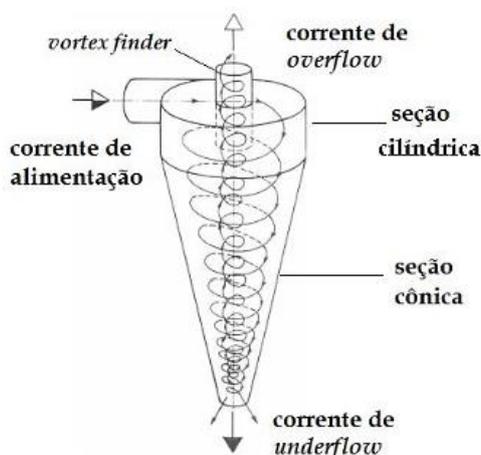
A água produzida em plataformas de produção de petróleo é presente nos reservatórios de óleo e gás natural e é trazida à superfície junto com o petróleo para que possa ser tratada para reinjeção no poço ou descarte limpo ao mar, conforme padrões regulatórios nas resoluções prescritas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente CONAMA. No caso do descarte em corpos receptores o limite é de até 20 mg/L de teor de óleo e graxas (TOG) na água produzida, em acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 (CONAMA, 2005). Para o descarte em plataformas *offshore* de petróleo, são aplicadas as diretrizes estabelecidas pela Resolução CONAMA 393/2007, o teor médio mensal de TOG não pode exceder 29

mg/L, com um valor máximo permitido diário de 42 mg/L. Quanto à injeção em poços de petróleo, a água utilizada deve conter, no máximo, 5 mg/L de TOG (CONAMA,2007).

Com base nisso, o processo de tratamento consiste em separações convencionais com tanques separadores água-óleo, seguido pelo processo de eletrocoagulação, em sequência faz-se uso de hidrociclones para a separação efetiva do óleo residual na água produzida, e como polimento final flotação com ar dissolvido.

Os hidrociclones são equipamentos que em razão da força centrífuga atuam na separação de misturas sólido/líquido, sólido/sólido, líquido/líquido e gás/líquido, em destaque a líquido/líquido. Sua estrutura, em geral compacta, é constituída por uma parte cilíndrica, que define o diâmetro do hidrociclone, acoplada a uma parte cônica em razão ao movimento do fluido representado na Figura 1 (Murthy & Bhaskar, 2012).

Figura 1: Representação do hidrociclone



Fonte: Adaptado Svarovsky,1984.

A entrada de corrente de alimentação pressurizada é introduzida na parte superior cilíndrica do equipamento de forma tangencial, a água junto ao óleo. Isso gera uma força centrífuga que cria um movimento em espiral descendente, levando a fase mais densas em direção à parede, onde são coletadas através do orifício de *underflow*, como a água. Ao mesmo tempo, um segundo vórtice central ascendente se forma, arrastando a fase menos densas para o duto central superior de *overflow*, como o óleo.

3.2 Tabela de Processo

Para obter um aprendizado aprofundado em dada Operação Unitária atrelada à metodologia PBL, o passo seguinte foi a obtenção de características primordiais inerentes ao equipamento e processo de separação. Com isso, montou-se uma tabela de processos para organização e armazenamento com conjunto de informações mais importantes relacionadas ao hidrociclone e sua função na separação do óleo residual em água produzida em plataformas do tipo FPSO, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Tabela de Processo para tratamento da água produzida em hidrociclone.

Nome da Operação Unitária aplicada para?	Hidrocloração
Operação unitária de separação ou reação?	<p>Separção Água Produzida com Óleo Residual</p> <p>O funcionamento do hidrocloração é baseado nas diferenças nas forças centrífugas experimentadas pelas partículas com base em suas características, como tamanho e densidade. Partículas maiores e mais densas tendem a ser direcionadas para a saída do underflow, enquanto partículas menores e menos densas são direcionadas para a saída do overflow. Isso permite que o hidrocloração separe as partículas sólidas da suspensão líquida, resultando em uma fração mais densa e uma fração mais fina.</p> <p>Força Centrífuga</p> <p>Óleo residual</p> <p>Água Produzida livre de óleo residual</p> <p>100 mg/L (Valores em análise Anexo I)</p> <p>2000 mg/L (Valores em análise Anexo I)</p> <p>Acima de 90%, a depender das concentrações de óleo em água na entrada.</p> <p>OBS.: Apesar da alta eficiência, o sistema hidrocloração não produziu uma água com concentrações de óleo desejada pelo CONAMA (2008), fazendo-se necessário um tratamento adicional, como membrana cerâmica.</p> <p>Drenagem</p> <p>Vazão de Alimentação, Pressão de Entrada e Saída Diâmetro de Entrada (D), Diâmetro do Underflow (d), Ângulo da parte cônica do hidrocloração (Conicidade), Densidade e Viscosidade dos fluidos</p> <p>Controle de Nível, Temperatura, (Ateta densidade e viscosidade), Pressão de Alimentação e Saída, Eficiência de Separação (análise das frações de underflow e overflow)</p>
Princípio de Funcionamento?	<p>Determinação do teor de óleos e graxas (TOG).</p> <p>A leitura da concentração foi realizada diretamente no espectrofotômetro. Em presença de clorofórmio</p> <p>Vazão de Entrada (F) e Pressão (P)</p> <p>Sensores de firme de pressão</p> <p>Processo: Contínuo e Automatizado. Limpeza: Automática ou Manual</p> <p>Os hidroclorones podem operar em PARALELO ou SÉRIE em presença de outros, instalados em vertical ou horizontal. A capacidade de cada um será reação a faixa de operação conforme as vazões de entrada de cada e o tipo de associação</p> <p>O hidrocloração é um equipamento utilizado para separar partículas sólidas ou líquidos de diferentes densidades de um fluxo de líquido utilizando a força centrífuga gerada pelo movimento rotativo do líquido dentro do ciclone.</p>
Força motriz?	<p>Água Produzida livre de óleo residual</p>
Quais os solutos que deseja-se após a reação ou separação permaneça no fluido de saída da operação unitária? A operação unitária pode ser aplicada até que limite de concentração mínima dos solutos presentes? A operação unitária pode ser aplicada até que limite de concentração máxima dos solutos presentes?	<p>Água Produzida livre de óleo residual</p>
Qual a eficiência típica da operação unitária? - eficiência é em termos da alteração de concentração deseja	<p>Acima de 90%, a depender das concentrações de óleo em água na entrada.</p>
Qual a recuperação típica da operação unitária? - recuperação é em termos da relação de vazões de entrada e saída da	<p>Acima de 90%, a depender das concentrações de óleo em água na entrada.</p>
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da operação unitária?	<p>Vazão de Alimentação, Pressão de Entrada e Saída Diâmetro de Entrada (D), Diâmetro do Underflow (d), Ângulo da parte cônica do hidrocloração (Conicidade), Densidade e Viscosidade dos fluidos</p>
Quais as principais variáveis que devem ser monitoradas e controladas na operação unitária?	<p>Controle de Nível, Temperatura, (Ateta densidade e viscosidade), Pressão de Alimentação e Saída, Eficiência de Separação (análise das frações de underflow e overflow)</p>
Quais as técnicas analíticas que melhor representam as composições dos fluidos da operação unitária?	<p>Determinação do teor de óleos e graxas (TOG).</p> <p>A leitura da concentração foi realizada diretamente no espectrofotômetro. Em presença de clorofórmio</p>
Quais são as malhas de controle principais da operação unitária? Caso existam, quais são as malhas de intertravamento necessárias na operação unitária? Operação contínua ou em batelada? Manual ou automatizada?	<p>Vazão de Entrada (F) e Pressão (P)</p> <p>Sensores de firme de pressão</p> <p>Processo: Contínuo e Automatizado. Limpeza: Automática ou Manual</p> <p>Os hidroclorones podem operar em PARALELO ou SÉRIE em presença de outros, instalados em vertical ou horizontal. A capacidade de cada um será reação a faixa de operação conforme as vazões de entrada de cada e o tipo de associação</p>
Para operação contínua, deve ser previsto mais de um trem operando? Quantos serão escolhidos? Com que capacidade?	<p>Os hidroclorones podem operar em PARALELO ou SÉRIE em presença de outros, instalados em vertical ou horizontal. A capacidade de cada um será reação a faixa de operação conforme as vazões de entrada de cada e o tipo de associação</p>
Qual a operação principal da operação unitária em estudo?	<p>Água Produzida livre de óleo residual</p>
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	<p>Água produzida sem óleo residual e Óleo residual (2 saídas)</p>
Na operação unitária existe operação secundária ou de limpeza? Quais?	<p>Uma das maiores qualidades do hidrocloração é não apresentar a necessidade de limpeza periódica, pois opera sem maiores dificuldades. O único caso a ser necessário a limpeza é após um longo período de tempo de atividade, podendo ser limpo os dutos de entrada com resquícios de óleo e a ENTRADA de jato para limpeza no overflow</p> <p>Resquícios de Óleo em pequeno percentual de água residual no equipamento</p> <p>Óleo residual diluído no solvente para descarte</p> <p>Drenagem periódica</p>
Quais as correntes da operação unitária presentes na operação secundária ou de limpeza? Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?	<p>Na operação principal, separação em si, não há químicos. Apenas água e óleo</p>
Quais as correntes da operação unitária presentes na operação não contínua ou de limpeza? Quais os produtos químicos utilizados na operação principal? Quais as concentrações desses produtos químicos?	<p>Uma possível aplicação de Isopropil Álcool (Solvente comumente usado para limpeza industrial. É menos tóxico do que alguns outros solventes e é eficaz para dissolver óleos e resíduos).</p>
Quais os produtos químicos utilizados na operação secundária ou de limpeza? Quais as concentrações desses produtos químicos?	<p>I. O descarte de água produzida deve obedecer a concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L. Por outro lado, não vinculado a legislação acima, esta água será utilizada para reinjeção em poços de petróleo, se possuir no máximo 5 mg/dm³ de óleos e graxas.</p> <p>II. O tratamento da água produzida, feito no convés das unidades de produção, utilizando estes equipamentos, implica no uso de vasos de grande volume e peso em uma área em que a disponibilidade de espaço é crítica, principalmente com o crescente aumento da capacidade de produção por unidade, aumentando ainda mais a necessidade da realização de atividades com menor grau de impacto ambiental.</p> <p>III. Densidade do Óleo característico do campo influencia diretamente na eficiência da separação, em relação ao grau API</p>
Alguma outra informações que considere relevante ser destacada?	

Fonte: Autoria Própria

O preenchimento da tabela de processo foi essencial para o conhecimento geral da operação unitária, conforme princípios e premissas básicas a serem adotadas. Estas informações em conjunto foram fundamentais para o andamento do projeto em sala de aula e desenvolvimento das etapas seguintes.

Nas perguntas representadas em azul estão os termos básicos para entendimento do funcionamento, como a força motriz da operação unitária e seus fluidos principais. Em verde, os termos bibliográficos, aqueles que necessitam de aprofundamento em acordo

com limitações da operação e performance de operação. Em rosa, as informações condizentes as malhas de controle e intertravamento para mitigação de possíveis riscos do processo. Por último, em laranja, questionamentos mais aprofundados em envolvimento a ênfases de funcionamento, operações secundárias, paradas, limpeza e os fluidos de entrada, intermediários e de saída.

Também como componente importante na Tabela de Processo, temos as condições de entrada e saída das correntes no hidrociclone, apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. As informações das correntes foram considerações de acordo com a literatura disponível sobre o programa de descomissionamento da FPSO situada na bacia Cidade de Santos (PETROBRAS, 2023).

Tabela 1: Corrente de Entrada (Água Produzida + Óleo) no hidrociclone

Variáveis	Valores Entrada
Pressão (bar)	8,29
Temperatura (°C)	55-75
Vazão volumétrica (m³/h)	83,30
Composição de óleo (g/L)	10

Fonte: Autoria Própria

Tabela 2: Corrente de Saída (*Underflow* – Água Produzida e *Overflow* - Óleo) no hidrociclone

Variáveis	Valores <i>Underflow</i>	Valores <i>Overflow</i>
Pressão (bar)	8,29	8,29
Temperatura (°C)	55-75	55-75
Vazão volumétrica (m³/h)	79,20	4,20
Composição de óleo (g/L)	0,5	190,5

Fonte: Autoria Própria

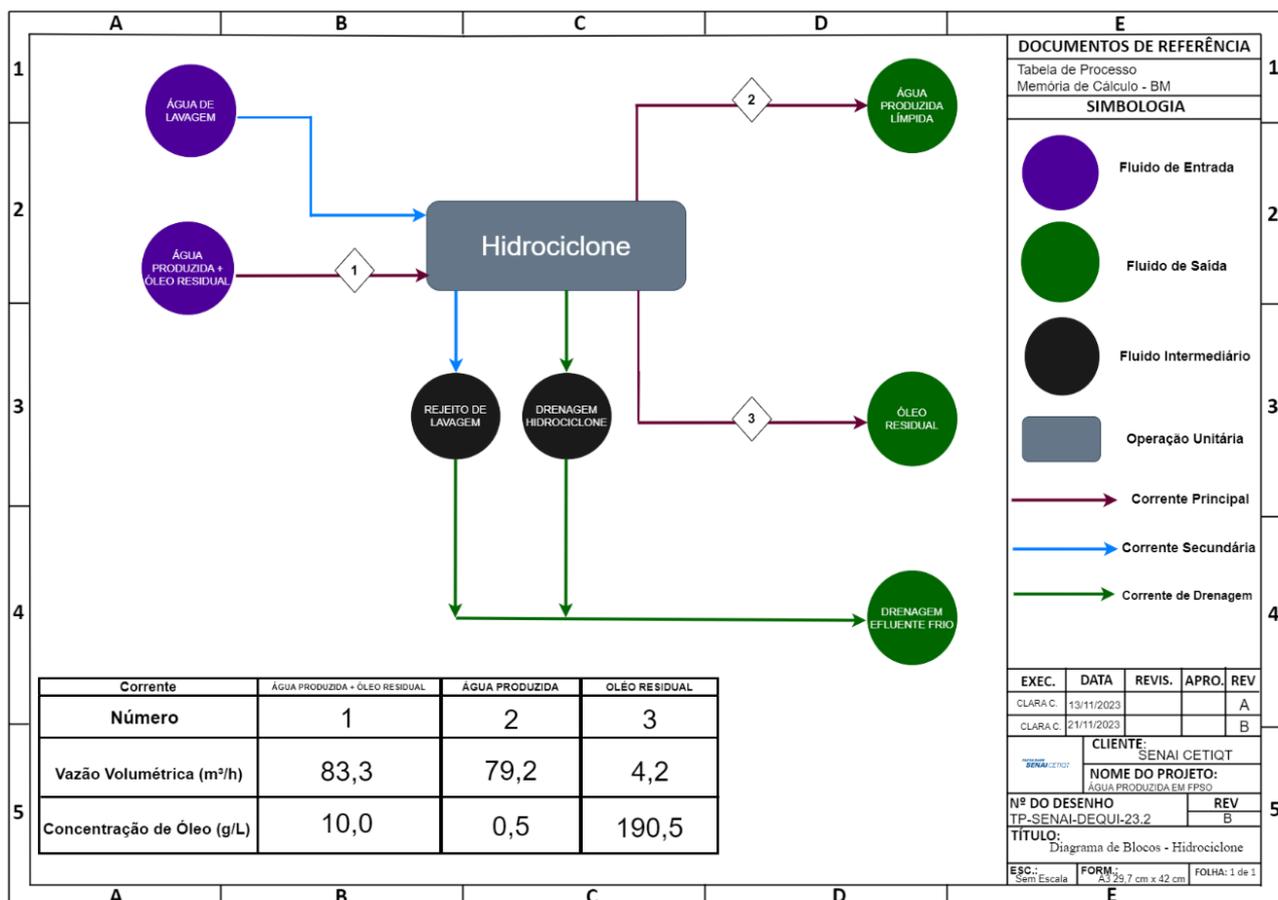
3.3 Diagrama de Blocos

A representação visual simplificada do processo (BFD, *Block Flow Diagram*) é dada em conhecimento as entradas e saídas da operação unitária, de forma prática e compreensiva direta, com base na tabela de processos. Para o funcionamento coerente em prol do tratamento da água produzida previamente tratada por separadores água-óleo e eletrocoaguladores com percentual de óleo residual, fez-se necessário o entendimento das ligações e blocos, em que cada bloco representa uma função específica, as conexões indicam uma relação e as ligações em setas, bem como os fluidos de entrada, intermediários e de saída.

Em termos teóricos, as correntes e a operação unitária são representadas em seções horizontais intermediárias, fluidos de entrada à esquerda e fluidos de saída à direita. No geral, o BFD é uma amostragem direta das etapas e componentes identificados na tabela de processo e relatórios técnicos, conforme as correntes principais, secundárias e de limpeza do equipamento (Figura 2).

Como pode ser observado na Figura 2, temos três correntes na operação principal do hidrociclone: o fluido de entrada de água produzida + óleo residual; os fluidos de saída de água produzida límpida e o óleo residual recuperado. Tais correntes foram numeradas para servirem de referência para o balanço de massa.

Figura 2 – Diagrama de blocos do hidrociclone para separação do óleo residual presente na água produzida.



Fonte: Autoria Própria

Observa-se ainda na Figura 2 que existem correntes secundárias/de limpeza e de drenagem. O fluido de entrada de água de lavagem realiza a limpeza do hidrociclone, gerando o fluido intermediário de rejeito de limpeza que é encaminhado por operação de drenagem para o fluido de saída de drenagem de efluente frio. O fluido intermediário de drenagem do hidrociclone é encaminhado também para o fluido de saída de drenagem de efluente frio.

3.4 Memória de Cálculo do Balanço de Massa Preliminar

Para o balanço de massa preliminar, fundamento importante para conhecimento quantitativo das correntes de entrada e saídas enumeradas, foram utilizadas premissas para a obtenção dos valores de correntes de saída e suas respectivas composições. Como premissa base, a vazão de produção de água produzida por dia em uma FPSO corresponde à 2000 m³/dia em uma eficiência operacional do hidrociclone para separação do óleo de 95%, sendo 10 g de óleo em 1 L de água produzida. (PETROBRAS,2023)

Assim, foi admitida a corrente de entrada no hidrociclone, óleo residual em água produzida, como 83,33 m³/h. Com isso, a partir da relação linear de entrada e saída como vazões iguais, foi possível calcular as vazões de saída como 79,17 m³/h de água produzida no *underflow* com 0,5 g/L de óleo e 4,17 m³/h de óleo no *overflow* com 190,5 g/L, tendo em conta a relação da eficiência operacional com a concentração de óleo inicial. (Cremasco e Hofsetz, 2014)

A Tabela 3 abaixo apresenta essas relações de vazões e composições para as diferentes correntes de processo. Presentes na parte inferior da área gráfica do BFD com valores aproximados, representado no Figura 2 no tópico 3.3.

Tabela 3 – Balanço de massa preliminar do hidrociclone

Corrente	1	2	3
Descrição	Água Produzida + Óleo	Água Produzida Límpida	Óleo Residual
Vazão volumétrica (m ³ /h)	83,33	79,17	4,17
Concentração de óleo (g/L)	10	0,5	190,5

Fonte: Autoria Própria

3.5 Memória de Cálculo do Hidrociclone

Como parte da metodologia de ensino, a etapa principal para o desenvolvimento da linha de aprendizado aplicado ao projeto foram os cálculos para dimensionamento do equipamento, conforme dados analisados e obtidos nas etapas anteriores. A fim de analisar o resultado para aquele que possuísse o menor valor de concentração de óleo na saída de água ($C_{V,U}$) e, preferencialmente, o menor número de hidrociclones em paralelo (n) para a realização do serviço desejado, visto a restrição de espaço e peso dos FPSO. Dividiu-se a análise de acordo as famílias de hidrociclone: Brandley, Rietma e CBV DEMCO 4H, em que cada uma obedece a mesma metodologia de dimensionamento, porém parâmetros e relações geométricas distintos (Foust, 1982).

Os dados de entradas foram considerados fixos para convergência das análises, dentre eles, principalmente: vazão total de entrada 83,33 m³/h (Q_T) e percentual de óleo de 1% presente no alimentado (C_V). Para fins de simplificação, destacam-se como pontos principais calculados: razão de fluido em relação a previsão de performance (R_f); vazão suportado por cada hidrociclone conforme modelo (Q); número de hidrociclones em paralelo (n); diâmetro interno (D_i); eficiência total (E_T) e concentração em percentual de óleo no *underflow* ($C_{V,U}$).

A Tabela 4 apresenta o conjunto de valores obtidos como resultado para cada modelo de hidrociclone estudado. Com base nos resultados, apesar de constar o menor número de hidrociclones em paralelo (n), igual a 5, o modelo CBV DEMCO 4H porém, apresenta uma concentração de óleo ($C_{V,U}$) na saída de água igual a 31,74%. Dentre os modelos com melhores eficiências de separação (E_T), os hidrociclones das famílias Brandley e Rietma apresentaram 90,43% e 91,01%, respectivamente. O modelo Rietma apresentou vinte e um hidrociclones em paralelo, enquanto a família Brandley apresentou trinta e um. Em conhecimento aos parâmetros e relações geométricas de cada família de equipamentos, além dos menores custos de instalação e operação de equipamentos, determinou-se como melhor modelo o hidrociclone da família Rietma.

Tabela 4 – Análise de resultados para cada família de hidrociclone.

Parâmetros	Brandley	Rietma	CBV DEMCO 4H
Eficiência total (E_T - %)	90,43	91,01	89,51
Hidrociclones em paralelo (n)	31	21	5
Vazão por hidrociclone (Q - m ³ /h)	2,74	4,02	17,92
Concentração de óleo na saída de água ($C_{v,u}$ - %)	7,94	5,44	31,74

Fonte: Autoria Própria

3.6 Folha de Dados do Hidrociclone

Após a análise dos resultados quantitativos e qualitativos obtidos nas etapas anteriores, foram identificadas as informações essenciais para o preenchimento de uma folha de dados. Essas informações são fundamentais para orientar a busca no mercado e a compra do equipamento, levando em consideração os atributos técnicos necessários. Na folha de dados são detalhados aspectos como: especificações técnicas, capacidades de operação, requisitos de instalação e manutenção, além de características específicas relacionadas ao processo de tratamento da água produzida, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Modelo preenchido para valores conforme modelo Rietma.

TÍTULO		RESERVADO	
FOLHA DE DADOS – HIDROCICLONE ÁGUA PRODUZIDA E ÓLEO RESIDUAL			
TAG	HC-001 A/B/C/D/E/F/G/H/I/J/L/M/N/O/P/Q/R/S/T/U/V		
SERVIÇO	Hidrociclone para separação do Óleo Residual em Água Produzida		
LINHA	AKW VORTEX - RWS TYPE		
CLASSIFICAÇÃO ÁREA(IEC)	Não Classificada		
CONDIÇÕES INICIAIS			
TIPO	Modelo em estilo Família <i>Rietma</i>		
VAZÃO DE ENTRADA POR HIDROCICLONE	4,016 m ³ /h		
DIMENSÕES IMPORTANTE			
Diâmetro de Alimentação (Di)	4,475 cm		
Diâmetro de Seção Cilíndrica (Dc)	15,982 cm		
Diâmetro do Ápex = Saída Overflow (Di)	1,5 cm		
Diâmetro do Vórtex = Saída Underflow (Do) *	5,434 cm		
Comprimento (L) *	79,91 cm		
Ângulo de Seção Cilíndrica (Θ) *	15-20°		
MATERIAL	Poliuretano de alta resistência, óxido ou SiC cerâmica e titânio		
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO			
FLUIDO	ESTADO FÍSICO	Água Produzida com Óleo Residual	Líquido-Líquido
VAZÃO NORMAL(MÁX.)	2,4-7,6 m ³ /h		
TEMP. NORMAL(PROJETO)	55-75°C		
PRESSÃO ENTRADA NORMAL(MÁX.)	8,29 bar		
PRESSÃO SAÍDA NORMAL(MÁX.)	8,29 bar		
PERDA DE CARGA	3 bar		
REFERÊNCIAS			
FABRICANTE	AKW – Equipment + Process Design		
MODELO:	RWS 105		

Valores com * = Obtidos a partir de relações atribuído a família de Hidrociclone específica

Fonte: Autoria Própria

É importante destacar que os valores e critérios utilizados para a escolha do modelo final do equipamento estão diretamente relacionados às condições operacionais e aos requisitos

específicos do processo de tratamento da água produzida. Esses critérios são cuidadosamente considerados, especialmente levando em conta a instalação em uma embarcação do tipo FPSO, onde as condições de operação são únicas e demandam soluções adequadas às características do ambiente marítimo. Assim, a folha de dados desempenha um papel essencial no processo de seleção e aquisição do equipamento, garantindo que as necessidades operacionais e técnicas sejam atendidas de maneira eficiente.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos foi possível concluir que:

- Aplicou-se, com sucesso, a metodologia PBL para projetar a solução do problema apresentado no início do período da disciplina de dimensionamento de equipamentos;
- O trabalho realizado utilizou dados reais de um FPSO para separação entre água e óleo dos efluentes líquidos gerados no processo, possibilitando familiarização do estudante com os documentos e desenhos de engenharia desenvolvidos normalmente em projetos de engenharia;
- A Tabela de Processo possibilitou obter conhecimento prévio sobre a operação unitária de hidrociclone, identificada como solução do problema de separação água-óleo da água produzida em FPSO na extração de óleo e gás;
- O Diagrama de Blocos apresentou a visão macroscópica da operação unitária de hidrociclone, indicando os fluídos e operações envolvidas;
- Os quantitativos de vazão e composição das correntes principais do hidrociclone foram obtidos na Memória de Cálculo de Balanço de Massa Preliminar;
- Rietma foi o melhor modelo de hidrociclone encontrado nos cálculos da Memória de Cálculo da Operação Unitária, sendo necessários vinte e um hidrociclones em paralelo para realização do serviço desejado e com uma eficiência de remoção do óleo residual igual a 91,01%;
- A Folha de Dados do hidrociclone foi confeccionando, gerando as informações necessárias para a sua futura cotação e compra.

REFERÊNCIAS

CONSELHO NACIONAL DE EDUCAÇÃO/ CÂMARA DE EDUCAÇÃO SUPERIOR. Parecer CNE/CES n°: 1/2019, de 23 de janeiro de 2019. Brasília, DF. **Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em engenharia**. Disponível em <http://portal.mec.gov.br/docman/marco-2019-pdf/109871-pces001-19-1/file>. Acesso em: 01 de julho de 2020.

CREMASCO, A.; HOFSETZ, K. **Operações e processo unitários: balanço material sem reação química**. Campinas, 2014.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípios de Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982

HARUN, N.F.; YUSOF, K.M.; JAMALUDIN, M.Z.; HASSAN, S.A.H.S. **Motivation in Problem-based Learning Implementation**. Procedia-Social and Behavioral Sciences, v.56, p.233-242, 2012.

IEL, Instituto Euvaldo Lodi. Núcleo Nacional. **Inova engenharia: propostas para a modernização da educação em engenharia no Brasil**. Brasília: IEL.NC/SENAI.DN, 2006.

Murthy, Y.R.; Bhaskar, K.U.; Parametric CFD studies on hydrocyclone, Powder Technology, 2012.

RIBEIRO, Luis Roberto de Camargo. **A aprendizagem baseada em problemas (PBL): uma implementação na educação em engenharia na voz dos autores**. 2005. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Educação. Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/2353/TeseLRCR.pdf>. Acesso em: 14 jan.2021.

SILVA, J.C.; TONINI, A.M. **O processo educativo baseado em problemas e a formação de competências do engenheiro**. R. Bras. Ens. Ci. Tecnol, Ponta Grossa, v.11, n.3, p.364-385, 2018.

SILVEIRA, Marcos Azevedo da. **A formação do engenheiro inovador: uma visão internacional**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2005.

SOUZA, A.P.A.; DELAMARO, M.C.; SALGADO, A.M.P.; CAMPOS, A. A valorização das competências na formação e na atuação de engenheiros: A visão de estudantes de uma instituição pública. **Revista de Ensino de Engenharia**, v.34, n.2, p.19-30, 2015.

SVAROVSKY, L. Hydrocyclone, Holt, Rinehart & Winston, Eastbourne, UK, 1984. 198p.

APPLICATION OF THE PBL METHODOLOGY IN UNIT OPERATIONS: A CASE STUDY OF OIL-WATER SEPARATION USING HYDROCYCLONES IN OFFSHORE OIL PRODUCTION PLATFORMS

Abstract:

The present work utilized the Project-Based Learning (PBL) methodology in the Unit Operations course of the Chemical Engineering undergraduate program. The 2019 Engineering curriculum guidelines encourage comprehensive training that combines technical competencies and human skills for engineering students. Active methodologies, such as PBL, are essential to align education with market demands. The problem presented for resolution during the period was the treatment of oily water produced in oil and gas extraction on offshore platforms. The project developed individually involved several stages, from identifying the unit operation that solves the presented problem (hydrocyclone) to the elaboration of engineering documents and drawings, such as: process table; block diagram; preliminary mass balance calculation; hydrocyclone calculation; and hydrocyclone data sheet. The results include the recognition of the unit operation and the specification of the oil-water separation process, the sizing of the hydrocyclone based on flow rate, particle size, and separation efficiency, in addition to identifying the most efficient hydrocyclone model. The Rietma-type hydrocyclone was the most suitable, requiring twenty-one pieces of equipment in parallel to achieve the desired efficiency. It is concluded that the application of the PBL methodology was successful, with the development of a solution to the presented problem and with the co-author student of this work becoming familiar with engineering documents and real oil-water separation processes, in addition to developing the practical and theoretical skills necessary for future engineers.

KEYWORDS: Hydrocyclone, Oil-Water Separation, Project-Based Learning, Chemical Engineering, DCNs.

