\documentclass[a4paper, 12pt]{report}

\usepackage[utf8]{inputenc}

\usepackage{amsmath}

\usepackage{amssymb}

\usepackage{graphicx}

\usepackage{subcaption}

\usepackage{authblk}

\usepackage[portuguese]{babel}

\usepackage{indentfirst}

\usepackage{hyperref}

\usepackage{float}

\usepackage{booktabs}

\usepackage{makecell}

\usepackage{pgfplots}

\usepackage{pgfplotstable}

\usepackage{siunitx}

\usepackage{titlesec}

\usepackage{geometry}

\usepackage{array}

\usepackage{multirow}

\usepackage{fancyhdr}

\usepackage{colortbl}

\usepackage{pgf-pie}

\usepackage{filecontents}

\usepackage{pdflscape}

\usepackage{adjustbox}

\usepackage{pdfpages}

\usepackage{eso-pic}

\usepackage{tikz}

\usepackage{caption}

\usepackage{xurl}

\usepackage{tocloft}

\pgfplotsset{compat=newest}

\setcounter{tocdepth}{3} % Inclui subsubsections no índice

\setcounter{secnumdepth}{3} % Garante que subsubsections sejam numeradas

\pagestyle{fancy}

\fancyhf{}

\rfoot{\thepage}

\renewcommand{\headrulewidth}{0pt} % Remove a linha horizontal do cabeçalho

% Define as margens usando o pacote geometry

\geometry{

top=2.5cm, % margem superior

bottom=2.5cm, % margem inferior

left=2.5cm, % margem esquerda

right=2.5cm % margem direita

}

% Redefine a numeração das seções para incluir o capítulo como nível superior

\renewcommand\thesection{\arabic{section}}

\renewcommand\thesubsection{\thesection.\arabic{subsection}}

\renewcommand\thesubsubsection{\thesubsection.\arabic{subsubsection}}

% Personaliza a numeração das seções

\titleformat{\section}[block]{\normalfont\Large\bfseries}{\thesection}{1em}{}

\titleformat{\subsection}[block]{\normalfont\large\bfseries}{\thesubsection}{1em}{}

\begin{document}

\pagestyle{empty}

\begin{titlepage}

\begin{center}

% Logo and department (side by side images)

\begin{minipage}{0.45\textwidth}

\centering

\vspace{0.5cm}

\includegraphics[width=0.8\textwidth]{NOVA.png}

\hspace{0.5cm} % Adicione espaço horizontal para ajustar a posição

\end{minipage}

\begin{minipage}{0.45\textwidth}

\hspace{0.5cm} % Adicione espaço horizontal para ajustar a posição

\centering

\includegraphics[width=0.8\textwidth]{fct.png} % Adicione aqui o nome do segundo ficheiro de imagem

\end{minipage}

\vspace{1cm} % Espaço entre as imagens e o texto abaixo

\textbf{DEPARTAMENTO DE QUÍMICA}\\

\textbf{NOVA SCHOOL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY}\\[2cm]

% Title

\Huge

\textbf{BTX + Tolueno para Benzeno}\\[2cm]

% Authors

\Large

\textbf{Bernardo Fraga, 55139}\\

\textbf{Bernardo Ribeiro, 63836}\\

\textbf{Miguel Milheiro, 61545}\\

\textbf{Sofia Pereira, 63416}\\

\textbf{Tomás Reis, 67198}\\[2cm]

% Project details

\textbf{Projeto Integrador em Engenharia Química e Biológica}\\[1cm]

% Advisors

\textbf{Orientador:} João Miranda\\

\textbf{Co-Orientadores:} Mário Eusébio, Alexandre Paiva, Luísa Neves\\

\vfill

% Submission date

\Large

Data de submissão: 21 de junho de 2024\\

2023/2024

\end{center}

\end{titlepage}

\section\*{}

\newpage

\begin{tikzpicture}[remember picture,overlay]

\node[anchor=south east, xshift=-1cm, yshift=5cm] at (current page.south east) {

\parbox{12cm}{ % Ajuste a largura da caixa de texto conforme necessário

\raggedleft

\Large % Aumenta o tamanho da fonte

\textit{“Work expands so as to fill the time available for its completion.”}\\

\textit{C. Northcote Parkinson}

};

};

\end{tikzpicture}

\newpage

\section\*{}

\newpage

\section\*{Agradecimentos}

Queremos expressar o nosso sincero agradecimento a todos os que colaboraram e se esforçaram no desenvolvimento deste projeto. Sem o vosso empenho e dedicação, não teríamos alcançado o sucesso obtido.

Agradecemos aos professores responsáveis pela cadeira pelo seu apoio e orientação ao longo deste trabalho.

Um agradecimento especial ao nosso orientador, Professor João Miranda Reis, pela sua orientação valiosa e disponibilidade para esclarecer as nossas dúvidas ao longo deste processo. Gostaríamos também de agradecer à Professora Luísa Neves pela sua incansável ajuda no manuseamento da ferramenta Aspen Plus; sem o seu apoio, não teríamos superado os desafios dos dimensionamentos.

Por fim, mas não menos importante, expressamos a nossa profunda gratidão aos nossos familiares, amigos e a Deus pelo apoio e incentivo constante ao longo do desenvolvimento deste projeto.\\

Obrigado a todos pela vossa colaboração e apoio.

\newpage

\section\*{}

\newpage

\section\*{Sumário Executivo}

O presente relatório inclui uma análise detalhada do mercado para os componentes BTX (benzeno, tolueno e xileno), a escolha da tecnologia para a sua produção e a seleção da região mais adequada para a instalação de uma nova fábrica, bem como a definição da sua capacidade instalada. Além disso, foi realizada uma planificação técnica e económica para a implementação da nova unidade industrial.

Em 2023, o consumo mundial de benzeno e p-xileno atingiu 56,4 Mton e 59,6 Mton, respetivamente. Entre 2012 e 2023, verificou-se um crescimento constante do consumo nas quatro grandes regiões: Europa, China, Ásia (exceto China) e Estados Unidos da América. A Ásia (exceto China) lidera em volume de exportações, enquanto a China é a maior importadora devido à sua subprodução.

Os xilenos, uma mistura de orto-xileno, meta-xileno e para-xileno, são amplamente utilizados na indústria química. A mistura comercial contém principalmente m-xileno (40-65\%), além de o-xileno, p-xileno, etilbenzeno e tolueno. Estes são essenciais na produção de PTA e PET, no melhoramento da octanagem da gasolina, e na produção de borracha, pesticidas, solventes e revestimentos. Aproximadamente 65-70\% dos xilenos são usados como solventes em tintas e vernizes. O p-xileno representa 86\% do consumo total de xilenos devido à sua importância na produção de PTA e PET. O m-xileno é utilizado principalmente na produção de ácido isoftálico e xilidinas, enquanto o o-xileno é usado na produção de anidrido ftálico. O benzeno é crucial na fabricação de estireno, ciclohexano e cumeno, utilizados na produção de plásticos, fibras sintéticas, nylon e resinas fenólicas.

Entre os licenciadores do processo, destacam-se o HoneyWell UOP, Axens e Lummus Technology. A Reforma Catalítica de Nafta com Regeneração Contínua do Catalisador (CCR) da UOP foi identificada como a tecnologia mais eficiente e economicamente viável para a produção de BTX. Para a conversão de tolueno em benzeno, foi escolhido o processo Tatoray da UOP, conhecido pela sua eficiência comprovada.

Com base em previsões de mercado para benzeno e p-xileno, identificámos a China como a região mais favorável para a construção de uma nova fábrica de BTX. Decidiu-se instalar a unidade de produção no parque industrial Zhejiang Petrochemical Daishan Complex, com uma capacidade anual de 250 kton de benzeno. A tecnologia utilizada será licenciada pela UOP.

A fábrica ocupará uma área de 2000 hectares e funcionará 350 dias por ano, 24 horas por dia. A unidade fabril será dividida em cinco secções: a Secção 100 para a produção de BTX via reforma catalítica contínua; a Secção 200 dedicada à extração de aromáticos; a Secção 300 para a separação dos compostos; a Secção 400 para a conversão de tolueno em benzeno via unidade Tatoray; e a Secção 500 para a regeneração do catalisador utilizado na CCR.

Foram dimensionados quatro equipamentos principais: uma coluna de destilação, um reator, um permutador e uma bomba, juntamente com as respetivas tubagens. Também foi realizada uma estimativa dos custos destes equipamentos.

\newpage

% Usar tocloft para ajustar o índice

\renewcommand{\cftsecnumwidth}{2.5em}

\renewcommand{\cftsubsecnumwidth}{3em}

% Desabilitar numeração de página para o índice

\pagestyle{empty}

% Ajustar a posição do índice verticalmente

\vspace\*{-2cm}

\tableofcontents

\newpage

% Habilitar numeração de página após o índice

\pagestyle{fancy}

\setcounter{page}{1}

\section{Especificação dos Produtos}

\begin{table}[H]

\centering

\caption{Propriedades do Benzeno $^{[1]}$}

\begin{tabular}{|c|c|}

\hline

\textbf{Composto} & \textbf{Benzeno} \\

\hline

\textbf{\raisebox{-.5\height}{Estrutura}} & \raisebox{-.5\height}{\includegraphics[width=1.5cm]{benzeno info.png}} \\

\hline

\textbf{Fórmula química} & C$\_6$H$\_6$ \\

\hline

\textbf{Peso molecular (g/mol)} & 78,11 \\

\hline

\textbf{Temperatura de fusão a 1 atm (ºC)} & 5,5 \\

\hline

\textbf{Temperatura de ebulição a 1 atm (ºC)} & 80 \\

\hline

\textbf{Pressão de vapor a 25ºC (mmHg)} & 95,55 \\

\hline

\textbf{Densidade a 25ºC (Kg/dm$^3$)} & 0,874 \\

\hline

\textbf{Viscosidade a 25ºC (cP)} & 0,604 \\

\hline

\textbf{Solubilidade em água a 25ºC (g/L)} & 1,88 \\

\hline

\textbf{Temperatura de autoignição (ºC)} & 498 \\

\hline

\textbf{Tensão superficial a 25ºC (mN/m)} & 28,88 \\

\hline

\textbf{pH} & Não aplicável \\

\hline

\textbf{Cor} & Incolor \\

\hline

\textbf{Odor} & Sem odor \\

\hline

\textbf{Pureza} & $\geq 99\%$ \\

\hline

\textbf{Estado físico} & Líquido \\

\hline

\textbf{Nº CAS} & 71-43-2 \\

\hline

\makecell{\textbf{Classificação de acordo} \\ \textbf{com os critérios UN GHS}} &

\begin{minipage}{6cm}

\centering

\vspace{0.5cm}\includegraphics[width=3.5cm]{benzeno seg.png} \\

\vspace{0.3cm}

\small Líquido e vapores altamente inflamáveis. \\

Pode ser fatal se ingerido e penetrar nas vias respiratórias. \\

Provoca irritação à pele. \\

Provoca irritação ocular grave. \\

Pode provocar defeitos genéticos. \\

Pode provocar cancro. \\

Provoca dano aos órgãos (Sangue) por exposição repetida ou prolongada. \\

Nocivo para os organismos aquáticos, com efeitos prolongados.

\vspace{0.5cm}

\end{minipage} \\

\hline

\end{tabular}

\end{table}

\begin{table}[H]

\centering

\caption{Propriedades do Tolueno $^{[2]}$}

\begin{tabular}{|c|c|}

\hline

\textbf{Composto} & \textbf{Tolueno} \\

\hline

\textbf{\raisebox{-.5\height}{Estrutura}} & \raisebox{-.5\height}{\includegraphics[width=1.5cm]{tolueno info.png}} \\

\hline

\textbf{Fórmula química} & C$\_7$H$\_8$ \\

\hline

\textbf{Peso molecular (g/mol)} & 92,14 \\

\hline

\textbf{Temperatura de fusão a 1 atm (ºC)} & -93 \\

\hline

\textbf{Temperatura de ebulição a 1 atm (ºC)} & 110 \\

\hline

\textbf{Pressão de vapor a 25ºC (mmHg)} & 27,08 \\

\hline

\textbf{Densidade a 25ºC (Kg/dm$^3$)} & 0,865 \\

\hline

\textbf{Viscosidade a 25ºC (cP)} & 0,56 \\

\hline

\textbf{Solubilidade em água a 25ºC (g/L)} & 0,58 \\

\hline

\textbf{Temperatura de autoignição (ºC)} & 536,5 \\

\hline

\textbf{Tensão superficial a 25ºC (mN/m)} & 27,73 \\

\hline

\textbf{pH} & Não aplicável \\

\hline

\textbf{Cor} & Incolor \\

\hline

\textbf{Odor} & Sem odor \\

\hline

\textbf{Pureza} & $\geq 99\%$ \\

\hline

\textbf{Estado físico} & Líquido \\

\hline

\textbf{Nº CAS} & 108-88-3 \\

\hline

\makecell{\textbf{Classificação de acordo} \\ \textbf{com os critérios UN GHS}} &

\begin{minipage}{6cm}

\centering

\vspace{0.5cm}\includegraphics[width=3.5cm]{benzeno seg.png} \\

\vspace{0.3cm}

\small Líquido e vapores altamente inflamáveis. \\

Pode ser fatal se ingerido e penetrar nas vias respiratórias. \\

Provoca irritação à pele. \\

Pode provocar sonolência ou vertigem. \\

Suspeita-se que prejudique o feto. \\

Pode provocar dano aos órgãos (Sistema nervoso central) por exposição repetida ou prolongada, se inalado. \\

Nocivo para os organismos aquáticos, com efeitos prolongados.

\vspace{0.5cm}

\end{minipage} \\

\hline

\end{tabular}

\end{table}

\begin{table}[H]

\centering

\caption{Propriedades do p-Xileno $^{[3]}$}

\begin{tabular}{|c|c|}

\hline

\textbf{Composto} & \textbf{p-Xileno} \\

\hline

\textbf{\raisebox{-.5\height}{Estrutura}} & \raisebox{-.5\height}{\includegraphics[width=1.75cm]{p-xileno info.png}} \\ \hline

\textbf{Fórmula química} & C$\_8$H$\_{10}$ \\

\hline

\textbf{Peso molecular (g/mol)} & 106,17 \\

\hline

\textbf{Temperatura de fusão a 1 atm (ºC)} & 13,2 \\

\hline

\textbf{Temperatura de ebulição a 1 atm (ºC)} & 138,4 \\

\hline

\textbf{Pressão de vapor a 25ºC (mmHg)} & 9,09 \\

\hline

\textbf{Densidade a 25ºC (Kg/dm$^3$)} & 0,856 \\

\hline

\textbf{Viscosidade a 25ºC (cP)} & 0,58 \\

\hline

\textbf{Solubilidade em água a 25ºC (g/L)} & 146 \\

\hline

\textbf{Temperatura de autoignição (ºC)} & 529 \\

\hline

\textbf{Tensão superficial a 25ºC (mN/m)} & 28,01 \\

\hline

\textbf{pH} & Não aplicável \\

\hline

\textbf{Cor} & Incolor \\

\hline

\textbf{Odor} & Doce \\

\hline

\textbf{Pureza} & $\geq 99\%$ \\

\hline

\textbf{Estado físico} & Líquido, claro \\

\hline

\textbf{Nº CAS} & 106-42-3 \\

\hline

\makecell{\textbf{Classificação de acordo} \\ \textbf{com os critérios UN GHS}} &

\begin{minipage}{6cm}

\centering

\vspace{0.5cm}\includegraphics[width=3.5cm]{benzeno seg.png} \\

\vspace{0.3cm}

\small Líquido e vapores inflamáveis. \\

Pode ser fatal se ingerido e penetrar nas vias respiratórias. \\

Nocivo em contacto com a pele ou se inalado. \\

Provoca irritação à pele. \\

Provoca irritação ocular grave. \\

Pode provocar irritação das vias respiratórias. \\

Nocivo para os organismos aquáticos, com efeitos prolongados.

\vspace{0.5cm}

\end{minipage} \\

\hline

\end{tabular}

\end{table}

\newpage

\subsection{Segurança, Transporte e Armazenamento}

Na produção industrial de BTX, a segurança é de extrema importância, exigindo medidas abrangentes em todas as unidades fabris. É essencial fornecer treino adequado para o uso correto dos equipamentos e acesso a equipamentos de segurança em emergências. Devido à inflamabilidade e ao potencial explosivo dos reagentes, medidas de segurança específicas são necessárias para garantir a manutenção e a longevidade dos reagentes armazenados. Para maximizar a segurança, deve-se evitar o uso de chamas ou fontes de ignição próximas aos equipamentos e áreas de armazenamento, armazenar produtos e reagentes em tanques metálicos verticais próximos ao chão em espaços bem ventilados e com controle de temperatura, utilizar sensores de temperatura, pressão e gases inflamáveis, e implementar válvulas de controle de pressão conforme necessário. Além disso, é crucial estabelecer um plano abrangente de higiene e práticas industriais recomendadas, bem como um plano de evacuação em caso de emergência.

\subsubsection{Nafta}

A nafta é um líquido inflamável que, em contacto com uma chama, pode levar à explosão, com um limite de explosividade entre 0,6\% e 6,5\%.$^{[4]}$ em volume. Devido a essa característica, não deve haver chamas ou fontes de ignição próximas ao seu armazenamento ou uso no processo. A extinção de incêndios envolvendo nafta pode ser feita com água em spray, espuma resistente ao álcool, pó ou dióxido de carbono. A inalação de nafta deve ser evitada, pois é tóxica e cancerígena, causando irritações nos olhos e sistema respiratório. A longo prazo, pode afetar o sistema nervoso central e o fígado.

O armazenamento da nafta deve ser realizado em tanques que não excedam 29ºC. $^{[4]}$ Esses tanques devem ser sistemas fechados, separados de oxidantes fortes e protegidos contra corrosão, explosões e incêndios.

O transporte da nafta pode ser feito por vias marítima, terrestre e férrea.

\subsubsection{Hidrogénio}

O hidrogénio é um gás extremamente inflamável que, em contacto com superfícies quentes, pode levar à explosão, com um limite de explosividade entre 4\% e 75\% em volume. Devido a essa característica, não deve haver chamas ou fontes de ignição próximas ao seu armazenamento ou uso no processo. A extinção de incêndios envolvendo hidrogénio pode ser feita com dióxido de carbono ou pó extintor.

O armazenamento de hidrogénio deve ser realizado em tanques que não excedam 50°C. Esses tanques devem ser protegidos contra corrosão, explosões e incêndios, e é essencial instalar válvulas para regular a pressão. $^{[5]}$

O transporte de hidrogénio pode ser realizado por vias férrea, marítima e aérea, devendo estar comprimido.

\subsubsection{Benzeno}

O benzeno é um líquido inflamável que, em contacto com chamas, pode levar à explosão, com um limite de explosividade entre 1,2\% e 8,0\% em volume. Devido a essa característica, não deve haver chamas ou fontes de ignição próximas ao seu armazenamento ou uso no processo. A extinção de incêndios envolvendo benzeno pode ser feita com areia, dióxido de carbono ou pó extintor. A inalação de benzeno deve ser evitada, pois é tóxico e cancerígeno, causando irritações nos olhos, pele e trato respiratório, podendo afetar o sistema nervoso central e o sistema imunológico a longo prazo.

O armazenamento de benzeno deve ser realizado em tanques que não excedam 29ºC. Esses tanques devem ser sistemas fechados, ventilados e protegidos contra corrosão, explosões e incêndios. Deve-se evitar a acumulação de cargas eletrostáticas e é aconselhável armazenar os tanques no exterior da unidade fabril. $^{[6]}$

O transporte de benzeno pode ser feito por vias marítima, terrestre e férrea.

\subsubsection{p-Xileno}

O p-xileno é um líquido inflamável que, em contacto com chamas ou superfícies quentes, pode levar à explosão, com um limite de explosividade entre 1,1\% e 7,0\% em volume. Devido a essa característica, não deve haver chamas ou fontes de ignição próximas ao seu armazenamento ou uso no processo. A extinção de incêndios envolvendo p-xileno pode ser feita com espuma resistente ao álcool, dióxido de carbono ou pó extintor. A inalação de p-xileno deve ser evitada, pois é tóxico e pode ser fatal se ingerido e penetrar nas vias respiratórias, causando irritações nos olhos, pele e trato respiratório, e a longo prazo pode afetar o sistema nervoso central. $^{[7]}$

O armazenamento de p-xileno deve ser realizado em tanques que não excedam 25ºC. Esses tanques devem ser sistemas fechados, ventilados e protegidos contra corrosão, explosões e incêndios. Deve-se evitar a acumulação de cargas eletrostáticas, e é aconselhável armazenar os tanques no exterior da unidade fabril. $^{[8]}$

O transporte de p-xileno pode ser feito por vias marítima, terrestre e férrea, devendo estar adequadamente acondicionado para evitar vazamentos e explosões.

\newpage

\section{Estrutura de Aplicações}

Xilenos é a designação atribuída à mistura dos três isómeros: orto-xileno, meta-xileno e para-xileno que possuem características e propriedades diferentes e, consequentemente, aplicações diferentes na indústria química.

O xileno comercial geralmente contém cerca de 40-65\% de m-xileno e até 20\% de o-xileno e p-xileno $^{[9]}$, além de etilbenzeno e pequenas quantidades de tolueno. Esta mistura é o segundo produto aromático mais importante no que toca ao consumo mundial para fabrico químico devido às suas propriedades de dissolução e secagem rápida. $^{[10]}$

Os xilenos, enquanto mistura, são produtos químicos essenciais para diversas aplicações industriais. A principal utilização dos xilenos é na produção de isómeros, como, o p-xileno, que é fundamental para o fabrico de ácido tereftálico purificado (PTA) e polietileno tereftalato (PET). Além disso, os xilenos são usados na mistura de combustíveis para melhorar a octanagem da gasolina, o que aumenta a eficiência da combustão e o desempenho dos motores. Outra aplicação importante deste composto é na produção de borracha e pesticidas, assim como no processamento de peles. Os xilenos também são utilizados como solventes em diluentes, tintas, vernizes e adesivos. $^{[11]}$

Aproximadamente 65-70\% do consumo de mistura de xilenos como solventes é destinado a revestimentos e tintas.

Como observado na figura 1, a aplicação em monómeros representa a maior percentagem (88\%), seguida pela utilização deste composto em misturas de combustíveis (5\%), na produção de borrachas e pesticidas (4\%) e, por fim, como solventes (3\%). $^{[12]}$

Esta análise reflete a versatilidade e a importância dos xilenos em várias indústrias, com relevante destaque no fabrico de monómeros para o setor de plásticos e fibras sintéticas.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\pie[

text=legend,

explode=0.0,

color={blue!70, orange, green, cyan}

]{

88/Monómeros,

3/Solventes,

5/Mistura de gasolina,

4/Borracha e pesticidas

}

\end{tikzpicture}

\caption{Distribuição das aplicações dos xilenos.$^{[12]}$}

\label{fig:piechart}

\end{figure}

\newpage

\subsection{Benzeno}

O benzeno é um intermédio na produção de estireno (51\%), ciclohexano (19\%), cumeno (10\%), entre outros (20\%) $^{[13]}$. Devido à capacidade do benzeno como solvente devido à sua estrutura molecular, que possui propriedades polares adequadas para interagir com vários compostos orgânicos, este composto é utilizado como solvente industrial e agente absorvente e ligante, no fabrico de plásticos, fibras e resinas sintéticas, tintas e detergentes.

O estireno é uma matéria-prima intermediária na produção de plásticos de estireno, poliestireno e borracha sintética que são usados na produção de embalagens alimentares, indústria automóvel e indústria elétrica e eletrónica. $^{[14]}$

Como exemplos de aplicações temos os pneus de borracha e isolamento de edifícios. O ciclohexano é utilizado na produção de nylon, produto essencial na indústria têxtil para o fabrico de tecidos e filamentos. O cumeno é um intermediário na produção de resina fenólicas e policarbonatos que são usados na produção de compostos farmacêuticos, detergentes e indústria de mobiliário. $^{[15]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\pie[

text=legend,

explode=0.0,

color={blue!70, orange, green, cyan}

]{

51/Estireno,

19/Cicloexano,

10/Cumeno,

20/Outros

}

\end{tikzpicture}

\caption{Distribuição das aplicações dos compostos.$^{[13]}$}

\label{fig:piechart}

\end{figure}

\subsection{p-xileno}

Apesar de ser o isómero que corresponde à parcela mais pequena da mistura de xilenos (20\%) $^{[9]}$, o p-xileno é um dos compostos aromáticos mais utilizados, representando cerca de 86\% do consumo total da mistura de xilenos.

O p-xileno é a principal matéria-prima intermediária utilizada na produção de ácido tereftálico purificado (94\%), tereftalato de dimetilo (2\%) e outros compostos (4\%), como o diparaxileno e herbicidas. $^{[16]}$

Tanto o ácido tereftálico quanto o tereftalato de dimetilo são intermediários essenciais na fabricação de PET (polietileno tereftalato), utilizado em diversas indústrias para a produção de resinas, filmes e fibras de poliéster, com aplicações finais que incluem embalagens, garrafas e materiais de construção. $^{[17]}$ O crescimento do mercado destas resinas foi estimulado pelas inovações da UOP Parex, que é um método de separação eficaz para a recuperação de para-xilenos a partir de xilenos mistos. A utilização deste processo facilita a conversão eficiente de para-xileno em ácido tereftálico e, por sua vez, em fibra de poliéster, filmes e resina. $^{[18]}$

\newpage

\section{Visão do Mercado e Projeções}

Nesta primeira parte do estudo, o objetivo é analisar detalhadamente a evolução e as tendências de consumo de benzeno e p-xileno, num contexto mundial e em quatro áreas geográficas cruciais: Europa, China, Ásia (excluindo a China) e Estados Unidos da América.

Pretende-se identificar os padrões de consumo atuais e antecipar tendências futuras no consumo de benzeno e p-xileno, de modo a determinar a necessidade de estabelecer novas unidades produtivas.

Para projetar o consumo futuro e avaliar a necessidade de instalar novas fábricas, foi conduzido um estudo utilizando o método de extrapolação individual $^{[19]}$. Este método considera o consumo per capita em uma região específica para prever as tendências de consumo. Assim, ao analisar essas variáveis, é possível determinar com maior precisão a procura futura e planear a capacidade de produção necessária para atender essa procura.

\subsection{Mercado Global}

\noindent\textbf{Benzeno}\\

Analisando o consumo global de benzeno na última década é possível perceber que em 2023, o consumo global atingiu um valor de 56,4 Mton, mantendo uma tendência de crescimento desde 2018 $^{[20]}$ $^{[21]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=8cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=35, ymax=60,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={35,40,45,50,55,60},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,47.2) (2013,47.8) (2014,47.6) (2015,45.9)

(2016,48.0) (2017,48.1) (2018,47.3) (2019,49.4)

(2020,51.1) (2021,51.8) (2022,54.5) (2023,56.4)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do consumo de benzeno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-benzeno}

\end{figure}

Observando a quota de mercado de cada região ao longo dos últimos dez anos, vemos que a Ásia (exceto a China) mantém cerca de 50\% do consumo de benzeno, com uma leve redução de 52\% em 2013 para 48\% em 2018 e 2023. A China mostra um crescimento significativo, aumentando de 17\% em 2013 para 25\% em 2023. Os EUA e a Europa apresentam uma ligeira diminuição nas suas quotas, com os EUA passando de 14\% para 12\% e a Europa de 17\% para 15\% no mesmo período.\\

\newpage

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

ybar stacked,

bar width=20pt,

width=10cm,

height=8cm,

ymin=0,

ymax=100,

enlarge x limits=0.3,

xlabel={Ano},

ylabel={Quota de mercado (\%)},

symbolic x coords={2013, 2018, 2023},

xtick=data,

legend style={at={(0.5,-0.1)}, anchor=north, legend columns=-1},

nodes near coords,

every node near coord/.append style={font=\bfseries, yshift=0.5mm, black},

axis y line\*=left,

axis x line\*=bottom,

area legend

]

\addplot+[ybar, color=blue, fill=blue!70] plot coordinates {(2013,17) (2018,22) (2023,25)} ;

\addplot+[ybar, color=orange, fill=orange!70] plot coordinates {(2013,14) (2018,14) (2023,12)};

\addplot+[ybar, color=gray, fill=gray!70] plot coordinates {(2013,17) (2018,16) (2023,15)} ;

\addplot+[ybar, color=yellow, fill=yellow!70] plot coordinates {(2013,52) (2018,48) (2023,48)};

\legend{China, USA, Europa, Ásia sem China}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Quota de mercado de benzeno por região (2013, 2018, 2023)}

\label{fig:market-share-benzeno}

\end{figure}

As produções de benzeno têm vindo a crescer ao longo dos anos, atingindo uma produção mundial de 55,8 Mton em 2023, com a Ásia (exceto a China) produzindo 25,3 Mton e a China 11,3 Mton. Em 2022, os maiores exportadores foram a Coreia do Sul (2,5 Mton), Índia (1,6 Mton), Países Baixos (0,7 Mton), Alemanha (0,6 Mton) e Japão (0,5 Mton), representando juntos 60\% das exportações globais $^{[20-22]}$ $^{[26]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=13cm,

height=8cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=75,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,45.853)(2013,46.463)(2014,46.498)(2015,46.891)(2016,45.644)(2017,47.331)(2018,47.063)(2019,48.504)(2020,51.814)(2021,52.465)(2022,53.979)(2023,55.795)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,47.161)(2013,47.756)(2014,47.578)(2015,45.890)(2016,48.011)(2017,48.119)(2018,47.302)(2019,49.351)(2020,51.081)(2021,51.768)(2022,54.510)(2023,56.441)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,57.000)(2013,57.500)(2014,58.000)(2015,58.500)(2016,59.000)(2017,59.500)(2018,60.000)(2019,62.000)(2020,65.000)(2021,66.000)(2022,68.000)(2023,70.000)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (14,5.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

Dado o crescente consumo ao longo dos últimos dez anos, é esperado que o consumo previsto expanda com uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de 4,23\%. O gráfico abaixo ilustra claramente esta tendência, destacando que, se a capacidade instalada atualmente não for expandida, o consumo excederá a capacidade de produção. É crucial planejar uma expansão da capacidade para acompanhar o aumento projetado no consumo e evitar déficits na produção. $^{[70]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=20000, ymax=100000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,47161)(2013,47756)(2014,47578)(2015,45890)(2016,48011)(2017,48119)(2018,47302)(2019,49351)(2020,51081)(2021,51768)(2022,54510)(2023,56441)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,57000)(2013,57500)(2014,58000)(2015,58500)(2016,59000)(2017,59500)(2018,60000)(2019,62000)(2020,65000)(2021,66000)(2022,68000)(2023,70000)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,56441)(2024,58829)(2025,61317)(2026,63911)(2027,66614)(2028,69432)(2029,72369)(2030,75430)(2031,78621)(2032,81946)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,70000)(2024,70000)(2025,70000)(2026,70000)(2027,70000)(2028,70000)(2029,70000)(2030,70000)(2031,70000)(2032,70000)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de Benzeno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\noindent\textbf{p-Xileno}\\

Ao analisar o consumo de p-xileno, observa-se um crescimento constante até 2021, seguido por uma estabilização nos anos subsequentes. O consumo atingiu um pico de 60,2 Mton em 2022, mantendo-se próximo desse valor em 2023. $^{[20]}$ $^{[21]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=8cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=10, ymax=70,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={10,20,30,40,50,60,70},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,36.61) (2013,37.337) (2014,41.697) (2015,40.554)

(2016,42.703) (2017,45.661) (2018,46.752) (2019,51.649)

(2020,54.424) (2021,59.674) (2022,60.229) (2023,59.554)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do consumo de p-xileno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

Os maiores consumidores de p-xileno, como a China, a Índia e os Estados Unidos, continuam a impulsionar a demanda global devido às suas vastas indústrias petroquímicas e de plásticos. Em 2022, a China liderou o consumo global, seguida pela Índia e pelos Estados Unidos, que juntos representaram uma parte significativa do consumo total. Observando a quota de mercado de cada uma das regiões, verifica-se que a China dominou o mercado durante a última década, com uma quota de 67\% em 2018. $^{[20]}$ $^{[24]}$ $^{[25]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

ybar stacked,

bar width=20pt,

width=10cm,

height=8cm,

ymin=0,

ymax=100,

enlarge x limits=0.3,

xlabel={Ano},

ylabel={Quota de mercado (\%)},

symbolic x coords={2013, 2018, 2023},

xtick=data,

legend style={at={(0.5,-0.1)}, anchor=north, legend columns=-1},

nodes near coords,

every node near coord/.append style={font=\bfseries, yshift=0.5mm, black},

axis y line\*=left,

axis x line\*=bottom,

area legend

]

\addplot+[ybar, color=blue, fill=blue!70] plot coordinates {(2013,62) (2018,67) (2023,59)} ;

\addplot+[ybar, color=orange, fill=orange!70] plot coordinates {(2013,7) (2018,6) (2023,7)};

\addplot+[ybar, color=gray, fill=gray!70] plot coordinates {(2013,8) (2018,8) (2023,7)} ;

\addplot+[ybar, color=yellow, fill=yellow!70] plot coordinates {(2013,23) (2018,19) (2023,26)};

\legend{China, USA, Europa, Ásia sem China}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Quota de mercado de p-Xileno por região (2013, 2018, 2023)}

\label{fig:market-share-benzeno}

\end{figure}

As produções de p-xileno também têm vindo a crescer, atingindo um total de 63,1 Mton em 2023. A Ásia, excluindo a China, foi a maior produtora, com 30 Mton, seguida pela China, com 25,6 Mton. Em 2022, os maiores exportadores mundiais de p-xileno foram a Coreia do Sul, com 5,3 Mton, o Japão, com 2,3 Mton, e Brunei, com 1,3 Mton, representando juntos 51,23\% das exportações globais. $^{[23]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=13cm,

height=8cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=90,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,37.285) (2013,40.305) (2014,41.630) (2015,41.455)

(2016,43.950) (2017,46.535) (2018,47.010) (2019,52.815)

(2020,56.800) (2021,58.200) (2022,61.100) (2023,63.100)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,36.610) (2013,37.337) (2014,41.697) (2015,40.554)

(2016,42.703) (2017,45.661) (2018,46.752) (2019,51.649)

(2020,54.424) (2021,59.674) (2022,60.229) (2023,59.554)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,47.000) (2013,50.500) (2014,52.000) (2015,52.000)

(2016,55.500) (2017,58.200) (2018,59.000) (2019,67.800)

(2020,72.000) (2021,73.500) (2022,77.000) (2023,78.500)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (14,5.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de p-xileno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

\newpage

Tendo em conta o consumo crescente seria expectável que o consumo previsto cresça com uma CAGR de 5,21\% atingindo um valor de consumo de 94,1 Mton até 2032. $^{[70]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=15cm,

height=8cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=0, ymax=100000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.2)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} }

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,36610)(2013,37337)(2014,41697)(2015,40554)(2016,42703)(2017,45661)(2018,46752)(2019,51649)(2020,54424)(2021,59674)(2022,60229)(2023,59554)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,47000)(2013,50500)(2014,52000)(2015,52000)(2016,55500)(2017,58200)(2018,59000)(2019,67800)(2020,72000)(2021,73500)(2022,77000)(2023,78500)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

very thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,59554)(2024,62657)(2025,65921)(2026,69356)(2027,72969)(2028,76771)(2029,80771)(2030,84979)(2031,89406)(2032,94064)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

very thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,78500)(2024,78500)(2025,78500)(2026,78500)(2027,78500)(2028,78500)(2029,78500)(2030,78500)(2031,78500)(2032,78500)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo p-Xileno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\newpage

\subsection{Mercado Por Grande Região}

\subsubsection{Europa}

\noindent\textbf{Benzeno}\\

Ao observar o consumo de benzeno na última década, nota-se uma relativa estabilidade com pequenas flutuações. De 2017 para 2018, o consumo caiu ligeiramente em aproximadamente 0,6 Mton. Em 2020, houve uma queda acentuada, provavelmente devido às restrições impostas pela pandemia de COVID-19. No entanto, após 2020, houve uma recuperação significativa, sugerindo uma retoma das atividades industriais. Os maiores consumidores de benzeno na Europa são a Alemanha, Bélgica, Países Baixos e Itália. $^{[20]}$ $^{[27-28]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=6cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=4, ymax=10,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={4,6,8,10},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,7.705) (2013,7.859) (2014,7.639) (2015,7.776)

(2016,7.955) (2017,8.270) (2018,7.636) (2019,7.318)

(2020,6.973) (2021,8.125) (2022,8.225) (2023,8.325)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

Nos últimos três anos, observa-se que o consumo de benzeno tem sido superior à produção, indicando uma necessidade de importação para atender à procura interna. A capacidade produtiva manteve-se relativamente constante ao longo dos anos, sugerindo que não houve necessidade de construir novas unidades fabris. $^{[29-30]}$ $^{[31]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=10,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,7.478) (2013,7.593) (2014,7.388) (2015,7.641)

(2016,6.149) (2017,7.136) (2018,6.508) (2019,6.729)

(2020,7.374) (2021,7.225) (2022,7.139) (2023,7.355)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,7.705) (2013,7.859) (2014,7.639) (2015,7.776)

(2016,7.955) (2017,8.270) (2018,7.636) (2019,7.318)

(2020,6.973) (2021,8.125) (2022,8.225) (2023,8.325)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,9.000) (2013,9.000) (2014,9.000) (2015,9.000)

(2016,9.000) (2017,9.000) (2018,9.000) (2019,9.000)

(2020,9.000) (2021,9.000) (2022,9.000) (2023,9.000)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (11.5,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

A balança comercial de benzeno na Europa foi predominantemente negativa, refletindo a necessidade significativa de importações para atender à demanda interna. Em 2022, os maiores exportadores de benzeno foram os Países Baixos (0,70 Mton), a Alemanha (0,58 Mton) e a Bélgica (0,27 Mton), representando juntos 64,6\% das exportações europeias.

Este padrão de balança comercial negativa, aliado à constância na capacidade produtiva, sugere uma falta de investimentos significativos em novas instalações fabris, contribuindo para a dependência de importações. A falta de crescimento na capacidade produtiva indica que a Europa não conseguiu aumentar a sua produção interna para acompanhar a procura crescente. $^{[21-22]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=7cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-3500, ymax=3500,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-3500,-3000,-2500,-2000,-1500,-1000,-500,0,500,1000,1500,2000,2500,3000,3500},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024}

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-2669)(2013,-2669)(2014,-2815)(2015,-2569)(2016,-2514)(2017,-2651)(2018,-2162)(2019,-1005)(2020,-1025)(2021,-3200)(2022,-2586)(2023,-1970)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,2442)(2013,2403)(2014,2564)(2015,2434)(2016,708)(2017,1517)(2018,1034)(2019,416)(2020,1426)(2021,2300)(2022,1500)(2023,1000)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,-227)(2013,-266)(2014,-251)(2015,-135)(2016,-1806)(2017,-1134)(2018,-1128)(2019,-589)(2020,401)(2021,-900)(2022,-1086)(2023,-970)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,4.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig:import-export}

\end{figure}

O mercado de benzeno na Europa tem mostrado um crescimento positivo nos últimos anos, refletindo um aumento no consumo. A projeção futura para a Europa é otimista, com uma previsão de crescimento contínuo. Espera-se que o mercado continue a expandir-se, com uma CAGR de 1,4\% no período de 2024 a 2032, projetando-se um volume de mercado de 9,44 Mton em 2032. $^{[65]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=5000, ymax=10000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,7705)(2013,7859)(2014,7639)(2015,7776)(2016,7955)(2017,8270)(2018,7636)(2019,7318)(2020,6973)(2021,8125)(2022,8225)(2023,8325)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,9000)(2013,9000)(2014,9000)(2015,9000)(2016,9000)(2017,9000)(2018,9000)(2019,9000)(2020,9000)(2021,9000)(2022,9000)(2023,9000)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,8325)(2024,8442)(2025,8560)(2026,8680)(2027,8801)(2028,8924)(2029,9049)(2030,9176)(2031,9304)(2032,9435)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,9000)(2024,9000)(2025,9000)(2026,9000)(2027,9000)(2028,9000)(2029,9000)(2030,9000)(2031,9000)(2032,9000)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de Benzeno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\newpage

\noindent\textbf{p-Xileno}\\

O consumo de p-xileno na Europa apresentou estabilidade ao longo da última década, com pequenas flutuações entre 3,0 e 4,5 Mton. Em 2020, houve uma queda significativa possivelmente devido à pandemia de COVID-19, influenciada por fatores económicos, mudanças na procura industrial e políticas ambientais rigorosas da União Europeia. Após 2021, o consumo recuperou, indicando uma retomada das atividades industriais. $^{[32-33]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=8cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=0, ymax=8,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={0,2,4,6,8},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,3.618) (2013,3.461) (2014,3.686) (2015,3.123)

(2016,3.192) (2017,3.176) (2018,3.634) (2019,3.275)

(2020,3.071) (2021,3.367) (2022,3.500) (2023,4.216)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do consumo de p-xileno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

Analisando o gráfico de capacidade, produção e consumo de p-xileno na Europa entre 2012 e 2023, observa-se uma estabilidade na capacidade de produção, indicando a ausência de investimentos significativos em novas unidades fabris. A produção flutuou entre 2,8 e 3,6 Mton, refletindo a queda em 2020 devido à pandemia, seguida por uma recuperação nos anos subsequentes. Ao longo do período, o consumo nos últimos anos superou a produção, sugerindo uma dependência de importações para superar o consumo interno. A rápida recuperação demonstra a resiliência do mercado europeu de p-xileno. $^{[20-30]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=5,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,3.600) (2013,3.600) (2014,3.600) (2015,3.600)

(2016,3.600) (2017,3.600) (2018,3.600) (2019,3.100)

(2020,2.800) (2021,2.900) (2022,2.900) (2023,3.600)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,3.618) (2013,3.461) (2014,3.686) (2015,3.123)

(2016,3.192) (2017,3.176) (2018,3.634) (2019,3.275)

(2020,3.071) (2021,3.367) (2022,3.500) (2023,4.216)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,4.500) (2013,4.500) (2014,4.500) (2015,4.500)

(2016,4.500) (2017,4.500) (2018,4.500) (2019,4.500)

(2020,4.500) (2021,4.500) (2022,4.500) (2023,4.500)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (11.5,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de p-Xileno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

A análise da balança comercial de p-xileno na Europa revela uma tendência negativa ao longo do período estudado. As importações de p-xileno têm superado as exportações, evidenciando uma dependência contínua de fornecedores externos para atender ao consumo interno. No início do período analisado, houve um aumento nas exportações, atingindo um pico entre 2017. Contudo, a partir desse ponto, as exportações diminuíram acentuadamente e as importações aumentaram constantemente, agravando o déficit comercial.

Essa situação pode ser atribuída à insuficiência de investimentos em novas unidades fabris, ao impacto das políticas ambientais rigorosas da União Europeia e às mudanças na procura industrial e nas dinâmicas do mercado. A necessidade de importar volumes significativos de p-xileno destaca a importância de estratégias para aumentar a produção interna e reduzir a vulnerabilidade das flutuações do mercado internacional. $^{[21]}$ $^{[23]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-1500, ymax=1500,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-1500,-1200,-900,-600,-300,0,300,600,900,1200,1500},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024}

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-919)(2013,-578)(2014,-616)(2015,-507)(2016,-476)(2017,-567)(2018,-860)(2019,-994)(2020,-1027)(2021,-1154)(2022,-840)(2023,-962)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,901)(2013,717)(2014,530)(2015,984)(2016,884)(2017,991)(2018,826)(2019,819)(2020,756)(2021,687)(2022,240)(2023,346)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,-18)(2013,139)(2014,-86)(2015,477)(2016,408)(2017,424)(2018,-34)(2019,-175)(2020,-271)(2021,-467)(2022,-600)(2023,-616)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,3.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig}

\end{figure}

As projeções indicam que o consumo de p-xileno na Europa manter-se-á relativamente estável nos próximos anos, com uma CAGR de 0,45\%. A previsão é que o consumo atinja aproximadamente 4,5 Mton em 2032. Para garantir que a capacidade instalada continue a atender à demanda, é crucial manter a infraestrutura atual e considerar possíveis expansões ou atualizações conforme necessário. Esse equilíbrio ajudará a evitar dependências excessivas de importações, assegurando a autossuficiência do mercado europeu de p-xileno e contribuindo para a estabilidade do setor a longo prazo. $^{[71]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=5cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=2000, ymax=6000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.20)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,3618)(2013,3461)(2014,3686)(2015,3123)(2016,3192)(2017,3176)(2018,3634)(2019,3275)(2020,3071)(2021,3367)(2022,3500)(2023,4216)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,4500)(2013,4500)(2014,4500)(2015,4500)(2016,4500)(2017,4500)(2018,4500)(2019,4500)(2020,4500)(2021,4500)(2022,4500)(2023,4500)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,4216)(2024,4216)(2025,4229)(2026,4242)(2027,4255)(2028,4267)(2029,4278)(2030,4289)(2031,4300)(2032,4310)

};

,450732

,374766

,791005

,735667

,228162

,263113

,892209

,139925

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,4500)(2024,4500)(2025,4500)(2026,4500)(2027,4500)(2028,4500)(2029,4500)(2030,4500)(2031,4500)(2032,4500)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de p-Xileno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\subsubsection{China}

\noindent\textbf{Benzeno}\\

Ao observar o consumo de benzeno na China ao longo da última década, é possível notar um crescimento acentuado. Em 2012, o consumo era cerca de 7,9 Mton, e em 2023 atingiu aproximadamente 14 Mton, representando um aumento de aproximadamente 77\%. Este crescimento era esperado, dado o vasto mercado petroquímico da China e a sua crescente procura por produtos derivados de benzeno. $^{[34]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=6cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=4, ymax=18,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={4,6,8,10,12,14,16,18},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,7.9) (2013,8.2) (2014,8.6) (2015,9.0)

(2016,9.4) (2017,9.9) (2018,10.5) (2019,11.1)

(2020,11.8) (2021,12.6) (2022,13.4) (2023,14.1)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do Consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

Ao analisar o gráfico, é possível observar que a capacidade de produção de benzeno na China aumentou continuamente ao longo dos anos. Simultaneamente, o consumo de benzeno na China cresceu significativamente durante o mesmo período, ultrapassando a produção doméstica a partir de 2017. Em 2023, o consumo alcançou aproximadamente 14 Mton, igualando a capacidade instalada. Isso evidencia uma crescente lacuna entre a produção e o consumo, indicando uma forte dependência de importações para atender à demanda interna. Este cenário destaca a necessidade urgente de aumentar a produção de benzeno para reduzir a dependência externa e assegurar a sustentabilidade do mercado interno. $^{[33]}$ $^{[35]}$ $^{[38-39]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=15,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,6.000) (2013,6.240) (2014,6.480) (2015,7.600)

(2016,7.200) (2017,7.680) (2018,8.160) (2019,8.800)

(2020,9.600) (2021,10.240) (2022,10.800) (2023,11.280)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,7.900) (2013,8.200) (2014,8.600) (2015,9.000)

(2016,9.400) (2017,9.900) (2018,10.500) (2019,11.100)

(2020,11.800) (2021,12.600) (2022,13.400) (2023,14.100)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,7.500) (2013,7.800) (2014,8.100) (2015,9.500)

(2016,9.000) (2017,9.600) (2018,10.200) (2019,11.000)

(2020,12.000) (2021,12.800) (2022,13.500) (2023,14.100)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (12,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

Como era de esperar, a balança comercial de benzeno da China é negativa, confirmando a necessidade de importações para atender ao consumo interno. Observa-se uma tendência crescente de importações, que aumentaram de cerca de 0,5 Mton em 2012 para aproximadamente 3,5 Mton em 2023. Este aumento nas importações reflete a rápida expansão da demanda por benzeno.

Em 2022, a China representou 31\% das importações mundiais de benzeno, com um total de 3,3 Mton importadas. Esta forte dependência de importações sublinha a necessidade de aumentar a capacidade de produção interna, evidenciando uma oportunidade clara para investimentos em novas unidades fabris para reduzir a dependência externa e fortalecer a autossuficiência do mercado.$^{[21]}$ $^{[33]}$ $^{[37]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=8cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-4000, ymax=500,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-4000,-3500,-3000,-2500,-2000,-1500,-1000,-500,0,500},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024}

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-439)(2013,-887)(2014,-598)(2015,-1205)(2016,-1535)(2017,-2503)(2018,-2572)(2019,-1939)(2020,-2098)(2021,-2961)(2022,-3322)(2023,-3400)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,49.4)(2013,31.1)(2014,74.9)(2015,83.1)(2016,47)(2017,36)(2018,41)(2019,36)(2020,3)(2021,12)(2022,7)(2023,9)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,-389.6)(2013,-855.9)(2014,-523.1)(2015,-1121.9)(2016,-1488)(2017,-2467)(2018,-2531)(2019,-1903)(2020,-2095)(2021,-2949)(2022,-3315)(2023,-3391)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,5.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig}

\end{figure}

Tendo em conta o mercado crescente na última década, estima-se uma CAGR de 3,30\% nos próximos 10 anos, podendo atingir um consumo de 20 Mton. Isso destacará ainda mais a necessidade de aumentar a produção para atender à procura crescente. $^{[70]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=5000, ymax=25000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,7900)(2013,8200)(2014,8600)(2015,9000)(2016,9400)(2017,9900)(2018,10500)(2019,11100)(2020,11800)(2021,12600)(2022,13400)(2023,14100)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,7500)(2013,7800)(2014,8100)(2015,9500)(2016,9000)(2017,9600)(2018,10200)(2019,11000)(2020,12000)(2021,12800)(2022,13500)(2023,14100)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,14100)(2024,14696)(2025,15318)(2026,15966)(2027,16641)(2028,17345)(2029,18079)(2030,18844)(2031,19641)(2032,20472)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,14100)(2024,14100)(2025,14100)(2026,14100)(2027,14100)(2028,14100)(2029,14100)(2030,14100)(2031,14100)(2032,14100)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de Benzeno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\newpage

\noindent\textbf{p-Xileno}\\

Ao observar o consumo de p-xileno na China ao longo da última década, é evidente um aumento substancial. Em 2012, o consumo era de cerca de 18 Mton, atingindo aproximadamente 40 Mton em 2020, antes de uma leve queda para cerca de 35 Mton em 2023. Este crescimento significativo reflete a expansão das indústrias petroquímicas e de plásticos na China. $^{[24]}$ $^{[40-41]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=8cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=10, ymax=50,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={10,15,20,25,30,35,40,45,50},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,18.094) (2013,22.467) (2014,23.261) (2015,25.072)

(2016,27.461) (2017,29.604) (2018,31.108) (2019,35.738)

(2020,37.861) (2021,40.567) (2022,36.104) (2023,35.418)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do Consumo de p-Xileno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

A análise do gráfico revela que, ao longo da última década, a produção de p-xileno na China não conseguiu acompanhar o consumo crescente. O consumo tem sido consistentemente superior à capacidade instalada, evidenciando uma robusta demanda interna que a produção nacional não consegue satisfazer completamente. Este cenário indica uma necessidade contínua de importações para preencher a lacuna entre a produção interna e o consumo.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=45,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,12.000) (2013,13.600) (2014,13.600) (2015,13.600)

(2016,15.200) (2017,15.200) (2018,15.200) (2019,20.800)

(2020,24.000) (2021,24.000) (2022,25.600) (2023,25.600)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,18.094) (2013,22.467) (2014,23.261) (2015,25.072)

(2016,27.461) (2017,29.604) (2018,31.108) (2019,35.738)

(2020,37.861) (2021,40.567) (2022,36.104) (2023,35.418)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,15.000) (2013,17.000) (2014,17.000) (2015,17.000)

(2016,19.000) (2017,19.000) (2018,19.000) (2019,26.000)

(2020,30.000) (2021,30.000) (2022,32.000) (2023,32.000)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (12,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de p-Xileno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

A dependência de importações é uma realidade no mercado chinês de p-xileno, sublinhando a importância de expandir a capacidade de produção interna para reduzir a vulnerabilidade das flutuações do mercado internacional e melhorar a autossuficiência. O gráfico mostra uma balança comercial negativa significativa para o p-xileno ao longo dos anos. Desde 2012, as importações têm sido substancialmente superiores às exportações, refletindo a crescente procura interna que a produção nacional não consegue satisfazer. Em 2022, a China importou 10,5 Mton de p-xileno, representando 60,8\% do total mundial. Assim, a necessidade de expandir a capacidade de produção interna permanece crucial para reduzir a dependência de importações e aumentar a autossuficiência do mercado chinês de p-xileno. $^{[21]}$ $^{[33]}$ $^{[41]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-19000, ymax=1000,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-20000,-15000,-10000,-5000,1000},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

scaled y ticks=false,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024}

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-6286)(2013,-9048)(2014,-9764)(2015,-11592)(2016,-12315)(2017,-14439)(2018,-15908)(2019,-14938)(2020,-13861)(2021,-16567)(2022,-10582)(2023,-9850)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,192)(2013,181)(2014,104)(2015,120)(2016,55)(2017,35)(2018,0.1)(2019,0.1)(2020,0.05)(2021,0.1)(2022,79)(2023,32)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,-6094)(2013,-8867)(2014,-9661)(2015,-11472)(2016,-12261)(2017,-14404)(2018,-15908)(2019,-14938)(2020,-13861)(2021,-16567)(2022,-10504)(2023,-9818)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,3.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig}

\end{figure}

As projeções indicam que o consumo de p-xileno na China continuará a crescer com uma CAGR de 4,21\%, atingindo aproximadamente 53,5 Mton em 2032. Para evitar uma maior dependência de importações e garantir a autossuficiência do mercado, é essencial investir na construção de novas unidades fabris. Essas novas instalações supririam a crescente demanda interna e fortaleceriam a posição da China no mercado global de p-xileno. $^{[70]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=10000, ymax=60000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,18094)(2013,22467)(2014,23261)(2015,25072)(2016,27461)(2017,29604)(2018,31108)(2019,35738)(2020,37861)(2021,40567)(2022,36104)(2023,35418)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,15000)(2013,17000)(2014,17000)(2015,17000)(2016,19000)(2017,19000)(2018,19000)(2019,26000)(2020,30000)(2021,30000)(2022,32000)(2023,32000)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,35418)(2024,35984)(2025,38233)(2026,40468)(2027,42688)(2028,44890)(2029,47075)(2030,49240)(2031,51385)(2032,53508)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,32000)(2024,32000)(2025,32000)(2026,32000)(2027,32000)(2028,32000)(2029,32000)(2030,32000)(2031,32000)(2032,32000)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de p-Xileno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\newpage

\subsubsection{Ásia sem China}

\noindent\textbf{Benzeno}\\

A análise do gráfico de consumo de benzeno na Ásia, excluindo a China, ao longo da última década, revela um padrão de pequenas oscilações nos primeiros anos, com o consumo permanecendo relativamente estável entre 2012 e 2017. De 2018 a 2023, observou-se uma tendência de crescimento. Em 2022, os maiores consumidores na Ásia foram a Índia, com um consumo de 2,2 Mton, o Japão, com 2,0 Mton, a Coreia do Sul, com 1,9 Mton, Taiwan, com 1,1 Mton, e a Tailândia, com 0,8 Mton. $^{[20]}$ $^{[22]}$ $^{[42]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=8cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=18, ymax=32,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={18,20,22,24,26,28,30,32},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,24.988) (2013,24.981) (2014,24.437) (2015,23.117)

(2016,24.183) (2017,23.354) (2018,22.479) (2019,24.495)

(2020,25.875) (2021,24.994) (2022,26.628) (2023,27.268)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do Consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

Pela análise do gráfico, é possível verificar que a produção de benzeno foi sempre superior ao consumo, indicando que a produção atendeu à demanda interna e gerou um excedente para exportação.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=45,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,27.040) (2013,27.200) (2014,27.360) (2015,26.640)

(2016,27.440) (2017,27.360) (2018,27.280) (2019,28.240)

(2020,29.840) (2021,30.000) (2022,31.040) (2023,32.160)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,24.988) (2013,24.981) (2014,24.437) (2015,23.117)

(2016,24.183) (2017,23.354) (2018,22.479) (2019,24.495)

(2020,25.875) (2021,24.994) (2022,26.628) (2023,27.268)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,33.800) (2013,34.000) (2014,34.200) (2015,33.300)

(2016,34.300) (2017,34.200) (2018,34.100) (2019,35.300)

(2020,37.300) (2021,37.500) (2022,38.800) (2023,40.200)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (12,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

\newpage

A balança comercial de benzeno na Ásia (excluindo a China) manteve-se positiva ao longo dos anos, com valores elevados, o que faz sentido, dado que a produção excede o consumo, resultando na possibilidade de exportar o excesso de produção. Em 2022, os maiores exportadores de benzeno na Ásia foram a Coreia do Sul, com 2,6 Mton exportadas, representando 25,8\% do mercado global, a Índia, com 1,6 Mton exportadas, representando 15,5\% e o Japão, com 0,5 Mton exportadas, representando 5,17\%. $^{[21-22]}$ $^{[28]}$ $^{[33]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=8cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-4000, ymax=8000,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-4000,-3000,-2000,-1000,0,1000,2000,3000,4000,5000,6000,7000,8000},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024},

scaled y ticks=false % Adiciona esta linha para evitar notação científica

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-2258)(2013,-2409)(2014,-2379)(2015,-2951)(2016,-1986)(2017,-2367)(2018,-2604)(2019,-2958)(2020,-2585)(2021,-2280)(2022,-2568)(2023,-2362)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,4310)(2013,4628)(2014,5302)(2015,6474)(2016,5243)(2017,6373)(2018,7405)(2019,6703)(2020,6550)(2021,7286)(2022,6980)(2023,7254)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,2052)(2013,2219)(2014,2923)(2015,3523)(2016,3257)(2017,4006)(2018,4801)(2019,3745)(2020,3965)(2021,5006)(2022,4412)(2023,4892)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,5.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig}

\end{figure}

Ao observar o gráfico, podemos perceber que o consumo previsto manterá uma tendência de crescimento, com uma CAGR de 1.85\%. No entanto, essa projeção indica que o consumo não atingirá a capacidade instalada, sugerindo que a capacidade de produção atual será suficiente para atender à demanda futura.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=20000, ymax=50000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,24988)(2013,24981)(2014,24437)(2015,23117)(2016,24183)(2017,23354)(2018,22479)(2019,24495)(2020,25875)(2021,24994)(2022,26628)(2023,27268)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,33800)(2013,34000)(2014,34200)(2015,33300)(2016,34300)(2017,34200)(2018,34100)(2019,35300)(2020,37300)(2021,37500)(2022,38800)(2023,40200)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,27268)(2024,27732)(2025,28667)(2026,29609)(2027,30556)(2028,31515)(2029,32499)(2030,33432)(2031,34457)(2032,35485)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,40200)(2024,40200)(2025,40200)(2026,40200)(2027,40200)(2028,40200)(2029,40200)(2030,40200)(2031,40200)(2032,40200)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de Benzeno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\newpage

\noindent\textbf{p-Xileno}\\

Ao observar o consumo de p-xileno na Ásia (excluindo a China) na última década, é possível perceber uma tendência de crescimento com algumas oscilações. O consumo aumentou de 12,7 Mton em 2012 para um máximo de 17 Mton em 2022, representando um crescimento de 33,77\% nesse período. $^{[33]}$ $^{[43]}$ $^{[44]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=8cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=0, ymax=25,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={0,5,10,15,20,25},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,12.690) (2013,9.214) (2014,12.189) (2015,9.450)

(2016,9.645) (2017,10.193) (2018,9.014) (2019,10.125)

(2020,10.220) (2021,12.338) (2022,16.796) (2023,15.481)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do Consumo de p-Xileno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

Apesar do crescimento constante no consumo, a produção sempre foi substancialmente maior. Este cenário resultou em um excedente de matéria, possibilitando a exportação do excesso. Em 2020, o Japão atingiu uma capacidade instalada de 0,8 Mton, enquanto a Coreia do Sul, o maior produtor da região, alcançou 12,1 Mton, e a Índia atingiu uma capacidade instalada de 0,65 Mton. $^{[45-47]}$ $^{[50-64]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=40,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,18.400) (2013,19.600) (2014,20.800) (2015,20.800)

(2016,22.000) (2017,24.160) (2018,24.800) (2019,26.240)

(2020,26.400) (2021,27.600) (2022,28.800) (2023,30.000)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,12.690) (2013,9.214) (2014,12.189) (2015,9.450)

(2016,9.645) (2017,10.193) (2018,9.014) (2019,10.125)

(2020,10.220) (2021,12.338) (2022,16.796) (2023,15.481)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,23.000) (2013,24.500) (2014,26.000) (2015,26.000)

(2016,27.500) (2017,30.200) (2018,31.000) (2019,32.800)

(2020,33.000) (2021,34.500) (2022,36.000) (2023,37.500)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (12,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo de p-Xileno (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

\newpage

A balança comercial manteve-se sempre positiva, com um valor significativo de exportações, o que era esperado dado o excesso de produção em relação ao consumo. Em 2022, os maiores exportadores de p-xileno na Ásia sem a China foram a Coreia do Sul, com 5,3 Mton exportados principalmente para a China, e o Japão, com 2,3 Mton exportados. Juntos, esses dois países representaram 55,5\% de todas as exportações mundiais de p-xileno. $^{[21]}$ $^{[23]}$ $^{[33]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=8cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-10000, ymax=25000,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-10000,-5000,0,5000,10000,15000,20000,25000},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024},

scaled y ticks=false % Adiciona esta linha para evitar notação científica

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-4386)(2013,-4724)(2014,-4245)(2015,-3491)(2016,-3494)(2017,-4096)(2018,-4725)(2019,-4691)(2020,-4070)(2021,-3918)(2022,-3490)(2023,-2904)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,10096)(2013,15110)(2014,12856)(2015,14841)(2016,15849)(2017,18063)(2018,20511)(2019,20806)(2020,20250)(2021,19180)(2022,15494)(2023,17423)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,5710)(2013,10386)(2014,8611)(2015,11350)(2016,12355)(2017,13967)(2018,15786)(2019,16115)(2020,16180)(2021,15262)(2022,12004)(2023,14519)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,5.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig}

\end{figure}

Aplicando uma CAGR de 2,48\% ao consumo de 2012 a 2023, estima-se que o consumo de benzeno atinja 37,4 Mton em 2032. Se a tendência de crescimento da capacidade instalada observada na última década não se mantiver, as nossas estimativas indicam que o consumo atingirá o limite máximo da capacidade da região nos próximos anos.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=10000, ymax=50000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,18400)(2013,19600)(2014,20800)(2015,20800)(2016,22000)(2017,24160)(2018,24800)(2019,26240)(2020,26400)(2021,27600)(2022,28800)(2023,30000)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,23000)(2013,24500)(2014,26000)(2015,26000)(2016,27500)(2017,30200)(2018,31000)(2019,32800)(2020,33000)(2021,34500)(2022,36000)(2023,37500)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,30000)(2024,30746)(2025,31511)(2026,32294)(2027,33098)(2028,33921)(2029,34764)(2030,35629)(2031,36515)(2032,37423)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,37500)(2024,37500)(2025,37500)(2026,37500)(2027,37500)(2028,37500)(2029,37500)(2030,37500)(2031,37500)(2032,37500)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de Benzeno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\newpage

\subsubsection{Estados Unidos da América}

\noindent\textbf{Benzeno}\\

Ao longo da última década, o consumo de benzeno nos EUA manteve-se relativamente estável, com algumas flutuações. Este variou entre 6 e 8 Mton, sem qualquer queda ou aumento significativo. Este padrão sugere que o mercado de benzeno dos EUA é relativamente maduro e estável. $^{[66]}$ $^{[68]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=9cm,

height=7cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=2, ymax=10,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={2,4,6,8,10},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,6.568) (2013,6.716) (2014,6.902) (2015,5.997)

(2016,6.473) (2017,6.595) (2018,6.687) (2019,6.438)

(2020,6.433) (2021,6.049) (2022,6.257) (2023,6.748)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do Consumo de Benzeno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

A análise da produção e consumo de benzeno revela que a produção tem sido consistentemente inferior à capacidade instalada, indicando subutilização ou margem de crescimento. O consumo tem excedido a produção ao longo dos anos, refletindo a necessidade de importações para atender à procura interna.

A capacidade de produção tem-se mantido relativamente estável, sugerindo falta de investimentos na expansão produtiva. O gráfico demonstra que a indústria de benzeno nos EUA não é autossuficiente, com a capacidade produtiva existente não sendo totalmente aproveitada, contribuindo para o déficit contínuo na balança comercial do benzeno.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=8,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,5.335) (2013,5.430) (2014,5.270) (2015,5.010)

(2016,4.855) (2017,5.155) (2018,5.115) (2019,4.735)

(2020,5.000) (2021,5.000) (2022,5.000) (2023,5.000)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,6.568) (2013,6.716) (2014,6.902) (2015,5.997)

(2016,6.473) (2017,6.595) (2018,6.687) (2019,6.438)

(2020,6.433) (2021,6.049) (2022,6.257) (2023,6.748)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,6.700) (2013,6.700) (2014,6.700) (2015,6.700)

(2016,6.700) (2017,6.700) (2018,6.700) (2019,6.700)

(2020,6.700) (2021,6.700) (2022,6.700) (2023,6.700)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (12,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

Ao analisarmos o gráfico, observamos que, durante o período em análise, as importações de benzeno permaneceram consistentemente elevadas. Este padrão sugere uma necessidade contínua de importação devido à produção interna ser insuficiente para satisfazer a procura nacional. As exportações, por outro lado, são significativamente menores do que as importações em todos os anos estudados, reforçando a ideia de que a produção doméstica não é capaz de cobrir as necessidades do mercado interno. A balança comercial apresenta-se sempre negativa no período em estudo, o que indica que, em nenhum momento, os EUA tiveram um superávit comercial. Em vez disso, o país apresentou um déficit comercial contínuo, importando mais benzeno do que exportava. $^{[21-22]}$ $^{[33]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=7cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-2000, ymax=500,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-2000,-1500,-1000,-500,0,500},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024},

scaled y ticks=false % Adiciona esta linha para evitar notação científica

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-1325)(2013,-1441)(2014,-1740)(2015,-1068)(2016,-1846)(2017,-1633)(2018,-1747)(2019,-1782)(2020,-1528)(2021,-1315)(2022,-1416)(2023,-1825)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,92)(2013,155)(2014,107)(2015,81)(2016,229)(2017,193)(2018,175)(2019,79)(2020,95)(2021,267)(2022,159)(2023,77)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,-1233)(2013,-1286)(2014,-1632)(2015,-987)(2016,-1618)(2017,-1440)(2018,-1572)(2019,-1703)(2020,-1433)(2021,-1049)(2022,-1257)(2023,-1748)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,4.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig}

\end{figure}

O mercado de benzeno nos EUA tem-se mostrado constante ao longo dos anos, com pequenas flutuações que não afetam significativamente o equilíbrio entre consumo e capacidade. As projeções indicam que essa estabilidade se manterá até 2032, com uma CAGR de -0,22\%, sugerindo que tanto a capacidade de produção quanto o consumo previsto permanecerão praticamente inalterados. $^{[69]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=4000, ymax=10000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,6568)(2013,6716)(2014,6902)(2015,5997)(2016,6473)(2017,6595)(2018,6687)(2019,6438)(2020,6433)(2021,6049)(2022,6257)(2023,6748)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,6700)(2013,6700)(2014,6700)(2015,6700)(2016,6700)(2017,6700)(2018,6700)(2019,6700)(2020,6700)(2021,6700)(2022,6700)(2023,6700)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,6748)(2024,6733)(2025,6718)(2026,6704)(2027,6689)(2028,6674)(2029,6659)(2030,6645)(2031,6630)(2032,6616)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,6700)(2024,6700)(2025,6700)(2026,6700)(2027,6700)(2028,6700)(2029,6700)(2030,6700)(2031,6700)(2032,6700)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de Benzeno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\noindent\textbf{p-Xileno}\\

O gráfico do consumo de p-xileno nos Estados Unidos ao longo da última década revela uma tendência de crescimento, apesar de algumas flutuações anuais. O consumo aumentou de aproximadamente 2 Mton em 2012 para cerca de 4.5 Mton em 2023. Este aumento significativo indica uma crescente demanda por p-xileno no mercado norte-americano. $^{[72-78]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=10cm,

height=7cm,

grid=major,

xlabel={Ano},

ylabel={Consumo (Mton)},

xmin=2010, xmax=2024,

ymin=0, ymax=8,

xtick={2011,2013,2015,2017,2019,2021,2023,2025},

ytick={0,2,4,6,8,10},

legend pos=north west,

legend style={cells={align=left}},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

yticklabel style={/pgf/number format/.cd, use comma, fixed}

]

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

]

coordinates {

(2012,2.208) (2013,2.195) (2014,2.562) (2015,2.909)

(2016,2.405) (2017,2.688) (2018,2.996) (2019,2.512)

(2020,3.272) (2021,3.402) (2022,3.829) (2023,4.439)

};

\addlegendentry{Consumo (Mton)}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Evolução do Consumo de p-Xileno (2012-2023)}

\label{fig:consumo-p-xileno}

\end{figure}

Ao analisar o gráfico, observamos que a produção de para-xileno nos Estados Unidos está consistentemente abaixo da capacidade instalada, indicando subutilização. Nos primeiros anos, a produção excede o consumo, mas nos últimos anos, o consumo frequentemente se aproxima ou supera a produção, sugerindo a necessidade de importações para preencher a lacuna.

A estabilidade na capacidade produtiva ao longo do tempo indica ausência de grandes investimentos na expansão. Portanto, a indústria de para-xileno nos Estados Unidos enfrenta desafios recentes para atender ao consumo interno e precisa otimizar a capacidade instalada para reduzir a dependência de importações.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Mton},

ymin=0, ymax=5,

xtick=data,

symbolic x coords={2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023},

ymajorgrids=true,

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=45, anchor=east},

enlarge x limits=0.15,

bar width=8pt,

legend style={at={(1.05,1)}, anchor=north west, draw=none}

]

% Gráfico de barras para Produção

\addplot[

ybar,

fill=orange,

bar shift=-4pt

]

coordinates {

(2012,3.285) (2013,3.505) (2014,3.630) (2015,3.455)

(2016,3.150) (2017,3.575) (2018,3.410) (2019,2.675)

(2020,3.600) (2021,3.700) (2022,3.800) (2023,3.900)

};

% Gráfico de barras para Consumo

\addplot[

ybar,

fill=yellow,

bar shift=4pt

]

coordinates {

(2012,2.208) (2013,2.195) (2014,2.562) (2015,2.909)

(2016,2.405) (2017,2.688) (2018,2.996) (2019,2.512)

(2020,3.272) (2021,3.402) (2022,3.829) (2023,4.439)

};

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,4.500) (2013,4.500) (2014,4.500) (2015,4.500)

(2016,4.500) (2017,4.500) (2018,4.500) (2019,4.500)

(2020,4.500) (2021,4.500) (2022,4.500) (2023,4.500)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico com borda preta

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (12,3.5) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{orange}{$\blacksquare$} & Produção \\

\textcolor{yellow}{$\blacksquare$} & Consumo \\

\textcolor{blue}{$\bullet$} & Capacidade \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade, Produção e Consumo (2012-2023)}

\label{fig:cap-prod-cons}

\end{figure}

É visto no gráfico que, entre 2012 e 2023, as exportações de p-xileno dos EUA constantemente excederam as importações, indicando uma forte capacidade de produção interna que atende tanto às necessidades domésticas quanto à exportação de excedentes. A balança comercial foi principalmente positiva ao longo dos anos, embora tenha havido uma tendência recente de aumento nas importações e uma leve queda nas exportações desde 2020, o que reajustou a balança comercial em 2023.

Essas flutuações podem ser devidas a variações na demanda doméstica, mudanças nos mercados internacionais e ajustes na capacidade produtiva. Em geral, os EUA permaneceram como exportadores líquidos de p-xileno, com uma infraestrutura de produção robusta e sensibilidade ao mercado tanto local quanto globalmente. $^{[21]}$ $^{[23]}$ \\

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=11cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

xmin=2011, xmax=2024,

ymin=-1500, ymax=2000,

xtick={2012,2014,2016,2018,2020,2022,2024},

ytick={-1500,-1000,-500,0,500,1000,1500,2000},

ymajorgrids=true,

grid style=dashed,

bar width=8pt,

symbolic x coords={2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024},

scaled y ticks=false % Adiciona esta linha para evitar notação científica

]

\addplot[

ybar,

fill=red!70,

]

coordinates {

(2012,-255)(2013,-267)(2014,-230)(2015,-284)(2016,-610)(2017,-444)(2018,-459)(2019,-652)(2020,-947)(2021,-882)(2022,-1092)(2023,-1411)

};

\addplot[

ybar,

fill=green!70,

]

coordinates {

(2012,1332)(2013,1577)(2014,1298)(2015,830)(2016,1355)(2017,1331)(2018,873)(2019,816)(2020,1275)(2021,1180)(2022,1063)(2023,872)

};

\addplot[

color=black,

mark=\*,

thick,

nodes near coords

]

coordinates {

(2012,1077)(2013,1310)(2014,1068)(2015,546)(2016,745)(2017,887)(2018,414)(2019,163)(2020,328)(2021,298)(2022,-29)(2023,-539)

};

\end{axis}

% Legenda manual fora do gráfico

\node[draw=black, thick, fill=white, rounded corners, inner sep=5pt] at (-3.5,3.75) {%

\begin{tabular}{@{}ll@{}}

\textcolor{red!70}{$\blacksquare$} & Importações \\

\textcolor{green!70}{$\blacksquare$} & Exportações \\

\end{tabular}};

\end{tikzpicture}

\caption{Importações e exportações (2012-2023)}

\label{fig}

\end{figure}

O gráfico mostra que o consumo de p-xileno nos EUA cresceu de forma estável e tem uma projeção de aumento contínuo até 2032, com uma CAGR de 1,05\%. A capacidade de produção, por outro lado, manteve-se relativamente estável, sugerindo confiança na capacidade atual. No entanto, as projeções indicam que o consumo futuro ultrapassará a capacidade instalada, destacando a necessidade de investimentos em novas instalações para evitar dependência de importações e garantir a autossuficiência no mercado interno.

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\begin{axis}[

width=12cm,

height=6cm,

xlabel={Ano},

ylabel={Kton},

ymin=0, ymax=8000,

xmin=2010, xmax=2035,

xtick={2010,2015,2020,2025,2030,2035},

ymajorgrids=true,

legend style={at={(0.5,-0.15)}, anchor=north, legend columns=2},

xticklabel style={anchor=base, yshift=-\baselineskip},

x tick label style={rotate=0, anchor=base},

enlarge x limits=0.05,

scaled y ticks=false,

tick label style={/pgf/number format/fixed},

xticklabel style={/pgf/number format/.cd, fixed, precision=0,1000 sep={} },

]

% Gráfico de linha para Consumo

\addplot[

color=blue,

mark=\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,2208)(2013,2195)(2014,2562)(2015,2909)(2016,2405)(2017,2688)(2018,2996)(2019,2512)(2020,3272)(2021,3402)(2022,3829)(2023,4439)

};

\addlegendentry{Consumo}

% Gráfico de linha para Capacidade

\addplot[

color=orange,

mark=square\*,

thick,

]

coordinates {

(2012,4500)(2013,4500)(2014,4500)(2015,4500)(2016,4500)(2017,4500)(2018,4500)(2019,4500)(2020,4500)(2021,4500)(2022,4500)(2023,4500)

};

\addlegendentry{Capacidade}

% Gráfico de linha para Consumo Previsto

\addplot[

color=blue!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,4439)(2024,4705)(2025,4988)(2026,5287)(2027,5604)(2028,5941)(2029,6297)(2030,6675)(2031,7075)(2032,7500)

};

\addlegendentry{Consumo Previsto}

% Gráfico de linha para Capacidade Prevista

\addplot[

color=orange!70,

mark=-\*,

thick,

dashed

]

coordinates {

(2023,4500)(2024,4500)(2025,4500)(2026,4500)(2027,4500)(2028,4500)(2029,4500)(2030,4500)(2031,4500)(2032,4500)

};

\addlegendentry{Capacidade Prevista}

\end{axis}

\end{tikzpicture}

\caption{Capacidade e Consumo de p-Xileno (2012-2032)}

\label{fig:cap-cons-previsto}

\end{figure}

\subsection{Conclusão do Estudo de Mercado}

Em suma, após analisar o mercado nas quatro principais regiões (Europa, China,Ásia, excluindo a China e Estados Unidos), concluiu-se que a China é a região mais promissora para a implementação de nossa unidade fabril para a produção de BTX.

\newpage

\section{Localização}

\subsection{Escolha da Região}

Com base nas informações apresentadas, podemos concluir que a China é a melhor região para a instalação da nova unidade fabril. Este país apresenta condições ideais, incluindo um contínuo crescimento do mercado, um saldo positivo de importações e fácil acesso a matérias-primas.

Além disso, o governo chinês oferece incentivos fiscais e políticas favoráveis para empresas que investem em determinadas regiões, tornando a implementação da fábrica financeiramente mais atrativa. $^{[79]}$

\subsection{Capacidade da fábrica a instalar}

A construção de uma nova fábrica de BTX, especificamente utilizando o tolueno para produzir mais benzeno é um processo complexo e demorado. Considerando as necessidades e as projeções de consumo foi decidido que a capacidade ideal da nova fábrica irá ser 250 kton/ano.

O planeamento deveria começar já em 2024 e estaria pronta a operar em 2027, tendo em conta o seu planeamento meticuloso e com um cronograma bem definido.

Assim, a nova instalação de 250 kton/ano representa um compromisso estratégico e eficiente.

\subsection{Escolha do Parque}

A escolha do parque industrial mais adequado para a instalação da nova fábrica foi realizada com base em vários parâmetros: logística otimizada, incluindo fácil acesso a redes de transporte; disponibilidade de matéria-prima; existência de fábricas de BTX no complexo; e capacidade de terreno disponível.

De acordo com o banco de dados petroquímico da GlobalData, as maiores capacidades dos complexos ativos estão localizadas na Ásia. Entre os dez melhores complexos petroquímicos ativos no continente, destacam-se o Zhejiang Petrochemical Daishan Complex, o Formosa Plastics Group Mailiao Complex e o Hengli Petrochemical Dalian. $^{[80]}$ Assim, esses três parques foram analisados com base nos parâmetros mencionados para uma avaliação mais rigorosa.

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|>{\raggedright\arraybackslash}m{5cm}|c|>{\raggedright\arraybackslash}m{5cm}|>{\raggedright\arraybackslash}m{5cm}|>{\raggedright\arraybackslash}m{5cm}|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Critérios} & \textbf{Ponderação} & \textbf{Zhejiang Petrochemical Daishan Complex} & \textbf{Hengli Petrochemical Dalian} & \textbf{Formosa Plastics Group Mailiao Complex} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Disponibilidade de Matérias-Primas & 40\% & 4,78 Mton/Ano & 3,5 Mton/Ano & 3,75 Mton/Ano \\

\hline

Fácil Acesso a Transportes & 30\% & Aeroporto; Oleodutos; Linhas Ferroviárias; Porto Industrial & Oleodutos; Linhas Ferroviárias; Porto Industrial & Oleodutos; Linhas Ferroviárias; Porto Industrial \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Existência de Fábricas de BTX & 15\% & SIM & SIM & SIM \\

\hline

Terreno & 15\% & 20 km$^2$ & 26,03 km$^2$ & 25 km$^2$ \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Soma Ponderada & - & 7.9 & 6.65 & 6.8 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Avaliação de diferentes complexos petroquímicos $^{[81-86]}$}

\label{tab:complexos\_petroquimicos}

\end{table}

\newpage

Depois da análise da tabela acima, concluiu-se que o parque industrial que reúne as melhores condições será o Zhejiang Petrochemical Daishan Complex.

O parque Formosa Plastics Group Mailiao Complex também é apresentado como uma opção a ser considerada. No entanto, é importante reconhecer alguns fatores que influenciam a não escolha deste parque. A decisão inicial de estabelecer a nova fábrica na China baseou-se, em parte, na verificação de um saldo de importações positivo, o que poderia proporcionar vantagens competitivas significativas. No entanto, o parque Formosa Plastics Group Mailiao Complex localiza-se em Taiwan, um país que apresenta uma dinâmica política e económica distinta da China continental, cujas novas tensões geopolíticas têm vindo a intensificar cada vez mais as divergências entres estes dois países. Desta forma, ainda que este complexo possa oferecer benefícios logísticos e infraestruturais atraentes, não nos parece ser a melhor opção.

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{BNBM.PNG}

\caption{Terreno da Fábrica Escolhido.}

\end{figure}

\newpage

\section{Cadeia de Valor e Evolução dos Preços}

\subsection{Matérias Primas}

A nafta, subproduto líquido da destilação do petróleo bruto, é uma matéria-prima essencial na produção de benzeno e p-xileno. Para a produção de uma tonelada de benzeno, por exemplo, são necessárias aproximadamente 8 toneladas de nafta, se considerarmos um rendimento de 12\%, cujo preço pode influenciar diretamente o custo final do produto.

Nesta secção, iremos analisar o preço da nafta considerando a sua influência direta nos custos de produção uma vez que a volatilidade dos preços da nafta pode ter um impacto significativo nestes mercados.

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{Preco da Nafta e Petroleo.jpeg}

\caption{Preço da Nafta e Petróleo}

\end{figure}

O comportamento das oscilações nos preços mensais globais da nafta entre 2012 e 2023 podem estar relacionadas com uma variada combinação de fatores. Estes incluem, mas não se limitam, à procura global, às flutuações nos preços do petróleo, eventos geopolíticos, condições económicas globais e considerações específicas da indústria petroquímica em cada ano.

Uma vez que a nafta é um derivado de petróleo, o seu preço apresenta-se como uma variável de importância central na análise dos preços deste produto.

O ano de 2012 regista preços elevados da nafta que corresponde ao acompanhamento da tendência dos altos preços do petróleo bruto nesse período. Por outro lado, em 2020 verifica-se uma queda significativa no preço global que pode ser justificado tanto pelos baixos preços do petróleo nesse ano como pelos impactos da pandemia de COVID-19 que provocou uma queda bastante acentuada na procura global por combustíveis e produtos químicos.

\newpage

\section{Tecnologias e Processo}

A seleção de tecnologias e a análise de patentes são etapas fundamentais no desenho de uma instalação industrial. Essas etapas são essenciais não apenas para otimizar a eficiência e a sustentabilidade do processo, mas também para assegurar a competitividade no mercado global. Este capítulo apresenta a metodologia e os critérios utilizados na escolha dessas tecnologias, considerando os avanços técnicos mais recentes, a viabilidade económica, a confiabilidade e a conformidade com o quadro legal das patentes e propriedade intelectual. $^{[86-88]}$

\subsection{Seleção das Tecnologias}

Na seleção de tecnologias, focamos inicialmente na identificação e análise das opções tecnológicas líderes de mercado para a produção de BTX. Fatores como rendimento, pureza do produto e consumo energético foram considerados. A pesquisa foi realizada em diferentes bases de dados dedicadas, como o Google Patents e o Espacenet da EPO (European Patent Office), juntamente com os Processes Handbooks da Hydrocarbon Processing e enciclopédias como a Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.

Simultaneamente, a pesquisa e análise de patentes desempenham um papel crucial. Elas asseguram a liberdade de operação sem infringir direitos de terceiros e fornecem informações previamente investigadas e otimizadas. Além disso, ajudam a identificar oportunidades de inovação tecnológica. A gestão estratégica de propriedade intelectual é, portanto, indispensável para salvaguardar investimentos e garantir um processo eficiente.

Este capítulo elucida as complexidades inerentes à seleção de tecnologias e gestão de patentes no âmbito do projeto de uma fábrica de BTX. Ele sublinha a importância de uma abordagem integrada e estratégica que considere tanto os aspectos técnicos quanto legais, visando maximizar o valor do projeto e contribuir para a sua viabilidade e sucesso a longo prazo.

\subsubsection{Avaliação e Escolha da Tecnologia para produção de BTX}

Na etapa de obtenção de BTX, a escolha de tecnologias foi relativamente direta. Embora existam diversos métodos para obtenção de BTX, nomeadamente a gasificação do carvão, a pirólise da Gasolina, Steam Craking e Coke recovery, nenhum destes processos consegue estar a par com a Reforma Catalítica de Nafta. Esta destaca-se como a tecnologia mais predominante à escala mundial, devido ao seu elevado rendimento e eficiência económica, mas também vasta informação de patentes e suporte técnico disponível. Mais importante, a Reforma Catalítica tem uma alta capacidade de se integrar com outras tecnologias que sejam relevantes para o processo, o que será necessário para a etapa de obtenção de Benzeno a partir de Tolueno, discutida no seguinte subcapítulo. $^{[89]}$

\begin{figure}[h!]

\centering

\begin{tikzpicture}

\pie[

radius=3, % Tamanho do gráfico

text=legend,

color={blue!70, orange, green,},

sum=auto, % Automaticamente calcula o somatório para as porcentagens

after number = \% % Adiciona o símbolo de porcentagem após o número

]{

49.32/Catalytic Reforming,

33.27/Steam Cracking,

17.41/Others

}

\end{tikzpicture}

\caption{Processo de Produção de Benzeno, 2021 (\%) $^{[90]}$ }

\label{fig:benzene\_market}

\end{figure}

\newpage

Dentro do próprio espectro da reforma catalítica, foi ponderado que tipo de reforma catalítica escolher, pois existe a Reforma Catalítica com Regeneração Contínua do Catalisador (CCR) e a Reforma Catalítica com Regeneração Semirregenerativa (SR). De acordo com a análise aos dois tipos de processo, pudemos concluir que é mais vantajoso o uso de uma Reforma Catalítica com CCR, uma vez que tem menos custos de operação e melhor rendimento global, como é evidenciado em casos de estudo.

Relativamente à escolha da patente a ser utilizada tanto como base para o nosso flowsheet, como também para a procura de informação sobre as condições de processo, surgiram a Reforma Catalítica CCR da UOP e a Reforma Catalítica da Axens. Da informação que tínhamos disponível era claro que a patente da UOP era mais vantajosa do que a da Axens, pois além de demonstrar eficiências superiores, apresenta também um bom histórico de aplicações, com 268 fábricas em 2021 a utilizarem a patente e mais 98 a serem construídas. $^{[80-81]}$

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.7\textwidth]{1.PNG}

\caption{Processo da Reforma Catalítica Contínua da UOP.}

\end{figure}

\subsubsection{Avaliação e Escolha da Tecnologia para conversão de Tolueno em Benzeno}

Durante a fase de recolha de informação relativamente às patentes mais adequadas para a secção de conversão de Tolueno para Benzeno, procedeu-se à análise de diversas patentes que tivessem em conta a compatibilidade com a Reforma Catalítica CCR e os diversos fatores críticos para uma conversão eficiente. No entanto, verificou-se que várias fontes apresentaram dados sobre as mesmas patentes que acabavam por ser contraditórios, complicando a comparação entre tecnologias.

Com estas especificações em mente, optou-se por selecionar as seguintes tecnologias: o MTDP-3 da Axens, Tatoray da UOP, Detol da Lummus Technology e o HDA da Arco e Hydrocarbon Research. Verificou-se que todos estes processos eram compatíveis com a Reforma Catalítica e que demonstravam uma grande eficiência de obtenção de Benzeno com custos operacionais competitivos. Portanto estavam perfeitamente alinhados com os nossos requisitos previamente estabelecidos.

Porém, após uma melhor análise intrínseca, concluiu-se que o MTDP-3 da Axens demonstrava um maior rendimento de Benzeno e oferecia custos operatórios semelhantes às outras patentes, sendo, portanto, um bom candidato para a integração no nosso processo. $^{[89]}$

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{2.PNG}

\caption{Processo MTDP-3 Axens. $^{[88]}$}

\end{figure}

Apesar de satisfazer os critérios selecionados, rapidamente concluiu-se que a Axens não fornecia condições de operação suficientes ao público para iniciar os balanços mássicos e energéticos do nosso projeto, e mesmo ao entrar em contacto com a empresa esta não estava disposta a fornecer a informação necessária, tornando-se assim crucial mudar de tecnologia.

Assim sendo, após uma nova reavaliação das patentes disponíveis, a escolha do processo Tatoray da UOP revelou-se extremamente benéfica, pois a patente tem inúmeras fontes de informação e estudos detalhados sobre cada passo do processo.

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{3.PNG}

\caption{Processo Tatoray da UOP. $^{[92]}$ }

\end{figure}

Assim, escolheu-se esta tecnologia para a secção de conversão de Tolueno para Benzeno, dando-se a seleção de tecnologia por completo e o processo como definido. Após algumas adaptações necessárias (adaptações estas que irão ser explicadas no seguinte capítulo), o produto final da \textit{flowsheet} foi o seguinte:

\newpage

\clearpage

\begin{landscape}

\includepdf[pages={1}, angle=90, pagecommand={}]{flowsheet.pdf}

\AddToShipoutPictureBG\*{\AtPageLowerLeft{\hspace{0.5cm}\thepage}} % Adiciona numeração da página

\end{landscape}

\newpage

\subsection{Descrição do Processo}

A produção de BTX acoplada à produção de benzeno através de tolueno envolve quatro etapas principais: regeneração catalítica continua (CCR), uma zona de extração de aromáticos, uma zona de separação e a conversão de tolueno em benzeno. Cada secção desempenha um papel crucial na refinação e na valorização da nafta em compostos aromáticos com valor comercial.

A CCR (secção 100) possui uma subsecção (secção 500) onde regenera continuamente o catalisador utilizado nos reatores de forma a garantir alta eficiência e longevidade. Nos reatores (R101) a (R104) o objetivo é converter nafta em reformado com alto teor de aromáticos. Assume-se que a nafta já foi pré tratada e entra no sistema a 390K. Inicialmente, a nafta, à qual foi adicionado hidrogénio, proveniente de uma corrente de reciclo após makeup com uma alimentação fresca, numa razão H2:HC de 2.64 (molar), passa por um permutador de calor de otimização energética (H101), onde troca calor com o efluente do reator R104, aquecendo até 717,5K. De seguida, entra no primeiro forno (F101) e logo de seguida no primeiro reator (R101). Este ciclo de aquecimento e reação é repetido quatro vezes devido à natureza endotérmica das reações, sendo necessário manter a temperatura de alimentação a 822K. No final do processo, o efluente é direcionado de volta ao permutador, saindo do mesmo a 600,6K. $^{[92]}$

Os mecanismos de reação envolvidos são: desidrogenação, que converte naftenos em aromáticos, produzindo hidrogénio; isomerização, que converte parafinas de cadeia linear em isómeros de cadeia ramificada; desidrociclização, que converte parafinas em naftenos e aromáticos; e hidrocracking e desalquilação, indesejáveis uma vez que resultam em hidrocarbonetos leve. O catalisador gasto é continuamente removido e, como dito anteriormente, direcionado para a secção 500, onde é regenerado, através da queima de depósitos de coque, e retornado aos reatores. $^{[93]}$

De seguida, o efluente entra num condensador para reduzir a sua temperatura com o objetivo de separar o hidrogénio da corrente líquida, rica em aromáticos, recorrendo a um flash (FL101). Parte deste hidrogénio vai compor a corrente de reciclo mencionada anteriormente, enquanto o restante é purgado. A corrente líquida passa então por um permutador (H201) para aumentar a sua temperatura antes de entrar no splitter (DC201). Este tem a função de separar os hidrocarbonetos leves do reformado, enquanto os componentes mais pesados procedem para uma separação adicional. Os componentes leves são enviados para o parque de tanques, onde são armazenados nos tanques T001 e T002.

A separação adicional ocorre numa coluna de extração (EC201), que extrai maioritariamente BTX (havendo também arrasto de outros componentes) com recurso a Sulfolano, um solvente organossulfurado aprótico. A corrente de refinado é purgada. O solvente, rico em BTX, é purificado numa coluna de recuperação de solvente (DC202). O extrato, constituído por uma mistura BTX, é encaminhado para a secção de separação (Secção 300). Esta secção é composta por 3 colunas de destilação, com a função de separar o BTX nos seus componentes com valor comercial. $^{[94]}$

Na primeira coluna de destilação (DC301) o benzeno e os compostos mais leves são separados do tolueno e dos compostos mais pesados. O benzeno é, logo em seguida, separado dos restantes componentes através de um Flash (FL301). Os compostos leves são direcionados para os tanques T001 e T002 enquanto o benzeno é armazenado no tanque T003. Na segunda coluna de destilação (DC302) o tolueno é separado dos C8+, sendo este tolueno utilizado como fonte de alimentação da secção seguinte (Secção 400). Na última coluna de destilação (DC303) separamos os xilenos dos C9+, que são respetivamente direcionados para os tanques T004 e T005 do parque de tanques.

O tolueno proveniente da secção de separação (Secção 300) é alimentado a um permutador de otimização energética (H401) e, logo de seguida, a um forno (H402), isto para que a sua temperatura aumente de forma a entrar no reator (R401) entre os 625K-800K. A bomba à saída da coluna DC302 garante uma pressão de 3 MPa à entrada do reator. Este processa o tolueno extraído de forma a aumentar o rendimento de benzeno e xilenos. As reações principais são o desproporcionamento e a hidrodealquilação do Tolueno. Na primeira, duas moléculas de tolueno reagem formando uma molécula de benzeno e uma de xileno, enquanto na segunda, o tolueno reage com o hidrogénio formando novamente benzeno e metano. É de salientar que a segunda reação ocorre em muito pouca extensão, pelo que a considerámos desprezável nos balanços mássicos.

O efluente do reator é alimentado ao permutador mencionado anteriormente (H401), com o objetivo de aquecer a corrente de alimentação. A corrente que sai do permutador é alimentada a um flash (FL401) de forma a separar o hidrogénio da mistura de hidrocarbonetos. A corrente líquida, rica em aromáticos, passa por um permutador (H403) e posteriormente alimentada ao splitter DC401. Este tem o objetivo de separar as cadeias leves, que são novamente direcionados para os respetivos tanques, enquanto os restantes produtos, BTX e C9+, seguem numa corrente de reciclo com vista a serem separados na Zona de Separação. $^{[92]}$

\newpage

\section{Balanços}

Os balanços de massa foram realizados com base na lei de conservação de massa (Lei de Lavoisier) e utilizando métodos iterativos para fechar a corrente de reciclo, além de métodos computacionais e de simulação (ASPEN). Foi necessário realizar um balanço global do sistema e de cada equipamento individualmente.

A nossa fábrica tem uma produção anual de 250 kton e opera continuamente 24 horas por dia, seguindo um regime de ano comercial de 350 dias por ano. Os restantes 15 dias são destinados a limpeza e manutenção.

Dessa forma, a produção horária da fábrica é de 29,76 kton.

De seguida é apresentado o flowsheet simplificado de forma a ser mais fácil a visualização das várias secções do processo.

\subsection{Folhas de Balanço}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{20.PNG}

\caption{Folha de Balanços Reator.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{22.PNG}

\caption{Folha de Balanços da Bomba e Tubagens.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{21.PNG}

\caption{Folha de Balanços Permutador de Calor.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{23.PNG}

\caption{Folha de Balanços da Coluna de Destilação.}

\end{figure}

\newpage

\clearpage

\begin{landscape}

\includepdf[pages={1}, angle=90, pagecommand={}]{flowsheet\_simpl.pdf}

\AddToShipoutPictureBG\*{\AtPageLowerLeft{\hspace{0.5cm}\thepage}} % Adiciona numeração da página

\end{landscape}

\newpage

\section{Materiais}

A seleção dos materiais de construção em projetos de engenharia é fundamental de forma a garantir um bom desempenho dos equipamentos, durabilidade e relação custo-benefício de um produto ou processo. Este processo de seleção de materiais envolve várias etapas que requerem uma consideração cuidadosa dos requisitos e propriedades dos materiais.

A seleção destes materiais pelos engenheiros é feita com base em vários fatores, entre eles: propriedades físicas, químicas e mecânicas, condições de operação, nomeadamente, pressão e temperatura, custos do material de forma a haver uma boa relação preço-qualidade, e composição e reatividade das substâncias presentes no processo. $^{[106]}$

Um dos materiais mais utilizados na indústria química é o aço por ser bastante versátil. Existem vários tipos de aço sendo os de carbono e os inoxidáveis os mais comuns, representando 90\% da produção total de aço. Estes dois tipos de aço são ligas metálicas que possuem a mesma base de constituintes químicos, carbono e ferro, sendo que a principal diferença entre eles reside na variação de outros metais adicionados, como o níquel, o titânio e o molibdénio, que vão influenciar positivamente as suas propriedades. $^{[107]}$

O aço inoxidável oferece uma grande vantagem em termos de resistência, dureza e resistência à corrosão, devido ao alto teor de crómio e baixo teor de carbono. Desta forma, ele é indicado para o uso em ambientes corrosivos ou húmidos uma vez que está livre de oxidação. Dentro da família dos aços inoxidáveis os mais utilizados são o 304 e o 316. O aço inoxidável 304 é bastante durável e fácil de moldar enquanto o 316 oferece uma grande resistência a produtos químicos, o que o torna uma escolha muito usada pelos fabricantes. $^{[108]}$

Por outro lado, o aço de carbono é consideravelmente mais barato que o inoxidável sendo o seu uso mais adequado para estruturas grandes como vigas, chapas de aço laminadas e tubos. No entanto, oferece pouca resistência à corrosão e oxidação pelo que não é recomendado o seu uso em equipamentos com água. $^{[109]}$

Uma vez que neste processo a maior parte dos equipamentos está em contacto direto com o hidrogénio, foi escolhido o aço inoxidável 316 para os equipamentos dimensionados. Desta forma, a probabilidade de o hidrogénio degradar o material, uma vez que este interage com a matriz metálica dos metais, é mínima.

\newpage

\section{Dimensionamentos}

Dimensionou-se quatro equipamentos: um reator (R401), uma bomba (P301) com as respetivas tubagens, um permutador (H402) e uma coluna de destilação (DC302).

\subsection{Reator}

O reator dimensionado foi o reator catalítico de leito fixo (R401), do processo do Tatoray. As reações que ocorrem no seu interior são o desproporcionamento do tolueno como reação primária e a reação de hidrodealquilação do Tolueno, que é considerada uma reação secundária que se dá em menor extensão, além de outras, menos relevantes. $^{[94]}$

\begin{equation}

2T \rightarrow B + X

\end{equation}

Esta reação é considerada endotérmica tendo uma conversão de 54\%. Como observado na seguinte equação é formada 1 mol de Benzeno e 1 mol de Xileno, este último decomposto nos seus três isómeros (orto-xileno, meta-xileno e para-xileno).

No dimensionamento deste equipamento apenas foi tida em conta a reação de desproporcionamento do Tolueno uma vez que a reação de hidrodealquilação é pouco significativa, refletindo apenas 5\% de conversão. Esta reação secundária é dada por:

\begin{equation}

T + H\_2 \rightarrow \mathrm{CH}\_4

\end{equation}

No processo de reação foi escolhido o catalisador zeolítico de aluminossilicato (ZSM-5) pois apresenta características relevantes para o eficaz dimensionamento do reator. Este catalisador possui uma alta maturidade tecnológica por ser bastante utilizado na área da engenharia, havendo assim um estudo aprofundado e diversificado de conhecimento sobre as suas propriedades e comportamento. O ZSM-5 apresenta um custo competitivo comparado com os custos de outros catalisadores existentes no mercado. O uso deste catalisador é indicado para uso em larga escala industrial pois apresenta um tempo de vida elevado, superior a 2 anos. Na presença de alguma eventual falha no reator, o catalisador demonstra grande resistência à sua desativação.

O reator de desproporcionamento, posicionado verticalmente, opera continuamente a uma temperatura de 400ºC e a uma pressão de 30 bar. A corrente de alimentação S403, pura em Tolueno, entra na parte superior do reator, juntamente com a corrente S411, pura em hidrogénio. Ao longo da coluna não são registadas variações de pressão e temperatura significativas, devido à natureza da reação. Devido a este facto, o processo foi considerado adiabático o que justifica a não utilização de tubos no seu interior. $^{[95]}$

Em relação à geometria do reator, optou-se por uma geometria elipsoidal na base e no topo e cilíndrica no corpo, sendo o material de construção o aço inoxidável 316. $^{[96]}$ Inicialmente, a geometria torisférica foi uma opção a ser considerada, porém esta geometria costuma ser projetada para pressões até 15 bar. Uma vez que a condição de pressão do reator é de 30 bar, esta geometria não foi considerada, por não ser viável no processo. $^{[97]}$

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{4.PNG}

\caption{Geometria do Topo e da Base.}

\end{figure}

Posto isto, a geometria elipsoidal foi a escolha final, pois o seu custo-benefício é bastante atrativo, devido à sua capacidade de aguentar elevadas pressões a um preço relativamente baixo a comparar com outras formas geométricas disponíveis no mercado. $^{[97-98]}$ $^{[101]}$

Os resultados obtidos para o dimensionamento da geometria do reator foram os seguintes:

\begin{table}[h!]

\centering

\begin{tabular}{|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Propriedades} & \textbf{Unidades} & \textbf{R-401} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} L/D & - & 4 \\

\hline

Tempo de residência & h & 0,5 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Massa do catalisador & ton & 42,3 \\

\hline

$D\_{\text{real}}$ & m & 2,9 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} $L\_{\text{real}}$ & m & 11,8 \\

\hline

$V\_{\text{total}}$ & m$^3$ & 73,3 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} $V\_{\text{catalisador}}$ & m$^3$ & 60,5 \\

\hline

$V\_{\text{vazio}}$ & m$^3$ & 42,1 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} $V\_{\text{reação}}$ & m$^3$ & 66,6 \\

\hline

$V\_{\text{base/topo}}$ & m$^3$ & 3,4 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} $L\_{\text{base/topo}}$ & m & 0,7 \\

\hline

Espessura da parede & m & 0,05 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Espessura base/topo & m & 0,02 \\

\hline

Sobresspressão de corrosão & m & 0,002 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Pressão total & bar & 30 \\

\hline

Pressão Operatória & bar & 33 \\

\hline

\end{tabular}

\caption{Tabela de propriedades do R-401}

\label{tab:r401}

\end{table}

\subsection{Permutador}

Os permutadores de calor são equipamentos concebidos para facilitar a transferência de energia térmica entre dois fluidos, permitindo a passagem de calor de uma corrente quente para uma corrente fria através de uma interface metálica. A configuração mais comum para estes equipamentos no setor industrial é a Shell and Tube, devido à sua flexibilidade de design e à capacidade de operar sob uma ampla gama de pressões e temperaturas. Neste projeto, foram utilizados permutadores de calor do tipo Shell and Tube. $^{[97]}$

Os permutadores Shell and Tube consistem num conjunto de tubos situados no interior de um corpo cilíndrico, onde um dos fluidos circula dentro dos tubos e o outro circula no espaço entre os tubos e o corpo cilíndrico.

A escolha das configurações dos equipamentos foi feita com base nas configurações TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association). $^{[98]}$

O permutador que decidimos dimensionar foi o permutador (H402) que os seus valores de dimensionando dependem dos valores de temperatura vindos da coluna de destilação (DC302) e do reator (R401).

Os resultados obtidos no dimensionamento do permutador são mostrados na seguinte tabela:

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|l|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Propriedades} & \textbf{Unidades} & \textbf{H402} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Coeficiente global de transferência de calor, $U\_o$ & W/m$^2\degree$C & 462.45 \\

\hline

Calor Transferido, $Q$ & kW & 4666.67 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Área de Transferência de Calor, $A$ & m$^2$ & 82.08 \\

\hline

Número de Tubos & - & 214 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Comprimento dos Tubos, $L$ & m & 4.88 \\

\hline

Diâmetro Interno dos Tubos, $d\_i$ & m & 0.021 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Diâmetro Externo dos Tubos, $d\_o$ & m & 0.025 \\

\hline

Diâmetro do Corpo no Permutador, $D\_s$ & m & 0.522 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Número de Chicanas $N\_b$ & - & 8 \\

\hline

Velocidade no Corpo, $u\_s$ & m/s & 5.22 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Velocidade do Fluido dentro do Tubo, $u\_{tubo}$ & m/s & 1.33 \\

\hline

Coeficiente de Transferência de Calor nos Tubos, $h\_i$ & W/m$^2$K & 3081.88 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Coeficiente de Transferência de Calor no Corpo, $h\_s$ & W/m$^2$K & 821.72 \\

\hline

Perda de Carga nos Tubos & bar & 0.23 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Perda de Carga no Corpo & bar & 0.16 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Propriedades do Permutador de Calor H402}

\label{tab:permutador\_h402}

\end{table}

\subsection{Bomba}

O dimensionamento da bomba e das tubagens foi realizado simultaneamente, uma vez que ambos dependem um do outro. No início dos cálculos, foi necessário obter valores de propriedades físicas das correntes, tais como caudal volumétrico, densidade, viscosidade e pressão de vapor, utilizando o software Aspen Plus. Com base nesses dados, foi possível realizar o dimensionamento adequado, garantindo que o sistema opera de forma eficiente e segura.

Nem sempre os fluidos conseguem circular no sentido desejado ou nas condições exigidas pelo processo. Portanto, é essencial utilizar uma bomba que converta a energia elétrica do motor em energia cinética, assegurando um transporte eficiente. $^{[97]}$

A tabela abaixo apresenta as propriedades das correntes de fluido que percorrem as tubagens.

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Corrente} & \textbf{Temperatura (°C)} & \textbf{Estado Físico} & \textbf{Massa Específica (kg/m$^3$)} & \textbf{Viscosidade (Pa.s$^{-1}$)} & \textbf{$Q\_v$ (m$^3$/h)} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} S-323 & 110 & Líquido & 867 & 0.00024 & 88.102 \\

\hline

S-401 & 110 & Líquido & 867 & 0.00024 & 88.102 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} S-403 & 400 & Gasoso & 67 & 0.000015 & 1140.07 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Propriedades das correntes de fluido nas tubagens}

\label{tab:propriedades\_correntes}

\end{table}

A partir destes dados, foi possível determinar as necessidades específicas de cada corrente.

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Corrente} & \textbf{$A\_s$ (m$^2$)} & \textbf{u (m/s)} & \textbf{di (m)} & \textbf{L (m)} & \textbf{$\Delta P\_f$ (bar)} & \textbf{$\Delta P\_{\text{total}}$ (bar)} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} S-323 & 0.02 & 1.5 & 0.14 & 20 & 0.05 & 43.62 \\

\hline

S-401 & 0.01 & 2.5 & 0.11 & 60 & 0.50 & \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} S-403 & 0.02 & 25 & 0.16 & 20 & 0.22 & \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Propriedades das correntes de fluido nas tubagens}

\label{tab:propriedades\_correntes}

\end{table}

Com base nos dados obtidos, foi possível dimensionar a bomba adequadamente e alcançar os seguintes resultados.

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Bomba} & \textbf{Head (m)} & \textbf{$P\_H$ (kW)} & \textbf{$P\_{eixo}$ (kW)} & \textbf{$P\_{\text{elétrico}}$ (kW)} & \textbf{$P\_{\text{sucção}}$ (bar)} & \textbf{$P\_{\text{descarga}}$ (bar)} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} P301 & 174.13 & 36.25 & 63.03 & 45.31 & 1.69 & 44.61 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Propriedades da Bomba P301}

\label{tab:bomba\_p301}

\end{table}

\subsection{Coluna de Destilação}

Foi escolhido em primeiro lugar o tipo de coluna, sendo as nossas escolhas: de enchimento ou por pratos. Usou-se uma coluna de destilação por pratos sendo o tipo de pratos perfurados (Sieve) pois são relativamente simples de em desgin e construção, são ideais para aplicações industriais com grandes volumes, tendo também uma boa eficiência de transferência de massa. Os diâmetros de orifícios considerados foram entre 3mm a 12mm, sendo o escolhido de 4.5mm e também o mais utilizado na indústria química.

As geometrias possíveis para os orifícios dos pratos são a quadrangular ou triangular, dos quais a transferência de massa é melhor para a geometria triangular.

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{DC1.PNG}

\caption{Geometria dos Pitch.}

\end{figure}

Com a geometria triangular dos orifícios, os orifícios encontram-se nos vértices dos triângulos e as distâncias entre o centro de cada orifício é denominado por pitch (p), que costuma apresentar valores entre 2 e 5 vezes o valor do diâmetro do orifício (do).

Dentro da coluna circulam duas correntes em contracorrente e em contacto permanente: uma, de vapor ascendente, e, outra de líquido descendente.

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.4\textwidth]{DC2.PNG}

\caption{Diagrama da Coluna de Destilação.}

\end{figure}

A corrente líquida descendente é necessária para o processo de retificação do vapor que sobe. Esta corrente é garantida, reciclando para a coluna parte do destilado que é obtido no condensador existente no seu topo. Do mesmo modo, para promover a retificação do líquido existente no fundo da coluna designado por resíduo, este é parcialmente vaporizado num ebulidor e reenviado para a coluna.

De modo a evitar problemas de funcionamento e garantir uma hidrodinâmica adequada, o caudal líquido e de vapor não devem ser nem excessivos, nem insuficientes. Para garantir que não exista gotejamento, inundação ou arrastamento. O fenómeno de inundação ocorre quando a velocidade de vapor ($v\_{op}$) é muito elevada, o fenómeno de gotejamento ocorre quando a ($v\_{op}$) é demasiado baixa. O fenómeno de arrastamento ocorre quando a arrastamento acontece quando a ($v\_{op}$) é um pouco mais elevada do que era suposto e arrasta o líquido do prato inferior para o superior. Esses limites são mostrados no seguinte gráfico. $^{[100]}$

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.45\textwidth]{DC3.PNG}

\caption{Limites de Funcionamento.}

\end{figure}

Os resultados obtidos no dimensionamento da coluna de destilação são mostrados na seguinte tabela:

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|>{\columncolor[gray]{1.0}}l|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \multicolumn{1}{|c|}{\textbf{Propriedades}} & \textbf{Unidades} & \textbf{DC302} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} Caudal Mássico do Líquido & kg/h & 484758.04 \\

Caudal Mássico do Gás & kg/h & 443144.84 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Massa Específica do Líquido & kg/m$^3$ & 788.361 \\

Massa Específica da Mistura & kg/m$^3$ & 0.5 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Massa Específica do Gás & kg/m$^3$ & 2.88 \\

Tensão Superficial & N/m & 0.2353 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Viscosidade do Gás & cP & 0.00895 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \multicolumn{3}{|c|}{\textbf{Resultados}} \\

\hline

Diâmetro & m & 3.53 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Altura & m & 22.55 \\

Diâmetro dos Orifícios & m & 0.0045 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Pitch, p & m & 0.01125 \\

Comprimento do Dique, w & m & 2.47 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Espessura do Prato, l & m & 0.002 \\

Espaçamento entre Pratos, t & m & 0.75 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Parâmetro de Fluxo, $\Psi$ & - & 0.0066 \\

Constante de Inundação, C$\_f$ & - & 0.36 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Velocidade Operatória do Vapor, v$\_{op}$ & m/s & 4.79 \\

Área de Passagem do Vapor, A$\_n$ & m$^2$ & 8.93 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Área Total da Secção Reta, A$\_T$ & m$^2$ & 9.8 \\

Área Ativa, A$\_a$ & m$^2$ & 8.07 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Área Total dos Orifícios, A$\_o$ & m$^2$ & 1.17 \\

Velocidade de Vapor nos Orifícios, v$\_o$ & m/s & 36.5 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Velocidade Mínima para não Ocorrer Gotejamento, v$\_{ow}$ & m/s & 3.93 \\

Perda de Carga Total & bar & 1.23 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Nº de Pratos Teóricos & - & 27 \\

Eficiência & \% & 100 \\

\rowcolor[gray]{0.9} Nº de Pratos Reais & - & 27 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Propriedades e Resultados do DC302}

\label{tab:dc302}

\end{table}

\newpage

\section{Investimento}

\noindent\textbf{Equipamentos Base}\\

O investimento fixo de um projeto de engenharia representa as despesas iniciais que são necessárias para adquirir os equipamentos, as instalações industriais com a respetiva montagem e o projeto. O facto de serem investimentos fixos, significa que as despesas são necessárias independentemente do valor da capacidade operacional. O investimento fixo engloba duas parcelas: os custos diretos e os custos indiretos.

Os custos diretos referem-se às despesas que podem ser atribuídas diretamente a um determinado projeto e incluem o valor dos equipamentos base e respetiva montagem, com as tubagens, utilidades e serviços, instrumentação e controlo, terreno e preparação do terreno, edifícios, instalações elétricas e isolamentos térmicos. Os custos indiretos englobam os custos do projeto e a sua fiscalização, despesas de empreitada e provisão para imprevistos.

A estimativa do custo dos equipamentos foi feita tendo em consideração os valores calculados pela equação de custo de equipamento baseada em fatores de Guthrie e por equações de dimensionamento estabelecidas, bem como os valores fornecidos por três programas de simulação, ASPEN-PLUS, Matches e Capcost. No programa Matches foram atribuídos valores dos pesos estimados de alguns equipamentos para a realização da simulação de custo. $^{[102-103]}$

Com base nos valores dados pelos métodos e pelos simuladores, estimou-se o valor final dos custos de cada equipamento, realizando-se a média e o desvio padrão dos valores fornecidos para a estimativa de um intervalo de confiança. Ao fazer esta estimativa, podemos descartar outliers e realizar a média para obter uma aproximação dos custos finais, tendo em consideração os valores válidos (valores dentro do intervalo de confiança). $^{[104]}$

É de referir que os valores obtidos pela equação de Guthrie e pelas equações de dimensionamento estabelecidas, foram apenas tidos em conta de modo a aumentar o número de amostras para o cálculo do intervalo de confiança, de modo a torná-lo mais fidedigno. Para a estimativa do valor final, estes dois métodos foram descartados uma vez que são menos rigorosos e têm em conta poucos fatores na sua estimativa.

De forma a obtermos a estimativa dos valores dos custos para o presente ano, de modo a ter em consideração a inflação, é necessário atualizar os valores através da seguinte fórmula: $^{[105]}$

\begin{equation}

\frac{C\_{\text{Ano presente}}}{C\_{\text{Ano passado}}} = \frac{I\_{\text{Ano presente}}}{I\_{\text{Ano passado}}}

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(C\_{\text{Ano presente}}\) – Custo do equipamento para o presente ano;

\item \(C\_{\text{Ano passado}}\) – Custo do equipamento para o ano passado;

\item \(I\_{\text{Ano presente}}\) – Inflação para o presente ano;

\item \(I\_{\text{Ano passado}}\) – Inflação para o ano passado.

\end{itemize}

Assim, o valor da estimativa do preço dos equipamentos foi calculado e podem ser visualizados na seguinte tabela, sendo que os valores assinalados são aqueles que foram descartados no cálculo final.

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|l|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{K\$} & \textbf{Equação de Guthrie} & \textbf{Equação de dimensionamentos} & \textbf{ASPEN} & \textbf{Matches} & \textbf{Capcost} & \textbf{Limite inferior} & \textbf{Limite superior} & \textbf{Valor final} \\

\hline

\rowcolor[gray]{1.0} Coluna & 4384 & 1546 & 2556 & 1389 & 2178 & 1015 & 2646 & 2041 \\

Permutador & 299 & 132 & 18 & 270 & 209 & 119 & 348 & 240 \\

\rowcolor[gray]{1.0} Bomba & 139 & 58 & 172 & 26 & 66 & 26 & 171 & 46 \\

Reator & 1553 & 152 & 419 & 1060 & 4466 & 278 & 1743 & 740 \\

\hline

\rowcolor[gray]{1.0} Total & 6375 & 1888 & 3165 & 2745 & 6919 & - & - & 3066 \\

CEPCI & 2007 & 2001 & 2019 & 2014 & 2017 & - & - & - \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Custo dos Equipamentos com Diferentes Métodos}

\label{tab:custos\_equipamentos}

\end{table}

\noindent\textbf{Método dos Fatores}\\

O método dos fatores para a estimativa do investimento fixo é feito com base em estimativas preliminares das várias parcelas do investimento fixo. Este método baseia-se no somatório dos custos diretos e indiretos sendo que a cada parcela é atribuída uma percentagem sobre o custo do equipamento base. A equação utilizada foi a seguinte:

\begin{equation}

I\_F = [C\_{EB}(1 + f\_2 + \ldots + f\_9) + C\_D(f\_1^\prime + f\_2^\prime)](1 + f^{\prime\prime})

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(I\_F\) – Investimento fixo (USD);

\item \(C\_{EB}\) – Custo de equipamento base (USD);

\item \(f\_2 \ldots f\_9\) – Percentagens sobre o custo de equipamento base;

\item \(C\_D\) – Custos diretos (USD);

\item \(f\_1^\prime\) – Percentagem para o custo do projeto e respetiva fiscalização;

\item \(f\_2^\prime\) – Percentagem para o custo de empreitada;

\item \(f^{\prime\prime}\) – Percentagem sobre os custos diretos e indiretos para calcular a previsão de imprevistos.

\end{itemize}

Obtivemos os seguintes resultados para os custos diretos, indiretos e para o investimento fixo.

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|l|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{k\$} & \textbf{Custos Diretos} & \textbf{Custos Indiretos} & \textbf{Investimento Fixo} \\

\hline

\rowcolor[gray]{1.0} Valor (k\$) & 6428 & 3299 & 11186 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Resultados para os custos diretos, indiretos e para o investimento fixo}

\label{tab:custos\_investimento\_fixo}

\end{table}

\noindent\textbf{Custo de Produção}\\

O custo de produção tem em conta duas parcelas, o custo de fabrico e as despesas gerais, que é calculado pela seguinte equação:

\begin{equation}

C\_{\text{produção}} = C\_{\text{fabrico}} + DG

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(C\_{\text{produção}}\) – Custo de produção (USD);

\item \(C\_{\text{fabrico}}\) – Custo de fabrico (USD);

\item \(DG\) – Despesas Gerais (USD).

\end{itemize}

Obtivemos os seguintes resultados para os custos diretos, indiretos, fixos e de fabrico:\\

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|l|c|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{k\$} & \textbf{Custos Diretos} & \textbf{Custos Indiretos} & \textbf{Custos Fixos} & \textbf{Custos de Fabrico} \\

\hline

\rowcolor[gray]{1.0} Valor (k\$) & 597616 & 1345 & 1825 & 601108 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Resultados para os custos diretos, indiretos, fixos e de fabrico}

\label{tab:custos\_producao}

\end{table}

Desta forma, obteve-se os custos de produção a partir dos custos de fabrico e das despesas gerais:

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|l|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{k\$} & \textbf{Custos de Fabrico} & \textbf{Despesas Gerais} & \textbf{Custos de Produção} \\

\hline

\rowcolor[gray]{1.0} Valor (k\$) & 601108 & 1491 & 603122 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Resultados para os custos de fabrico, despesas gerais e custos de produção}

\label{tab:custos\_producao\_final}

\end{table}

Obteve-se o valor de 3 k\$/ton tendo em consideração o valor adaptado da matéria-prima nos cálculos do custo de fabrico. Esta adaptação do valor da matéria-prima foi feita com base numa aproximação das percentagens dos caudais de saída de cada componente que constitui a nafta no processo.

Se for excluído este fator nos cálculos, o valor diminui para 0,04k\$, o que sugere que o custo das matérias-primas influencia bastante o custo de produção.

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|>{\centering\arraybackslash}m{3cm}|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Valor de matéria prima real (k\$)} & \textbf{Valor matéria prima adaptado (k\$)} & \textbf{Valor total Benzeno (k\$)} & \textbf{Valor total Xileno (k\$)} & \textbf{Receita (k\$)} & \textbf{Lucro (k\$)} & \textbf{Receita/CP\textsubscript{adaptado}} & \textbf{Receita/CP\textsubscript{real}} \\

\hline

\rowcolor[gray]{1.0} 1163696 & 592937 & 324010 & 801845 & 1125855 & 524014 & 97\% & 96\% \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Resultados financeiros $^{[110-112]}$}

\label{tab:resultados\_financeiros}

\end{table}

De forma a calcular a viabilidade do processo, procedeu-se ao cálculo do valor em dólares por ano de benzeno e do p-xileno. Para o efeito, utilizou-se o preço destes compostos em dólares por kg os quais foram multiplicados pela produção anual destes mesmos. De seguida, com a diferença dos valores de receita e custos de produção, obteve-se um lucro de 524 M\$. Este valor mostra-se alto o suficiente para concluirmos que a fábrica é bastante rentável.

De forma a verificar a credibilidade deste lucro elevado, decidiu-se proceder ao cálculo da razão entre a receita e os custos de produção, tendo este valor demonstrado que a receita consegue colmatar o custo de produção em 96,75\%. Uma vez que este valor se mostrou extremamente elevado procedeu-se em seguida ao cálculo da razão entre a receita e os custos de produção, substituindo nesta última o valor das matérias primas adaptado pelo valor das matérias primas real, demonstrado que a receita consegue colmatar o custo de produção em 96\%. Como estes valores são bastante semelhantes então conclui-se que de facto temos um bom lucro do processo.

\newpage

\section{Referências}

\begin{itemize}

\item [1] \url{https://www.sigmaaldrich.com/PT/en/product/sial/401765}

\item [2] \url{https://www.sigmaaldrich.com/PT/en/product/sial/900522}

\item [3] \url{https://www.sigmaaldrich.com/PT/en/product/sial/95680}

\item [4] \url{https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\_lang=pt&p\_card\_id=1381&p\_version=2}

\item [5] \url{https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\_card\_id=0001&p\_version=1&p\_lang=pt}

\item [6] \url{https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\_lang=pt&p\_card\_id=0015&p\_version=2}

\item [7] \url{https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p\_lang=pt&p\_card\_id=0086&p\_version=2}

\item [8] \url{http://www.chemicalland21.com/petrochemical/p-XYLENE.htm}

\item [9] \url{https://www.researchgate.net/publication/288477593\_Xylenes\_Production\_technologies\_and\_uses}

\item [10] \url{https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/xylenes-chemical-economics-handbook.html}

\item [11] \url{https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/xylenes-chemical-economics-handbook.html}

\item [12] \url{https://www.chemanalyst.com/industry-report/mixed-xylene-market-59}

\item [13] \url{https://mcgroup.co.uk/researches/benzene}

\item [14] \url{https://basic-chemistry.eu5.org/Folder1/61-Benzene.html}

\item [15] \url{https://www.linkedin.com/pulse/applications-benzene-alchemiindia/}

\item [16] \url{https://www.chemanalyst.com/industry-report/mixed-xylene-market-59}

\item [17] \url{https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/2871/1/DM\_DianaMachado\_2009\_MEQ-1.pdf}

\item [18] \url{https://uop.honeywell.com/en/industry-solutions/petrochemicals/aromatics-recovery}

\item [19] Box, G.E.P., & Jenkins, G.M. (1976). "Time Series Analysis: Forecasting and Control." Holden-Day.

\item [20] \url{https://app.indexbox.io/table/290220/155/}

\item [21] \url{https://comtradeplus.un.org/}

\item [22] \url{https://oec.world/en/profile/hs/benzene}

\item [23] \url{https://oec.world/en/profile/hs/p-xylene}

\item [24] \url{https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/paraxylene-px-market}

\item [25] \url{https://www.expertmarketresearch.com/reports/paraxylene-market}

\item [26] \url{https://www.shell.com/business-customers/chemicals/manufacturing-locations.html#}

\item [27] \url{https://www.chemanalyst.com/NewsAndDeals/NewsDetails/european-benzene-prices-falls-in-april-2024-amidst-feedstock-cost-decline-27554}

\item [28] \url{https://www.icis.com/explore/resources/h2-2023-europe-benzene/}

\item [29] \url{https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-decarbonisation-options-for-exxonmobil-chemicals-rotterdam-4230.pdf}

\item [30] \url{https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/investors/bp-foi-2006-2010-refining-and-marketing.pdf}

\item [31] \url{https://www.spglobal.com/commodityinsights/es/market-insights/latest-news/chemicals/122022-global-spot-activity-for-benzene-styrene-set-to-ramp-up-in-h1-2023}

\item [32] \url{https://www.indexbox.io/store/world-p-xylene-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/}

\item [33] \url{https://www.indexbox.io/}

\item [34] \url{https://cen.acs.org/business/petrochemicals/China-aromatics-building-boom-rattles-the-petrochemical-industry/102/i8}

\item [35] \url{https://www.chemanalyst.com/industry-report/benzene-market-56}

\item [36] \url{https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/chemicals/112723-chinas-petrochemicals-market-sees-headwinds-in-h1-2024-amid-property-sector-woes}

\item [37] \url{https://oec.world/en/profile/bilateral-product/benzene/reporter/chn?redirect=true}

\item [38] \url{https://intl.sci99.com/annualreport/samplereport.aspx?id=33295}

\item [39] \url{https://www.researchandmarkets.com/report/china-benzene-market}

\item [40] \url{https://app.indexbox.io/report/292910/156/}

\item [41] \url{https://oec.world/es/profile/country/chn}

\item [42] \url{https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/benzene-market/market-trends}

\item [43] \url{https://www.indexbox.io/store/south-eastern-asia-p-xylene-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/}

\item [44] \url{https://www.researchandmarkets.com/reports/3150636/paraxylene-2024-world-market-outlook-up-to-2033}

\item [45] \url{https://www.hanwha.com/newsroom/news/press-releases/hanwha-groups-petrochemical-business-aims-to-become-a-global-leader.do}

\item [46] Annual Report 2014 | PTT Global Chemical (pttgcgroup.com)

\item [47] \url{https://totalenergies.com/media/news/press-releases/projet-de-developpement-industriel-majeur-sur-le-site-petrochimique-de-samsung-total-petrochemicals}

\item [48] \url{ココロも満タンに　コスモエネルギーホールディングス (cosmo-energy.co.jp)}

\item [49] Hyundai Cosmo Petrochemical celebrate their new para-xylene production plant (digitalrefining.com)

\item [50] Hyundai Chemical Expands South Korean Petrochemical Complex Using Modular Equipment And Technology From Honeywell UOP

\item [51] \url{Hyundai Oilbank to expand aromatics capacity | Latest Market News (argusmedia.com)}

\item [52] \url{Announcement of conclusion of basic contract for acquisition of petrochemicals manufacturing equipment | List of news releases | Idemitsu Kosan}

\item [53] \url{ExxonMobil in Singapore}

\item [54] \url{SK Stops Operation of Chemical Plant in Singapore to Cope with Oil Price Drop - Businesskorea}

\item [55] \url{Introduction (thaioilgroup.com)}

\item [56] \url{Indonesia’s petrochemical plant to produce 780,000 tons of paraxylene annually by 2022 - Indonesia Window}

\item [57] \url{15 Paraxylene OUT FINAL (petronas.com)}

\item [58] \url{Petrochemicals complex profile: Hanwha Total Petrochemicals Daesan Complex, South Korea (offshore-technology.com)}

\item [59] \url{South Korean producers shut PX units for turnarounds | Latest Market News (argusmedia.com)}

\item [60] \url{SK Global Chemical Company Ulsan Complex, South Korea (offshore-technology.com)}

\item [61] \url{SK Global Chemical rebrands as SK Geo Centric | Latest Market News (argusmedia.com)}

\item [62] \url{Aromatics < Business | GSCaltex}

\item [63] \url{Aromatics – Paraxylene, Ortho Xylene, Benzene, Linear Alkyl Benzen (ril.com)}

\item [64] \url{https://investor.exxonmobil.com/}

\item [65] \url{https://www.macrotrends.net/global-metrics/countries/eur/europe/population-growth-rate}

\item [66] \url{https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/benzene-chemical-economics-handbook.html}

\item [67] \url{https://www.chemanalyst.com/}

\item [68] \url{https://www.indexbox.io/store/europe-p-xylene-market-analysis-forecast-size-trends-and-insights/}

\item [69] \url{https://www.census.gov/newsroom/press-releases/2023/population-projections.html}

\item [70] \url{https://population.un.org/wpp/}

\item [71] \url{https://ourworldindata.org/}

\item [72] Cyclic hydrocarbons; mixed xylene isomers - Northern America - Table - IndexBox Platform

\item [73] US Capacity Utilization: Chemical Manufacturing Quarterly Analysis: G.17 Industrial Production and Capacity Utilization | YCharts

\item [74] Indorama Ventures Xylenes & PTA | Indorama Ventures

\item [75] \url{bp agrees to sell its petrochemicals business to INEOS | News and insights | Home}

\item [76] \url{Manufacturing locations | Shell Global}

\item [77] Petrochemicals complex profile: Flint Hills Resources Corpus Christi Complex, the US (offshore-technology.com)

\item [78] \url{https://www.chemanager-online.com/en/news/chevron-phillips-close-px-unit-mississippi}

\item [79] \url{https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9304986/}

\item [80] \url{https://www.offshore-technology.com/data-insights/top-ten-active-petrochemical-complexes-in-asia/?cf-view&cf-closed}

\item [81] \url{https://global.hengli.com/article/43}

\item [82] \url{http://file.finance.sina.com.cn/211.154.219.97:9494/MRGG/CNSESH\_STOCK/2021/2021-952021-09-03/7522191.PDF}

\item [83] \url{https://www.offshore-technology.com/data-insights/zhejiang-petrochemical-daishan-complex-china/?cf-view}

\item [84] \url{http://www.xinhuanet.com/english/2019-05/17/c\_138067507.htm}

\item [85] \url{http://en.ht-st.com/site/casedetail/139}

\item [86] \url{https://patents.google.com/}

\item [87] \url{https://worldwide.espacenet.com/}

\item [88] \url{https://www.nxtbook.com/nxtbooks/gulfpub/petrochemical\_processes\_handbook\_2021\_v2/}

\item [89] Wiley-VCH. (2005). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (Vol. 1-40). Wiley-VCH.

\item [90] \url{https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/benzene-market-report}

\item [91] PERP Report Benzene/Toluene (2007).

\item [92] Treese, S. A., Pujadó, P. R., & Jones, D. S. J. (2015). Handbook of petroleum processing. Handbook of Petroleum Processing, 1, 1–1913.

\item [93] Babaqi, B. S., Takriff, M. S., Othman, N. T. A., & Kamarudin, S. K. (2020). Yield and energy optimization of the continuous catalytic regeneration reforming process based particle swarm optimization. Energy, 206.

\item [94] Ali, M. A., Haji, S., Al-Khayyat, M., Abutaleb, A., & Ahmed, S. (2022). Kinetic modeling and thermodynamic analysis of toluene disproportionation reaction over ZSM-5 based catalysts. Catalysis Communications, 172.

\item [95] Tsai, T.-C., Liu, S.-B., & Wang, I. (n.d.). Disproportionation and transalkylation of alkylbenzenes over zeolite catalysts.

\item [96] Ali, M. A., Haji, S., Al-Khayyat, M., Abutaleb, A., & Ahmed, S. (2022). Kinetic modeling and thermodynamic analysis of toluene disproportionation reaction over ZSM-5 based catalysts. Catalysis Communications, 172. \url{https://doi.org/10.1016/j.catcom.2022.106541}

\item [97] Sinnott, R. K. (2005). Chemical Engineering Design (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

\item [98] \url{https://www.zeolyst.com/our-products/standard-zeolite-powders/zsm-5.html}

\item [99] \url{https://tema.org/}

\item [100] Alves, A. M. B., & Azevedo, E. G. de. (2022). Engenharia de Processos de Separação (4ª ed.). Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia, 27.

\item [101] Richardson, J. F., Harker, J. H., & Backhurst, J. R. (2002). Coulson and Richardson's Chemical Engineering: Volume 2: Particle Technology and Separation Processes (5th ed.). Butterworth-Heinemann.

\item [102] \url{https://www.matche.com/equipcost/EquipmentIndex.html}

\item [103] Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., Shaeiwitz, J. A., & Bhattacharyya, D. (2012). Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes (4th ed.). Prentice Hall.

\item [104] Tabela da função de distribuição Normal reduzida, fct unl

\item [105] Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). Plant Design and Economics for Chemical Engineers (4th ed.). McGraw-Hill.

\item [106] \url{https://www.geminidsn.com/post/materials-selection-in-engineering-design}

\item [107] \url{https://www.metalsupermarkets.com/different-types-steel-steel-grades/}

\item [108] \url{https://www.kloecknermetals.com/blog/304-stainless-steel-vs-316/}

\item [109] \url{https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/carbon-steel-vs-stainless-steel}

\item [110] \url{https://tradingeconomics.com/commodity/naphtha}

\item [111] \url{https://www.echemi.com/productsInformation/pid\_Seven2206-p-xylene.html}

\item [112] \url{https://www.echemi.com/productsInformation/pid\_Seven2868-benzene.html}

\end{itemize}

\newpage

\section{Anexos}

\subsection{Anexo I - Estudo de Mercado}

\noindent\textbf{Europa}\\

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{24.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado Benzeno Europa.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{25.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado p-Xileno Europa.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{26.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado Benzeno Europa.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{27.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado p-Xileno Europa.}

\end{figure}

\noindent\textbf{China}\\

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{28.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado Benzeno na china.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{29.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado p-Xileno China.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{30.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado Benzeno China.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{31.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado p-Xileno China.}

\end{figure}

\noindent\textbf{Ásia sem China}\\

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{32.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado Benzeno Ásia sem China.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{33.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado p-Xileno Ásia sem China.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{34.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado Benzeno Ásia sem China.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{35.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado p-Xileno Ásia sem China.}

\end{figure}

\noindent\textbf{Estados Unidos da América}\\

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{36.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado Benzeno EUA.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{37.jpeg}

\caption{Estudo de Mercado p-Xileno EUA.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{38.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado Benzeno EUA.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{39.jpeg}

\caption{Previsão de Mercado p-Xileno EUA.}

\end{figure}

\newpage

\subsection{Anexo II - Dimensionamentos e Folhas de Especificação}

\noindent\textbf{Reator de Transalquilação}\\

Para dar início ao dimensionamento do reator de desproporcionamento, iniciou-se o cálculo da porosidade do leito, sendo a densidade do bulk um valor tabelado de 700 $g\_{cat}/{dm^{3}}$, através da seguinte fórmula:

\begin{equation}

\varepsilon=1-\frac{\rho\_{bulk}}{\rho\_{real}}

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item $\varepsilon$ – Porosidade do leito;

\item $\rho\_{bulk}$ - Densidade de bulk $g\_{cat}/{dm^{3}}$;

\item $\rho\_{real}$ - Densidade real $g\_{cat}/{dm^{3}}$.

\end{itemize}

De seguida, determinou-se o tempo espacial do reator que relaciona a quantidade de catalisador e o caudal de alimentação:

\begin{equation}

\tau=\frac{1}{WHSV}

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(\tau\) – Tempo espacial (h);

\item WHSV – Velocidade espacial horária em peso (\(h^{-1}\)).

\end{itemize}

A massa e o volume do catalisador também foram calculados:

\begin{equation}

m\_{\text{catalisador}} = \frac{\dot{m}}{\text{WHSV}}

\end{equation}

\begin{equation}

V\_{\text{catalisador}} = \frac{m\_{\text{catalisador}}}{\rho\_{\text{bulk}}}

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(m\_{\text{catalisador}}\) – Massa do catalisador (kg);

\item \(\dot{m}\) – Caudal mássico (kg/h);

\item WHSV – Velocidade espacial horária em peso (\(h^{-1}\));

\item \(V\_{\text{catalisador}}\) – Volume do catalisador (\(m^3\));

\item \(\rho\_{\text{bulk}}\) – Densidade de bulk (\(g\_{\text{cat}}/{dm^3}\)).

\end{itemize}

De seguida, calculou-se o volume vazio e o volume de reação do reator:

\begin{equation}

V\_{\text{vazio}} = V\_{\text{catalisador}} \times \varepsilon

\end{equation}

\begin{equation}

V\_{\text{reação}} = 1.1 \times V\_{\text{catalisador}}

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(V\_{\text{vazio}}\) – Volume vazio do reator (\(m^3\));

\item \(V\_{\text{reação}}\) – Volume de reação do reator (\(m^3\));

\item \(V\_{\text{catalisador}}\) – Volume do catalisador (\(m^3\));

\item \(\varepsilon\) – Porosidade do leito.

\end{itemize}

Sendo \(\frac{L}{D}\) um parâmetro da geometria do reator que relaciona o comprimento e o diâmetro deste, realizou-se o cálculo do diâmetro e da altura do reator, através das seguintes fórmulas: \\

\begin{equation}

D\_{\text{reator}} = \sqrt[3]{\frac{4 \times V\_{\text{catalisador}}}{\frac{L}{D} \times \pi}}

\end{equation}

\begin{equation}

L\_{\text{reator}} = D\_{\text{reator}} \times \frac{L}{D}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(D\_{\text{reator}}\) – Diâmetro do reator (m);

\item \(\frac{L}{D}\) – Parâmetro da geometria do reator;

\item \(V\_{\text{catalisador}}\) – Volume do catalisador (\(m^3\));

\item \(L\_{\text{reator}}\) – Altura do reator (m).

\end{itemize}

De forma a termos em consideração possíveis alterações no sistema, multiplicámos os valores de diâmetro e altura do reator por 1.1 de modo a termos uma margem de segurança, prevenindo eventuais falhas. Assim, obtêm-se os valores reais destas grandezas:

\begin{equation}

D\_{\text{real}} = 1.1 \times D\_{\text{reator}}

\end{equation}

\begin{equation}

L\_{\text{real}} = 1.1 \times L\_{\text{reator}}

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(L\_{\text{real}}\) – Altura real do reator (m);

\item \(D\_{\text{real}}\) – Diâmetro real do reator (m).

\end{itemize}

Tendo o valor do diâmetro real do reator, procedeu-se com o cálculo do volume da base e do topo do reator, admitindo que têm uma forma elipsoidal:

\begin{equation}

V\_{\text{base}} = V\_{\text{topo}} = \frac{\pi \times D\_{\text{real}}^3}{24}

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(V\_{\text{base}}\) – Volume da base do reator (m\(^3\));

\item \(V\_{\text{topo}}\) – Volume do topo do reator (m\(^3\));

\item \(D\_{\text{real}}\) – Diâmetro real do reator (m).

\end{itemize}

Tendo o volume da base e do topo do reator e o volume da reação, é possível determinar o volume total, através da seguinte fórmula:

\begin{equation}

V\_{\text{total}} = V\_{\text{reação}} + V\_{\text{base}} + V\_{\text{topo}}

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(V\_{\text{total}}\) – Volume total do reator (m\(^3\)).

\end{itemize}

De seguida, foi calculada a pressão de operação do reator de forma a ter em consideração uma margem de segurança:

\begin{equation}

P\_{\text{operação}} = P\_{\text{reator}} \times 1.1

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(P\_{\text{operação}}\) – Pressão a que opera o reator (bar);

\item \(P\_{\text{reator}}\) – Pressão a que se encontra o fluido dentro do reator (bar).

\end{itemize}

Tendo o valor da pressão de operação, determinou-se a espessura das paredes do reator bem como a espessura da base e do topo, assumindo que a espessura da parede, do topo e base mantêm-se constantes ao longo da altura do reator:

\begin{equation}

\delta\_{\text{paredes}} = \frac{P\_{\text{operação}} \times D\_{\text{real}}}{2 \times J \times f} - (0.2 \times P\_{\text{operação}})

\end{equation}

\begin{equation}

\delta\_{\text{base}} = \delta\_{\text{topo}} = \frac{P\_{\text{operação}} \times D\_{\text{real}}}{2 \times (f \times J)} - (0.6 \times P\_{\text{operação}})

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(\delta\_{\text{paredes}}\) – Espessura das paredes do reator (m);

\item \(\delta\_{\text{base}}\) – Espessura da base do reator (m);

\item \(\delta\_{\text{topo}}\) – Espessura do topo do reator (m);

\item \(P\_{\text{operação}}\) – Pressão a que opera o reator (bar);

\item \(D\_{\text{real}}\) – Diâmetro real do reator (m);

\item \(J\) – Fator de junta;

\item \(f\) – Tensão admissível (bar).

\end{itemize}

Por último, calculou-se a perda de pressão no reator, através da equação de Ergun, admitindo que o catalisador é uma esfera perfeita. Esta equação é usada devido à mistura ser bifásica (líquido-gás) e de ser um reator de leito fixo.

\begin{equation}

\Delta P = H\_{\text{real}} \times \left( 150 \times \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \times \frac{\mu \times u\_s}{(\phi \times d\_p)^2} + 1.75 \times \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \times \frac{\rho\_f \times u\_s \times \phi}{d\_p} \right)

\end{equation}

Onde,

\begin{itemize}

\item \(\Delta P\) – Perda de pressão no reator (Pa);

\item \(L\_{\text{real}}\) – Altura real do reator (m);

\item \(\varepsilon\) – Porosidade do catalisador;

\item \(\phi\) – Parâmetro de esfericidade das partículas de catalisador;

\item \(d\_p\) – Diâmetro da partícula (m);

\item \(\rho\_f\) – Densidade do fluido de entrada no reator (\(g/{dm}^3\));

\item \(u\_s\) – Velocidade do caudal de entrada no reator (m/s);

\item \(\mu\) – Viscosidade do fluido de entrada (Pa/s).

\end{itemize}

\noindent\textbf{Permutador}\\

O objetivo principal do dimensionamento de permutadores de calor é calcular a área superficial necessária para a transferência eficiente de calor. Isso é feito utilizando a equação geral de transferência de calor:

\begin{equation}

Q = UA\Delta T\_m

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(Q\) – Calor transferido, W;

\item \(U\) – Coeficiente global de transferência de calor, W/m\(^2\)°C;

\item \(A\) – Área de transferência de calor, m\(^2\);

\item \(\Delta T\_m\) – Diferença de temperatura logarítmica ajustada, °C.

\end{itemize}

No dimensionamento dos permutadores, assim como para a maioria dos equipamentos de transferência de calor, foi usado o Método de Kern. Fizemos este dimensionamento com guia no Chemical Engineering Design - Coulson and Richardson. A diferença de temperatura logarítmica para uma mistura em contra-corrente determina-se segundo a seguinte expressão:

\begin{equation}

\Delta T\_{lm} = \frac{\left(T\_1 - t\_2\right) - \left(T\_2 - t\_1\right)}{\ln{\left(\frac{T\_1 - t\_2}{T\_2 - t\_1}\right)}}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(\Delta T\_{lm}\) – Diferença de temperatura logarítmica, °C;

\item \(T\_1\) – Temperatura de entrada do fluído quente, °C;

\item \(T\_2\) – Temperatura de saída do fluído quente, °C;

\item \(t\_1\) – Temperatura de entrada do fluído frio, °C;

\item \(t\_2\) – Temperatura de saída do fluído frio, °C.

\end{itemize}

Nos permutadores de calor Shell and Tube, o fluxo dos fluidos geralmente é uma combinação de co-corrente, contra-corrente e fluxo cruzado. Para capturar com precisão os efeitos dessas diferentes configurações de fluxo, é essencial aplicar um fator de correção à diferença de temperatura logarítmica, através da seguinte equação:

\begin{equation}

\Delta T\_m = F\_t \Delta T\_{lm}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(\Delta T\_m\) – Diferença de temperatura logarítmica ajustada;

\item \(F\_t\) – Fator de correção da temperatura.

\end{itemize}

O fator de correção é calculado através da seguinte expressão válida para permutadores com número de passagens par:

\begin{equation}

F\_t = \frac{\frac{2 \sqrt{R^2 + 1} \ln{\left(\frac{1 - S}{1 - RS}\right)}}{\ln{\left[2 - S \left(R + 1 - 2 \sqrt{R^2 + 1}\right)\right]}}}{\ln{\left[2 - S \left(R + 1 + 2 \sqrt{R^2 + 1}\right)\right]}}

\end{equation}

Esta expressão depende de duas razões adimensionais de temperatura, \(R\) e \(S\), calculadas pelas seguintes equações:

\begin{equation}

S = \frac{t\_2 - t\_1}{T\_1 - t\_1} \qquad \qquad \qquad R = \frac{T\_1 - T\_2}{t\_2 - t\_1}

\end{equation}

Assim, a partir do valor teórico de \(U\) e do valor obtido \(\Delta T\_m\), determinou-se a área necessária à transferência de calor. De seguida, definiu-se as especificações do permutador, como os parâmetros da geometria, optou-se por um pitch quadrangular, a configuração do arranjo de tubos e o tipo de material de construção. Mediante os valores padrão da literatura, selecionou-se o diâmetro externo (\(d\_o\)) e a respetiva espessura através da seguinte tabela:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{5.PNG}

\caption{Tabela Diâmetro Externo.}

\end{figure}

Também foi possível determinar o comprimento do tubo (\(L\)) através da literatura escolhendo um comprimento de 4,88m.

Foi escolhido também o arranjo dos tubos, optou-se por um pitch quadrangular. Posteriormente, determinou-se o número de tubos e a velocidade do fluido através das seguintes expressões:

\begin{equation}

N\_t = \frac{A}{A\_{\text{tubo}}}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(N\_t\) – Número de tubos;

\item \(A\) – Área de transferência de calor, m\(^2\);

\item \(A\_{\text{tubo}}\) – Área lateral de um tubo, m\(^2\).

\end{itemize}

\begin{equation}

u\_{\text{tubo}} = \frac{W\_s}{A\_s \times \rho \times N\_t}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(u\_{\text{tubo}}\) – Velocidade do fluido no lado do tubo, m/s;

\item \(W\_s\) – Caudal do fluido que circula no interior dos tubos, kg/s;

\item \(\rho\) – Massa específica do fluido que circula no interior dos tubos, kg/m\(^3\);

\item \(A\_s\) – Área seccional do tubo, m\(^2\).

\end{itemize}

De seguida, foi calculado o diâmetro do arranjo dos tubos, \(D\_b\), que depende do número de passagens do fluido no tubo e da configuração dos mesmos.

\begin{equation}

D\_b = d\_0 \left( \frac{N\_t}{K\_1} \right)^{\frac{1}{n\_1}}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(D\_b\) – Diâmetro do arranjo dos tubos, m;

\item \(d\_0\) – Diâmetro externo dos tubos, m;

\item \(K\_1\) e \(n\_1\) – Constantes adimensionais.

\end{itemize}

As contantes \(K\_1\) e \(n\_1\) foram determinadas a partir da seguinte tabela, como também o pitch (\(p\)).

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{6.PNG}

\caption{Tabela das Constantes.}

\end{figure}

De forma a determinar o diâmetro do corpo do permutador (\(D\_s\)), recorreu-se à seguinte expressão:

\begin{equation}

D\_s = D\_b + \text{clearance}

\end{equation}

O valor de \textit{clearance} foi determinado através do seguinte gráfico:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{8.PNG}

\caption{Gráfico do Clearance.}

\end{figure}

Para maximizar a transferência de calor, adicionam-se chicanas segmentais com o objetivo de induzir um regime turbulento dentro dos tubos. Para o dimensionamento adequado, calcula-se o espaçamento entre as chicanas (\(l\_B\)) e o número de chicanas (\(N\_b\)):

\begin{equation}

l\_B = a D\_s \qquad \qquad \qquad N\_b = \frac{L}{l\_B} - 1

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(a\) – Ângulo de corte das chicanas, variando entre 0,2 e 1. Para este caso, escolhemos um valor igual a 1.

\end{itemize}

O coeficiente de transferência de calor nos tubos, assim como o do corpo, foi calculado utilizando as seguintes expressões. Para simplificar os cálculos, o termo relacionado à viscosidade foi desprezado em ambas as equações.

\begin{equation}

\mathrm{Nu}\_{\text{corpo}} = j\_h \times Re \times Pr^{0.33} \times \left(\frac{\mu}{\mu\_w}\right)^{0.14} \Longleftrightarrow \frac{h\_s \times d\_e}{k\_f} = j\_h \times Re \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{\mu}{\mu\_w}\right)^{0.14}

\end{equation}

E para o coeficiente de transferência de calor nos tubos,

\begin{equation}

\mathrm{Nu}\_{\text{tubos}} = j\_h \times Re \times Pr^{0.33} \times \left(\frac{\mu}{\mu\_w}\right)^{0.14} \Longleftrightarrow \frac{h\_i \times d\_i}{k\_f} = j\_h \times Re \times Pr^{0.33} \times \left(\frac{\mu}{\mu\_w}\right)^{0.14}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(\mathrm{Nu}\) – Número de Nusselt;

\item \(\mathrm{Re}\) – Número de Reynolds;

\item \(\mathrm{Pr}\) – Número de Prandtl;

\item \(h\_i\) – Coeficiente de transferência de calor do lado dos tubos, W/m\(^2\)°C;

\item \(h\_s\) – Coeficiente de transferência de calor no corpo, W/m\(^2\)°C;

\item \(k\_f\) – Condutividade térmica do fluido, W/m\(^2\)°C;

\item \(j\_h\) – Fator de transferência de calor, adimensional;

\item \(d\_i\) – Diâmetro interno dos tubos, m;

\item \(d\_e\) – Diâmetro externo do corpo, m;

\item \(\mu\) – Viscosidade cinemática, N.s/m\(^2\);

\item \(\mu\_w\) – Viscosidade cinemática da parede, N.s/m\(^2\);

\item \(\rho\) – Massa específica, kg/m\(^3\).

\end{itemize}

Para calcular o Reynolds utilizamos a seguinte expressão:

\begin{equation}

\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot u\_d \cdot d\_e}{\mu}

\end{equation}

Para calcular o Prandtl utilizamos a seguinte expressão:

\begin{equation}

\mathrm{Pr} = \frac{C\_p \cdot \mu}{k\_f}

\end{equation}

Para determinar o fator de transferência de calor para o corpo utilizamos o seguinte gráfico:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{7.PNG}

\caption{Gráfico Fator de Transferência de Calor no Corpo.}

\end{figure}

E para calcular o fator de transferência de calor para os tubos utilizamos o seguinte gráfico:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{9.PNG}

\caption{Gráfico Fator de Transferência de Calor nos Tubos}

\end{figure}

Finalmente, o coeficiente global de transferência de calor foi calculado através da seguinte expressão:

\begin{equation}

\frac{1}{U\_o} = \frac{1}{h\_o} + \frac{1}{h\_{od}} + \frac{d\_o \ln{\left(\frac{d\_o}{d\_i}\right)}}{2k\_w} + \frac{d\_o}{d\_i h\_{id}} + \frac{d\_o}{d\_i h\_i}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(U\_o\) – Coeficiente global de transferência de calor, W/m\(^2\)°C;

\item \(h\_o\) – Coeficiente do filme externo, W/m\(^2\)°C;

\item \(h\_i\) – Coeficiente do filme interno, W/m\(^2\)°C;

\item \(h\_{od}\) – Coeficiente de incrustações externas, W/m\(^2\)°C;

\item \(h\_{id}\) – Coeficiente de incrustações internas, W/m\(^2\)°C;

\item \(k\_w\) – Condutividade térmica da parede do tubo, W/m\(^2\)°C;

\item \(d\_i\) – Diâmetro interno do tubo, m;

\item \(d\_o\) – Diâmetro externo do tubo, m.

\end{itemize}

Os valores de \(h\_{od}\), \(h\_{id}\), e \(k\_w\) são valores retirados da literatura.

Foi-nos possível também calcular a queda de pressão nos tubos e no corpo, através das seguintes expressões:

\begin{equation}

\Delta P\_{\text{tubos}} = N\_p \left[8j\_f \left(\frac{L}{d\_i}\right) \left(\frac{\mu}{\mu\_w}\right)^{-0.14} + 2.5\right] \frac{\rho u\_t^2}{2}

\end{equation}

E para o corpo,

\begin{equation}

\Delta P\_{\text{corpo}} = 8j\_f \left(\frac{D\_s}{d\_e}\right) \left(\frac{L}{l\_B}\right) \left(\frac{\rho u\_s^2}{2}\right) \left(\frac{\mu}{\mu\_w}\right)^{-0.14}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(\Delta P\) – Queda de pressão, N/m\(^2\);

\item \(j\_f\) – Fator de fricção, adimensional.

\end{itemize}

O fator de fricção foi calculado através dos seguintes gráficos:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{10.PNG}

\caption{Fator de Fricção nos Tubos.}

\end{figure}

E para o corpo:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{11.PNG}

\caption{Fator de Fricção no Corpo.}

\end{figure}

\noindent\textbf{Coluna de Destilação}\\

Com os valores de \(d\_o\) e de pitch (\(p\)), é possível então estimar a razão entre a área total dos orifícios (\(A\_O\)) e a área ativa (\(A\_a\)), que é a área correspondente à zona perfurada:

\begin{equation}

\frac{A\_O}{A\_a} = 0.907 \left(\frac{d\_o}{p}\right)^2

\end{equation}

Para evitar inundação, é necessário calcular a velocidade de inundação. Para realizar este cálculo, é necessário conhecer a densidade mássica da fase de vapor (\(\rho\_G\)), da fase líquida (\(\rho\_L\)), e a tensão superficial do líquido, que foram obtidos no software Aspen Plus. Podemos então calcular a velocidade a que ocorre inundação (\(v\_f\)) com a seguinte relação empírica:

\begin{equation}

v\_f = C\_f \left(\frac{\rho\_L - \rho\_G}{\rho\_G}\right)^{0.5}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(C\_f\) – Constante de Inundação (m/s).

\end{itemize}

Para a realização do cálculo anterior, é necessário calcular também o valor de \(C\_f\), que é determinado pela seguinte fórmula empírica:

\begin{equation}

C\_f = \left[\alpha \cdot \log{\left(\frac{1}{\varphi}\right)} + \beta\right] \cdot \left(\frac{\sigma}{0.02}\right)^{0.02}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(\sigma\) – Tensão Superficial do Líquido (N/m);

\item \(\beta\) e \(\alpha\) – São parâmetros dependentes de \(\varphi\) e do espaçamento entre pratos (\(t\)).

\end{itemize}

\(\varphi\) – Parâmetro de Fluxo, que se obtém através da seguinte equação:

\begin{equation}

\varphi = \frac{L'}{G'} \cdot \left(\frac{\rho\_G}{\rho\_L}\right)^{0.5}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(L'\) – Caudal Mássico Líquido (Kg/h);

\item \(G'\) – Caudal Mássico do Gás (Kg/h).

\end{itemize}

Quando \(\frac{A\_O}{A\_a} \geq 0.1\) e os valores de \(\varphi\) se situam entre 0.15 e 1, vem para \(t\), em metros:

\begin{equation}

\alpha(t) = 0.0744t + 0.01173

\end{equation}

\begin{equation}

\beta(t) = 0.0304t + 0.015

\end{equation}

Os valores do espaçamento entre pratos estão na gama entre 0.15 m e 0.9 m. A escolha deste espaçamento depende do diâmetro da coluna (\(d\_c\)). Quando chegarmos a um valor calculado de \(d\_c\), podemos confirmar se o valor assumido está correto com a seguinte tabela:

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|l|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Diâmetro da coluna, $d\_c$/m} & \textbf{Espaçamento entre pratos, $t$/m} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} - & 0.15 (mínimo) \\

\hline

1 (ou menos) & 0.50 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} 1 – 3 & 0.60 \\

\hline

3 – 4 & 0.75 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} 4 - 8 & 0.90 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Espaçamento entre pratos em função do diâmetro da coluna}

\label{tab:espacamento\_pratos}

\end{table}

Como valor de segurança da velocidade operatória do vapor (\(v\_{\text{op}}\)), admitimos um fator entre 70\% a 80\% do valor de inundação. Sendo assim, podemos calcular a área de passagem de vapor dentro do prato com a seguinte equação:

\begin{equation}

A\_n = \frac{Q\_G}{v\_{\text{op}}}

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(A\_n\) – Área de passagem do vapor (m\(^2\));

\item \(Q\_G\) – Caudal volumétrico do vapor (m\(^3\)/s);

\item \(v\_{\text{op}}\) – Velocidade operatória do vapor (m/s).

\end{itemize}

É agora necessário calcular a área da secção reta da coluna (\(A\_t\)), que depende do diâmetro da coluna (\(d\_c\)), do comprimento do dique (\(w\)), da distância ao centro da coluna (\(Z\)) e da fração da área total ocupada por uma coluna descendente (\(\eta\)). Estando eles relacionados entre si. A relação está representada na seguinte tabela:

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|l|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Comprimento do Dique, \(w\)} & \textbf{Distância ao centro da coluna, \(Z\)} & \textbf{Fração da área total ocupada por uma coluna descendente, \(\eta\)} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} 0.553$d\_c$ & 0.4184$d\_c$ & 0.03877 \\

\hline

0.60$d\_c$ & 0.3993$d\_c$ & 0.05257 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} 0.65$d\_c$ & 0.2516$d\_c$ & 0.06899 \\

\hline

0.70$d\_c$ & 0.3562$d\_c$ & 0.08898 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} 0.75$d\_c$ & 0.3296$d\_c$ & 0.11255 \\

\hline

0.80$d\_c$ & 0.1991$d\_c$ & 0.14145 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Relação entre o comprimento do dique, distância ao centro da coluna e a fração da área total ocupada por uma coluna descendente}

\label{tab:diques\_coluna}

\end{table}

Podemos agora calcular o diâmetro da coluna (\(d\_c\)) com a seguinte equação:

\begin{equation}

d\_c = \sqrt{\frac{4Q\_G}{\pi (1 - \eta) v\_{\text{op}}}}

\end{equation}

Sabendo o valor do diâmetro da coluna, é possível calcular a área de secção reta:

\begin{equation}

A\_t = \frac{\pi d\_c^2}{4}

\end{equation}

Após obter estes valores de geometria da coluna, é fundamental garantir que a coluna opere com um desempenho funcional adequado, avaliando as perdas de carga ao longo da coluna. Este cálculo começa com a determinação da altura total do líquido na coluna descendente (\(h\_{\text{tot}}\)), que pode ser obtida pela seguinte equação:

\begin{equation}

h\_{\text{tot}} = h\_3 + (h\_1 + h\_w)

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(h\_3\) – Somatório da perda de carga do líquido à entrada do prato (\(h\_2\)) e a perda de carga do vapor através do prato (\(h\_G\));

\item \((h\_1 + h\_w)\) – Alturas de líquido no prato (m).

\end{itemize}

A altura atingida pelo líquido na conduta (\(h\_3\)) depende da facilidade com que o líquido entra no prato por meio de uma pequena abertura, medida pela perda de carga (\(h\_2\)), que é determinada pela seguinte equação:

\begin{equation}

h\_2 = \frac{3}{2g}\left(\frac{Q\_L}{A\_{da}}\right)^2 = \frac{3}{2g} \left(\vartheta\_{da}\right)^2

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(g\) – Aceleração gravítica (m\(^2\)/s);

\item \(Q\_L\) – Caudal volumétrico do líquido (m\(^3\)/s);

\item \(A\_{da}\) – Menor entre as áreas de secção reta da coluna descendente e a área correspondente à abertura por onde o líquido entra no prato (m\(^2\));

\item \(\vartheta\_{da}\) – Velocidade do líquido (m/s).

\end{itemize}

A perda de carga do vapor ao entrar no prato (\(h\_G\)), expressa em altura da coluna do líquido, é calculada através do somatório de três perdas de carga: perda de carga seca (\(h\_D\)), a perda de carga devida à altura do líquido no prato (\(h\_L\)) e a perda de carga devido à tensão superficial (\(h\_\sigma\)). Então,

\begin{equation}

h\_G = h\_D + h\_L + h\_\sigma

\end{equation}

Para determinar a perda de carga seca, é necessário aplicar a seguinte expressão:

\begin{equation}

h\_D = C\_0 \cdot \left(\frac{v\_0^2 \cdot \rho\_G}{2 \cdot \rho\_L \cdot g}\right) \cdot \left[0.4 \cdot \left(1.25 - \frac{A\_0}{A\_n}\right) + \frac{4 \cdot f \cdot l}{d\_o} + \left(1 - \frac{A\_0}{A\_n}\right)^2\right]

\end{equation}

Para calcular a constante \(C\_0\), é necessário saber que esta depende da razão entre o diâmetro do orifício (\(d\_0\)) e a espessura do prato (\(l\)):

\begin{equation}

C\_0 = 1.09 \left(\frac{d\_0}{l}\right)^{0.25}

\end{equation}

O valor da espessura do prato foi determinado através da seguinte tabela:

\begin{table}[h!]

\centering

\resizebox{\textwidth}{!}{%

\begin{tabular}{|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Diâmetro da coluna, $d\_c$/m} & \textbf{Espaçamento entre pratos, t/m} \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} - & 0.15 (mínimo) \\

\hline

1 (ou menos) & 0.50 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} 1 – 3 & 0.60 \\

\hline

3 – 4 & 0.75 \\

\hline

\rowcolor[gray]{0.9} 4 – 8 & 0.90 \\

\hline

\end{tabular}

}

\caption{Espaçamento entre pratos em função do diâmetro da coluna}

\label{tab:espacamento\_pratos}

\end{table}

De seguida, foi calculada a velocidade de circulação do vapor nos orifícios (\(v\_0\)) através da seguinte expressão:

\begin{equation}

v\_0 = \frac{Q\_G}{A\_0}

\end{equation}

Podendo-se saber a área total dos orifícios (\(A\_0\)) com a razão \(\frac{A\_0}{A\_a}\), é necessário determinar a área ativa com a seguinte expressão:

\begin{equation}

A\_a = A\_t \cdot \left(1 - 2\eta\right)

\end{equation}

Ficando então a faltar o fator de Fanning (\(f\)), que pode ser determinado a partir do seguinte gráfico:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{13.PNG}

\caption{Fator de Fanning.}

\end{figure}

A perda de carga devida à altura do líquido no prato pode ser calculada com a seguinte expressão:

\begin{equation}

h\_L = 0.0061 + 0.725 \cdot h\_W - 0.283 \cdot h\_W \cdot v\_a \cdot \rho\_G^{0.5} + 1.225 \cdot \frac{Q\_L}{Z}

\end{equation}

Onde \(Z\) é o percurso do líquido definido por:

\begin{equation}

Z = \frac{d\_c + w}{2}

\end{equation}

A velocidade do vapor relacionada com a área ativa \(A\_a\) é dada por:

\begin{equation}

v\_a = \frac{Q\_G}{A\_a}

\end{equation}

Precisamos também de estimar os valores de \(h\_1\) e \(h\_W\), onde a sua soma é aproximadamente 0.1 m. \(h\_1\) pode ser calculado pela seguinte expressão:

\begin{equation}

h\_1 = \left(\frac{Q\_L}{1.839 \cdot w}\right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{para} \quad \frac{w}{d\_c} \geq 0.7

\end{equation}

Onde \(w\) é o comprimento do dique.

Posteriormente, podemos determinar a queda de pressão devida à tensão superficial, que é a diferença entre a pressão dentro da bolha e a do líquido, dada por:

\begin{equation}

h\_\sigma = \frac{6 \sigma \rho\_L}{g d\_{B,\text{máx}}}

\end{equation}

Onde \(\sigma\) é a tensão superficial e \(d\_{B,\text{máx}}\) é o diâmetro máximo da bolha. Como no nosso caso o diâmetro do orifício é superior a 0.05 m, assumimos que o diâmetro máximo da bolha é igual ao diâmetro do orifício.

Sendo assim, podemos calcular o valor de \(h\_{\text{tot}}\) e, de seguida, calcular \(h\_{\text{tot,mist}}\) que é determinado pela seguinte expressão:

\begin{equation}

h\_{\text{tot,mist}} = \frac{h\_{\text{tot}}}{\rho\_{\text{mist}}}

\end{equation}

Em operação normal, o valor da densidade relativa da espuma (\(\rho\_{\text{mist}}\)) é cerca de 0.5.

Outro parâmetro crucial para assegurar o bom funcionamento de uma coluna é a prevenção do gotejamento do líquido, que ocorre quando a velocidade do vapor é muito baixa. Para evitar essa situação, é necessário calcular o valor da velocidade mínima do vapor (\(v\_{\text{ow}}\)), abaixo da qual ocorre o gotejamento.

\begin{equation}

v\_{\text{ow}} = \frac{0.0229 \sigma}{\mu\_G} \left(\frac{\mu\_G^2 \cdot \rho\_L \sigma \cdot \rho\_G^2 \cdot d\_{\text{orifícios}}^{0.379} \cdot l \cdot d\_{\text{orifícios}}^{0.2932} \cdot A\_a \cdot d\_{\text{orifícios}}^3 \cdot p^3 Z \cdot d\_{\text{orifícios}}^{2.8}}{(Z d\_0)^{0.774}}\right)

\end{equation}

Onde \(Z\) é uma variável geométrica relacionada com o posicionamento do dique no prato.

Para valores \(\frac{w}{d\_c} \geq 0.7\), o dique deve ser colocado a \(0.3296 d\_c\) e, consequentemente, \(Z\) será \(2 \times 0.3296 d\_c\). Estes valores foram retirados da literatura, como se pode observar na tabela.

Foi utilizado o método de McCabe-Thiele para determinar o número de pratos teóricos. Foram determinados 27 pratos teóricos, não havendo diferença para o número de pratos reais.

Por fim, podemos calcular a altura da coluna:

\begin{equation}

z = (N\_c - 1) + \Delta h + N\_c \cdot l

\end{equation}

Onde:

\begin{itemize}

\item \(N\_c\) – Número de pratos reais;

\item \(\Delta h\) – Altura adicional de compensação (m);

\item \(l\) – Espessura do prato (m).

\end{itemize}

Pela literatura, obteve-se para o espaçamento entre o último prato e a base da coluna um valor de 1.8 m de altura adicional, e para a distância entre o primeiro prato e o topo da coluna um valor de 1.2 m de altura adicional.\\

\noindent\textbf{Bomba e Tubagens}\\

Para calcular a perda de carga: Durante a passagem dos fluxos pelos tubos, são várias as perdas de carga devido às diferenças de altura, aos acessórios e às válvulas de alívio de pressão que as bombas centrífugas possuem. A perda de carga numa “linha” calcula-se pela seguinte equação:

\begin{equation}

\Delta P\_{\text{Total}} = P\_2 - P\_1 + \Delta P\_f + \Delta P\_{\text{Acessórios}} + \Delta P\_{\text{Desnível}} + \Delta P\_{\text{Válvula}}

\end{equation}

Em que:

\begin{itemize}

\item \(P\_1\) – Pressão do equipamento de origem (Pa);

\item \(P\_2\) – Pressão do equipamento de chegada (Pa);

\item \(\Delta P\_f\) – Perda de carga em linha (Pa);

\item \(\Delta P\_{\text{Acessórios}}\) – Perda de carga devido aos acessórios (Pa);

\item \(\Delta P\_{\text{Desnível}}\) – Perda de carga devido à altura (Pa);

\item \(\Delta P\_{\text{Válvula}}\) – Perda de carga devido às válvulas de controlo (Pa).

\end{itemize}

Recorreu-se à literatura para verificar os intervalos de variação da velocidade dos líquidos e dos gases no interior dos tubos, uma vez que a velocidade varia com o estado físico das correntes e a disposição das unidades de compressão e bombeamento no processo. Os valores estão apresentados na seguinte tabela.

\begin{table}[h!]

\centering

\begin{tabular}{|c|c|c|}

\hline

\rowcolor[gray]{0.8} \textbf{Correntes} & \textbf{} & \textbf{Velocidade das tubagens (m/s)} \\

\hline

\multirow{2}{\*}{Líquidas} & Aspiração & $\leq1,5$ \\

\cline{2-3} & Descarga & [1-3] \\

\hline

Gasosas & & [15-30] \\

\hline

\end{tabular}

\caption{Velocidades das tubagens para diferentes correntes}

\label{tab:velocidades\_tubagens}

\end{table}

Para o cálculo das perdas de carga em linha e os dados das correntes (caudal volumétrico e viscosidade cinemática), estimou-se o diâmetro interno da tubagem, a área da secção, a velocidade do fluido, o comprimento da tubagem e a perda de carga em linha. Com a tabela anterior, a velocidade da corrente foi determinada e, a partir do caudal volumétrico da corrente, a área da secção transversal pode ser calculada com a seguinte equação:

\begin{equation}

A\_s = \frac{Q\_v}{u}

\end{equation}

Em que:

\begin{itemize}

\item \(A\_s\) – Área da secção reta da coluna (m\(^2\));

\item \(Q\_v\) – Caudal volumétrico (m\(^3\)/s);

\item \(u\) – Velocidade (m/s).

\end{itemize}

O diâmetro interno da tubagem pode ser calculado pela seguinte equação:

\begin{equation}

d\_i = \sqrt{\frac{4 \times A\_s}{\pi}}

\end{equation}

Em que:

\begin{itemize}

\item \(d\_i\) – Diâmetro interno do tubo (m);

\item \(A\_s\) – Área da secção reta da coluna (m\(^2\)).

\end{itemize}

Tendo o valor do diâmetro interno, procedeu-se ao cálculo do número de Reynolds seguido do cálculo do fator de fricção e perda de carga em linha.

\begin{equation}

Re = \frac{\rho \times d\_i \times u}{\mu}

\end{equation}

\begin{equation}

f = 0.04 \times Re^{-0.16}

\end{equation}

\begin{equation}

\Delta P\_f = 8f \times \left(\frac{L}{d\_i}\right) \times \frac{\rho \times u^2}{2}

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(Re\) – Número de Reynolds;

\item \(\rho\) – Massa específica do fluído (kg/m\(^3\));

\item \(u\) – Velocidade do fluido (m/s);

\item \(f\) – Fator de fricção em regime turbulento;

\item \(d\_i\) – Diâmetro interno da tubagem (m);

\item \(\mu\) – Viscosidade dinâmica (Pa.s);

\item \(L\) – Comprimento da tubagem (m).

\end{itemize}

Considerou-se que o material das tubagens é aço comercial, tendo este material uma rugosidade absoluta de 0.046 mm. A rugosidade relativa da tubagem é determinada pela equação:

\begin{equation}

\epsilon\_r = \frac{\epsilon}{d\_i}

\end{equation}

Em que:

\begin{itemize}

\item \(\epsilon\_r\) – Rugosidade relativa;

\item \(\epsilon\) – Rugosidade absoluta (mm);

\item \(d\_i\) – Diâmetro interno do tubo (mm).

\end{itemize}

O comprimento das tubagens é um parâmetro bastante importante que é estimado com base no conhecimento prévio dos equipamentos de origem e chegada, bem como nas suas respetivas secções. Assim, o seu comprimento estima-se da seguinte forma:

\begin{itemize}

\item Tubagens curtas entre equipamentos da mesma secção: [20 – 50] m

\item Tubagens longas entre equipamentos de secções diferentes: 300 m ou mais

\end{itemize}

Sabe-se que os acessórios da tubagem (joelhos, curvas, tês, válvulas, etc.) contribuem para o acréscimo de uma perda de carga, sendo esta tanto mais significativa quanto menor for a tubagem. Assume-se que a perda de carga nos acessórios varia da seguinte forma:

\begin{itemize}

\item Linhas longas: [10-20] \% de \(\Delta P\_f\)

\item Linhas curtas: [20-30] \% de \(\Delta P\_f\)

\end{itemize}

A perda de carga ocorrida devido ao desnível provocado pelas alturas dos equipamentos também tem que ser contabilizada, sendo esta calculada pela equação:

\begin{equation}

\Delta P\_{\text{Desnível}} = \rho g (Z\_2 - Z\_1)

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(g\) – Aceleração gravítica (m/s\(^2\));

\item \(Z\_1\) – Altura do nível de líquido na origem (m);

\item \(Z\_2\) – Altura a que o líquido entra no equipamento de chegada (m).

\end{itemize}

Aplicando as expressões anteriores na equação, obtém-se a perda de carga total da linha:

\begin{equation}

\Delta P\_{\text{total}} = \frac{\Delta P + \Delta P\_f + \Delta P\_{\text{Acessórios}} + \Delta P\_{\text{Desnível}}}{0.7}

\end{equation}

Para o dimensionamento da bomba, escolhemos o tipo de bomba centrífuga por ser a mais utilizada na indústria química e a que tem a construção mais simples. Inicialmente, para o dimensionamento da bomba, calculámos a energia que é necessária fornecer à corrente de líquido. Pela equação, é possível realizar este cálculo, sendo que quando \(W\) é negativo, quer dizer que é necessária a utilização de uma bomba.

\begin{equation}

g \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho} - \frac{\Delta P\_f + \Delta P\_{\text{Acessórios}} + \Delta P\_{\text{Válvula}}}{\rho} - W = 0

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(W\) – Trabalho realizado (J/kg);

\item \(g\) – Aceleração gravítica (m/s\(^2\));

\item \(\Delta Z\) – Diferença de elevações (m);

\item \(\Delta P\) – Diferença de pressões (N/m\(^2\)).

\end{itemize}

Seguidamente, após a verificação da necessidade de uso de uma bomba, é necessário o cálculo da altura manométrica ou head (\(h\)), que está relacionado com a altura do líquido que a bomba fornece a um determinado caudal. Desta forma, o caudal varia inversamente com a altura.

\begin{equation}

\text{h} = \frac{\Delta P\_{total} - \Delta P}{\rho g} - \Delta Z

\end{equation}

As bombas constituem um conjunto que engloba o corpo da bomba, o eixo que vai transmitir o movimento de rotação ao rotor da bomba e o motor elétrico que vai acionar o eixo de transmissão. Cada um destes componentes consome uma determinada potência que é calculada através das seguintes equações:

\begin{equation}

P\_H = \frac{Q \times \rho \times g \times h}{3.6 \times 10^6}

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(P\_H\) – Potência hidráulica (kW);

\item \(Q\) – Caudal volumétrico (m\(^3\)/h);

\item \(\rho\) – Massa específica do fluido (kg/m\(^3\));

\item \(h\) – Altura manométrica (m);

\item \(g\) – Aceleração gravítica (m/s\(^2\)).

\end{itemize}

\begin{equation}

P\_{\text{eixo}} = \frac{P\_H}{\eta\_{\text{Bomba}}}

\end{equation}

A eficiência energética da bomba foi retirada do seguinte gráfico:

\begin{figure}[H]

\hspace{1.35cm}

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{15.PNG}

\caption{Eficiência Energética da Bomba.}

\end{figure}

Para o cálculo da potência elétrica, considerou-se uma eficiência mecânica do motor de 80\%.

\begin{equation}

P\_{\text{elétrica}} = \frac{P\_{\text{eixo}}}{\eta\_{\text{Motor}}}

\end{equation}

Por último, determinou-se o NPSH (Net Positive Suction Head) disponível, visto ser um parâmetro muito importante a ter em conta no dimensionamento de bombas, uma vez que avalia a possibilidade de existência de cavitação na bomba, que poderá trazer fortes consequências no seu funcionamento. A equação para o cálculo do NPSH é a seguinte:

\begin{equation}

\text{NPSH}\_{\text{Disponível}} = Z\_1 + \frac{P\_1-\Delta P\_{f,1}-\Delta P\_{\text{Acessórios,1}}-P\_v}{\rho}

\end{equation}

Em que:

\begin{itemize}

\item \(P\_v\) – Pressão de vapor (Pa)

\end{itemize}

\newpage

\noindent\textbf{Folhas de Especificação}\\

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.8\textwidth]{Reator.PNG}

\caption{Folha de Especificação Reator.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{Destilação.PNG}

\caption{Folha de Especificação Coluna de Destilação.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{Permutador.PNG}

\caption{Folha de Especificação Permutador.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{Bomba.PNG}

\caption{Folha de Especificação Bomba e Tubagens.}

\end{figure}

\newpage

\subsection{Anexo III - Investimento}

Inicialmente, foram calculados os valores do custo de cada equipamento, com a equação de custo de equipamento baseada em fatores de Guthrie, dada por:

\begin{equation}

\log\_{10}{C\_p^o} = K\_1 + K\_2 \log\_{10}{(A)} + K\_3 [\log\_{10}(A)]^2

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(C\_p^o\) – Custo de aquisição do equipamento (USD);

\item \(K\_1, K\_2, K\_3\) – Fatores de Guthrie;

\item \(A\) – Parâmetro de capacidade dos equipamentos.

\end{itemize}

Porém, esta equação aplica-se apenas aos equipamentos cujo material de fabrico é aço de carbono. Uma vez que o material utilizado no processo é aço inoxidável 316, foi necessário um ajuste à fórmula inicial. Para o efeito, foi realizada uma análise no Matches, alterando o parâmetro do material e fixando os outros parâmetros. Desta forma, é possível obter um fator de correção de 3, sendo este o quociente do custo do aço inoxidável em relação ao custo do aço de carbono, que permite o cálculo real do custo dos equipamentos, através de:

\begin{equation}

C\_p = C\_p^o \times f

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(C\_p^o\) – Custo de aquisição do equipamento (USD);

\item \(C\_p\) – Custo de aquisição do equipamento ajustado (USD);

\item \(f\) – Fator de correção.

\end{itemize}

De seguida, calculou-se os valores do custo dos equipamentos utilizando as equações de dimensionamento estabelecidas, dadas por:

\begin{equation}

PC\_{permutador} = 12000 \times A^{0,52}

\end{equation}

\begin{equation}

PC\_{bomba} = 8000 \times W^{0,6}

\end{equation}

\begin{equation}

PC\_{coluna\ destilação} = 10000 \times V\_{coluna}^{0,85}

\end{equation}

\begin{equation}

PC\_{reator} = 20000 \times V\_{reator}^{0,85}

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(PC\_{permutador}\) – Custo de aquisição do permutador (USD);

\item \(PC\_{bomba}\) – Custo de aquisição da bomba (USD);

\item \(PC\_{coluna\ destilação}\) – Custo de aquisição da coluna de destilação (USD);

\item \(PC\_{reator}\) – Custo de aquisição do reator (USD);

\item \(A\) – Área do permutador (\(m^2\));

\item \(W\) – Trabalho que a bomba precisa de realizar (kW);

\item \(V\_{coluna}\) – Volume da coluna (\(m^3\));

\item \(V\_{reator}\) – Volume do reator (\(m^3\)).

\end{itemize}

Para obtermos os valores dos custos dos equipamentos utilizando o simulador Matches, é necessário ter em consideração os pesos dos respetivos equipamentos. Como tal, as seguintes fórmulas foram utilizadas tanto para o reator como para a coluna de destilação, com o objetivo de satisfazer os critérios de simulação do Matches:

\begin{equation}

m\_{parede} = \rho\_{aço} \times A\_{parede} \times (\delta\_{parede} + \delta\_{corrosão})

\end{equation}

\begin{equation}

m\_{base+topo} = \rho\_{aço} \times A\_{base+topo} \times (\delta\_{base+topo} + \delta\_{corrosão})

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(m\_{parede}\) – Massa da parede do vessel (kg);

\item \(m\_{base+topo}\) – Massa da base e topo do vessel (kg);

\item \(\rho\_{aço}\) – Densidade do aço inoxidável 316 (kg/\(m^3\));

\item \(\delta\_{parede}\) – Espessura da parede do vessel (m);

\item \(\delta\_{base+topo}\) – Espessura da base e do topo do vessel (m);

\item \(\delta\_{corrosão}\) – Sobrespessura de corrosão (m);

\item \(A\_{parede}\) – Área da parede do vessel (\(m^2\));

\item \(A\_{base+topo}\) – Área da base e do topo do vessel (\(m^2\));

\item \(L\) – Altura do vessel (m);

\item \(D\) – Diâmetro do vessel (m);

\item \(r\) – Raio da base ou topo (m).

\end{itemize}

Para o tratamento de dados dos valores obtidos através dos métodos aplicados, foi estimado um intervalo de confiança de 99\% de forma a poder excluir possíveis outliers e manter a coerência dos dados obtidos, que pode ser obtido pela seguinte equação:

\begin{equation}

IC\_{99\%} = \mu \pm Z \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}

\end{equation}

Sendo que:

\begin{itemize}

\item \(IC\_{99\%}\) – Intervalo de confiança de 99\%;

\item \(\mu\) – Média da população (USD);

\item \(Z\) – Valor Crítico da distribuição Normal;

\item \(\sigma\) – Desvio padrão da população (USD);

\item \(n\) – Tamanho da amostra.

\end{itemize}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{16.PNG}

\caption{Custos Diretos.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{17.PNG}

\caption{Custos Indiretos.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{18.PNG}

\caption{Custo Geral.}

\end{figure}

\begin{figure}[H]

\centering

\includegraphics[width=0.85\textwidth]{19.png}

\caption{Valores da Função de distribuição Normal.}

\end{figure}

\newpage

\pagestyle{empty}

\section\*{}

\newpage

\pagestyle{empty}

\section\*{}

\begin{center}

\vspace\*{2cm}

\textbf{\Large BTX + Tolueno para Benzeno}

\vspace{3cm}

\begin{tabular}{c}

\underline{\hspace{10cm}} \\

(Bernardo João Madeira Fraga Gonçalves) \\

\vspace{1.5cm} \\ % Espaço adicional entre linhas

\underline{\hspace{10cm}} \\

(Bernardo Manuel Pinto Ribeiro) \\

\vspace{1.5cm} \\ % Espaço adicional entre linhas

\underline{\hspace{10cm}} \\

(Miguel Alexandre Nobre Milheiro) \\

\vspace{1.5cm} \\ % Espaço adicional entre linhas

\underline{\hspace{10cm}} \\

(Sofia da Câmara Pereira) \\

\vspace{1.5cm} \\ % Espaço adicional entre linhas

\underline{\hspace{10cm}} \\

(Tomás Baltazar dos Reis) \\

\end{tabular}

\vfill % Empurra o restante conteúdo para o fundo da página

\textbf{21 de junho de 2024}

\end{center}

\end{document}