

Síntese e projeto de processos

Introdução

2020

A DISCIPLINA

Objetivo

- O curso visa a integração dos conhecimentos adquiridos pelos alunos ao longo do curso de Engenharia Química, com a aplicação no projeto conceitual de processos, utilizando simuladores de processo, a análise de processos e outros recursos de projeto como a avaliação econômica, ambiental e a otimização.

Metas

- **analisar processos**, a fim de propor modificações nos fluxos de massa, de energia e nos equipamentos de um fluxograma, prevendo as consequências de suas decisões sobre o processo como um todo;
- **realizar a avaliação econômica** de um processo, pelo dimensionamento aproximado dos equipamentos e pela estimação dos seus custos.
- **estimar** a rentabilidade de um processo com o objetivo de **tomar decisões** dentro de diferentes cenários;

Metas

- **propor** modificações em um processo visando a eliminação de gargalos e a mudança de escala e de qualidade da produção;
- **propor o projeto conceitual** de um processo químico novo;
- **trabalhar em equipe**, utilizando corretamente os recursos humanos disponíveis, aproveitando da melhor maneira as potencialidades de cada membro em um ambiente harmonioso;
- **Documentar** projetos por escrito e fazer apresentações orais.

Didática

- A atividade principal do curso é a resolução do estudo de caso proposto.
- As sessões serão utilizadas da seguinte maneira:
 - Algumas sessões serão utilizadas com aulas expositivas em que serão apresentados conceitos que não tenham sido abordados em pré-requisitos.
 - Sessões “práticas” em que alguns docentes estarão disponíveis para tirar dúvidas e orientar as equipes.

Didática

- Duas sessões de avaliação: uma intermediária e uma final. Antes das sessões de avaliação serão entregues pelas equipes relatórios. Nas sessões de avaliação as equipes farão apresentações a partir das quais serão arguidos.
- Duas sessões de acompanhamento técnico (AT). Cada grupo tem que agendar uma sessão (AT) antes da primeira avaliação e outra antes da segunda avaliação
- No final de cada sessão prática serão organizadas reuniões, com comparecimento obrigatório dos alunos, em que será feito um relato verbal do progresso obtido e das dificuldades encontradas aos docentes e será entregue um relatório escrito sucinto, por cada equipe individualmente.

Docentes

- Galo Carrillo Le Roux – e-mail: galoroux@usp.br
Local: Semi-industrial, terceiro andar
- Marcelo Seckler – e-mail: marcelo.seckler@usp.br
Local: Bloco 22, térreo
- Roberto Guardani – e-mail: guardani@usp.br Local:
Bloco 21, térreo
- Pedro de Alcântara Pessoa Filho – e-mail:
Pedro.pessoa@usp.br, Local: Bloco 20, 1º andar.

Atendimento aos alunos

- No mínimo dois docentes estarão disponíveis nas sessões “práticas”.
- Temos dois monitores.
- Deixaremos uma sala zoom aberta durante as sessões práticas que servirá de porta de comunicação com os docentes e com os monitores

Avaliação

- É importante frisar que nenhum problema possui uma solução única. A solução apresentada pelos grupos pode não ser necessariamente a melhor. No entanto, espera-se que cada membro do grupo seja capaz de justificar as decisões propostas de maneira racional, baseadas em preceitos de engenharia.
- A presença e a participação é importante, tanto nas reuniões quanto durante as sessões “práticas”.
- A avaliação é contínua

Avaliação

- As datas para entrega dos relatórios são:
- Intermediário: 26/02 às 17:00
- Final: 09/04 às 17:00
- **Critério de Avaliação:**

Média final = $(1/6)^*$ avaliação das reuniões diárias +
+ $(1/3)^*$ nota da avaliação intermediária + $(1/2)^*$ nota
da avaliação final

Cronograma

Terça	Quarta	Docentes	Atividade
05/01	06/01	GCLR, MMS, RG, PAPF	Introdução.
12/01	13/01	GCLR, MMS, RG, PAPF	Apresentação do projeto. Discussão sobre Fluxogramas de Processo
19/01	20/01	A definir	
26/01	27/01	A definir	
02/02	03/02	A definir	
09/02	10/02	A definir	
23/02	24/02		Entrega do Primeiro Relatório – 26/02
02/03	03/03	GCLR, MMS, PAPF, RG	Avaliação intermediária
09/03	10/03	A definir	
16/03	17/03	A definir	
23/03	24/03	A definir	
30/03	31/03	A definir	
06/04	07/04		Entrega do Relatório Final – 09/04
13/04	14/04	GCLR, MMS, PAPF, RG	Avaliação final

O QUE É UM PROJETO?

O desenvolvimento do projeto

- Motivação para o projeto
 - Oportunidade de produzir produtos químicos que satisfaçam necessidades sociais, atendendo a restrições econômicas e ambientais
 - Compromisso com a sustentabilidade
 - Desempenho social (qualidade do produto, capacidade, natureza da matéria prima, empregos)
 - Desempenho ambiental
 - Desempenho econômico
 - Desempenho

O desenvolvimento do projeto

- Etapas do desenvolvimento do projeto
 - Projeto conceitual
 - Projeto básico
 - Projeto de engenharia (detalhado)

Custo do Projeto

Engineering costs to prepare estimates (1977)

	Less than \$1 million	\$1-\$5 million	\$5-\$50 million
Type of estimate	Plant	Plant	Plant
Study (\$ thousands)	5-15	12-30	20-40
Preliminary (\$ thousands)	15-35	30-60	50-90
Definitive (\$ thousands)	25-60	60-120	100-230

Custo do Projeto

Types of design estimates

1. Order-of-magnitude estimate (ratio estimate) based on similar previous cost data; probable accuracy exceeds $\pm 40\%$
 2. Study estimate (factored estimate) based on knowledge of major items of equipment; probable accuracy up to $\pm 25\%$
 3. Preliminary estimate (budget authorization estimate; scope estimate) based on sufficient data to permit the estimate to be budgeted; probable accuracy within $\pm 12\%$
 4. Definitive estimate (project control estimate) based on almost complete data, but before completion of drawings and specifications; probable accuracy within $\pm 6\%$
 5. Detailed estimate (contractor's estimate) based on complete engineering drawings, specifications, and site surveys; probably accuracy within $\pm 3\%$
-

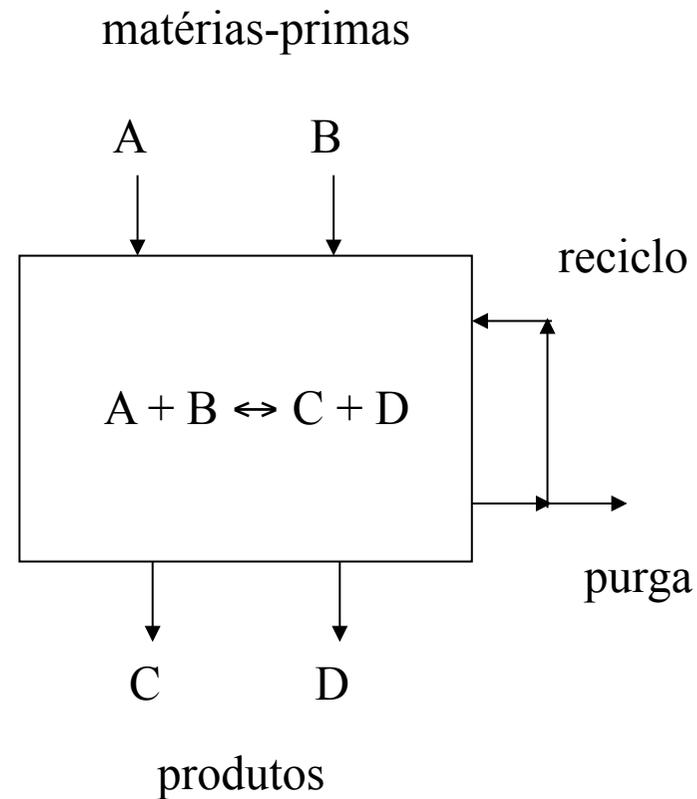
Projeto conceitual

- Inicia-se pela **síntese do** processo, isto é, pela definição de uma sequência de operações que permitem transformar as matérias-primas em produtos.
 - Deseja-se selecionar uma opção entre milhares de rotas possíveis, considerando desempenho econômico e ambiental.
 - A síntese é realizada com informações incompletas, cálculos aproximados, uso de heurística (regras práticas)
 - Método de engenharia: inicialmente apenas aspectos essenciais, refinamentos sucessivos.

Projeto conceitual

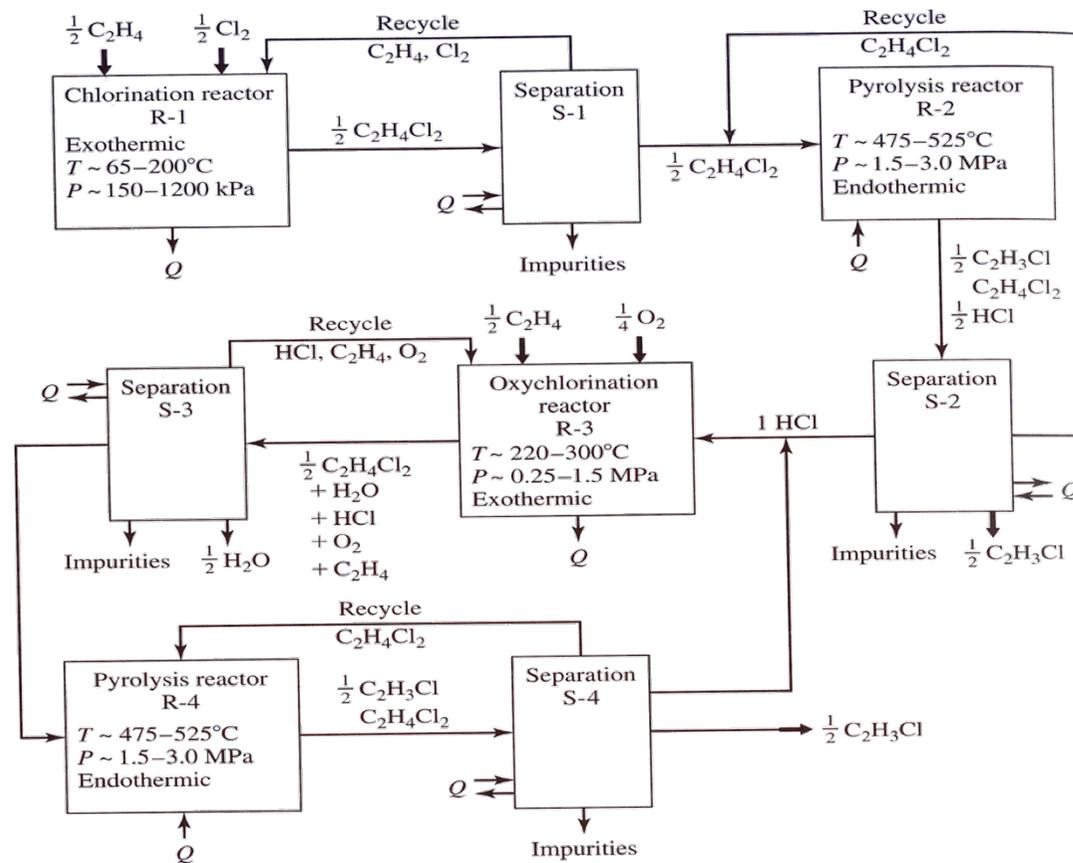
- Na sua fase inicial, o projeto preliminar permite estimar viabilidade econômica preliminar, de ordem de grandeza, baseada em processos similares. Erro $\pm 50\%$
- Tal estimativa serve para orientar a seleção de alternativas de processo mais promissoras num estágio inicial do projeto (rapidamente e com baixo custo de desenvolvimento)

Diagrama de entradas e saídas



A síntese do processo

- Diagrama de blocos



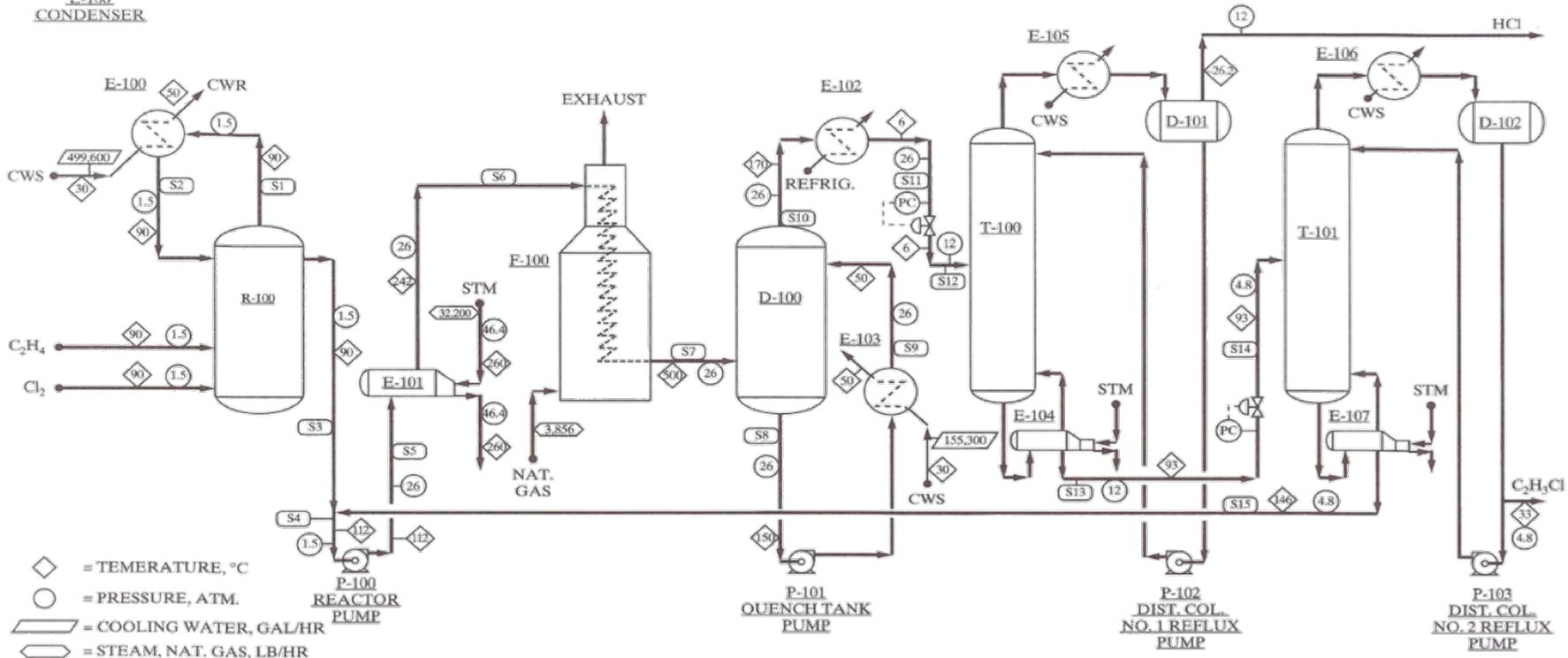
Projeto conceitual

- É constituído pelos seguintes documentos:
 - Fluxograma de processo com Memorial Descritivo;
 - Balanços de massa e de energia;
 - Especificação preliminar dos equipamentos principais de processo: tipo, condições de operação, dimensões principais, materiais de construção;
 - Especificação das utilidades: quantidade e qualidade da água, vapor, energia elétrica, etc.;
 - Integração energética;
 - Estratégia de controle do processo;

Projeto conceitual

- Viabilidade econômica
 - Baseada no dimensionamento dos equipamentos principais, erro $\pm 25\%$

R-100 DIRECT CHLORINATION REACTOR
 E-101 EVAPORATOR
 F-100 PYROLYSIS FURNACE
 D-100 QUENCH TANK
 E-102 CONDENSER
 E-103 COOLER
 E-104 REBOILER
 D-101 REFLUX ACCUMULATOR
 T-100 DISTILLATION COLUMN NO.1
 E-105 CONDENSER
 T-101 DISTILLATION COLUMN NO.2
 E-106 CONDENSER
 E-107 REBOILER
 D-102 REFLUX ACCUMULATOR
 E-100 CONDENSER



COMPONENTS	STREAM	FORMULA	M. W.	M. BOILING POINT, °F	FREEZING POINT, °F	C ₂ H ₄	CL ₂	C ₂ H ₃ CL	HCL	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15
ETHYLENE	1	C ₂ H ₄	28.05			44,900																		
CHLORINE	2	CL ₂	70.91				113,400																	
1,2-DICHLOROETHANE	3	C ₂ H ₄ CL ₂	98.96							1,040,000	1,040,000	158,300	263,800	263,800	263,800	105,500	559,000	559,000	105,500	105,500	105,500	105,500	105,500	105,500
VINYL CHLORIDE	4	C ₂ H ₃ CL	62.50					100,000								100,000	146,000	146,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
HYDROGEN CHLORIDE	5	HCL	36.46						58,300							58,300	27,000	27,000	58,300	58,300	58,300			
	6																							
	7																							
	8																							
	9																							
	10																							
FLOW BASIS						TOTAL																		
DAYS PER YEAR	330					LBMOLE-HOUR																		
INSTANTANEOUS FLOWS = 1						POUNDS/HOUR																		
AVERAGE FLOWS = A																								
BATCH QUANTITY = B																								
PER HOUR																								
PHASE DESIGNATION																								
VAPOR = V LIQUID = L SOLID = S																								
MIXED PHASE = V-L, V-S, L-S																								

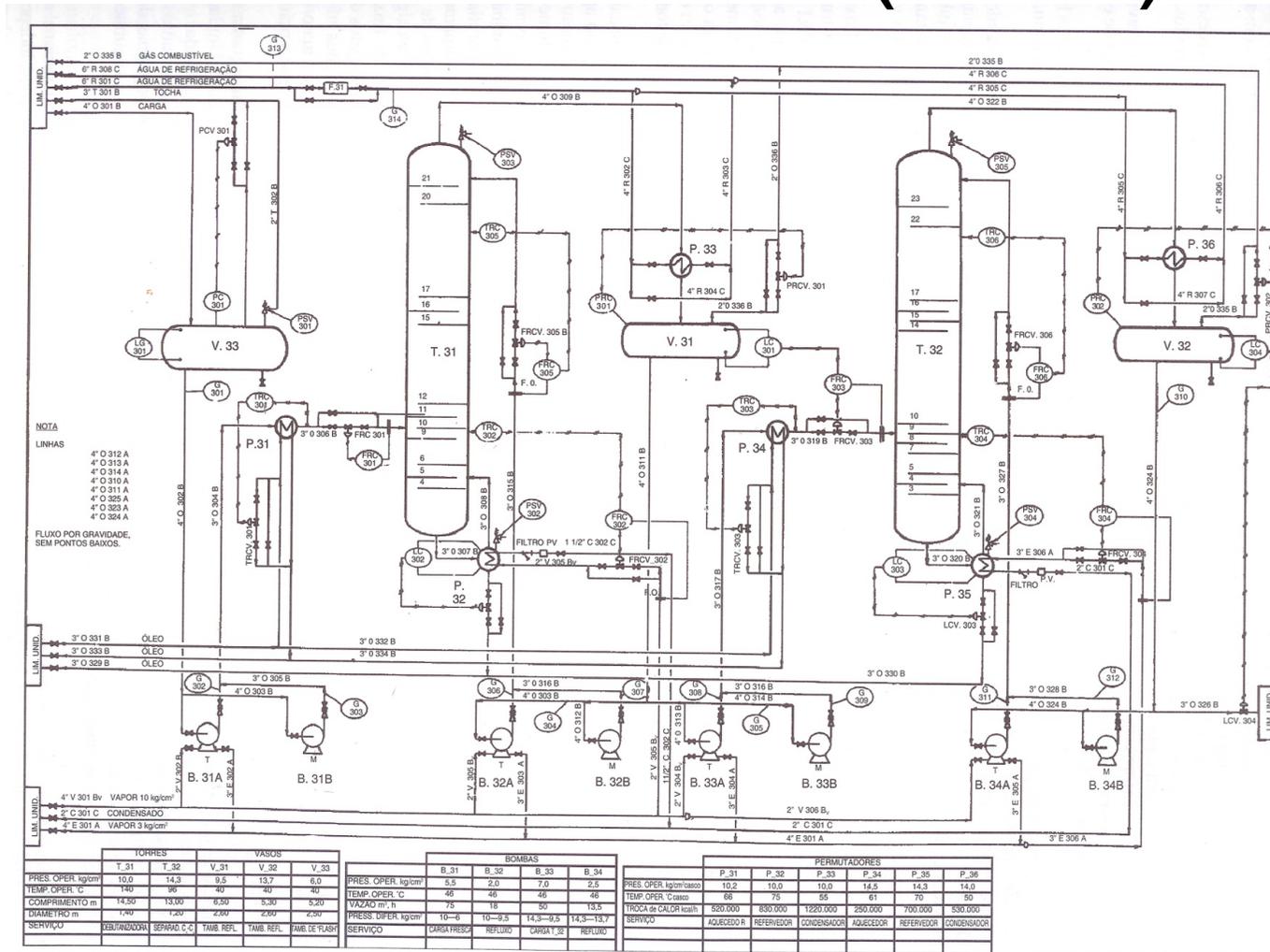
Projeto básico

- O projeto básico somente é executado se a decisão de investir no empreendimento tiver sido tomada, com base nos resultados do projeto conceitual.
- Documentos:
 - Fluxograma de processo com indicação de tubulações e instrumentação (“P & I, piping and instrumentation”);
 - Lista de todos os equipamentos de processo contidos nos limites de bateria;
 - Arranjo físico (“lay-out”) preliminar;
 - Manual de operação;
 - Diagrama elétrico e de intertravamento;

Projeto básico

- Estimativa de custos de construção e operação com margem de erro de ± 10 a 20% .

Fluxograma de Tubulações e Instrumentos (P & I)



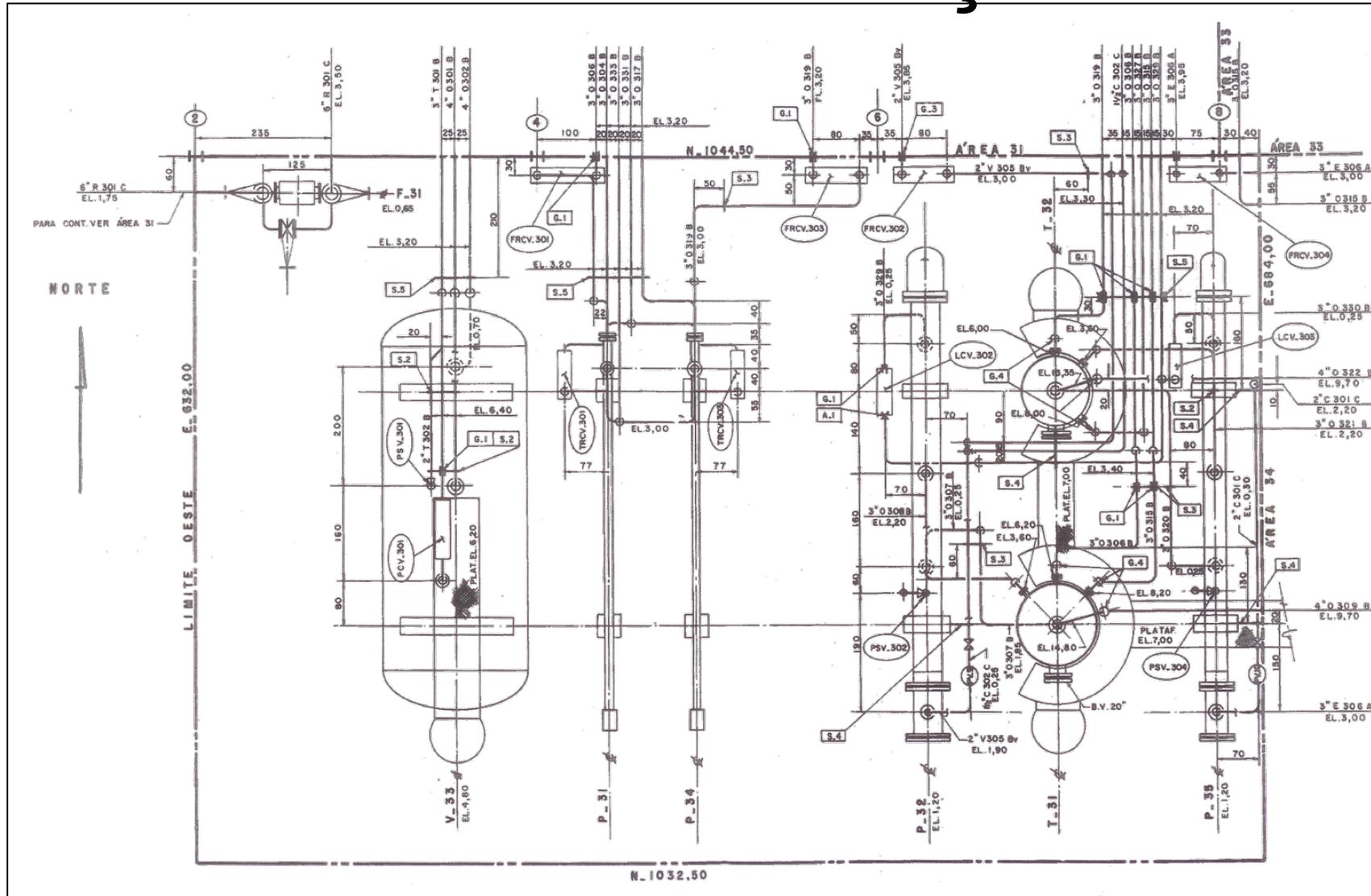
Projeto de engenharia (detalhado)

- Além das informações do Projeto Básico, inclui:
 - desenhos em planta, elevações e perspectivas (isométricas) de equipamentos, tubulações, instalações, estruturas de suporte e edifícios;
 - detalhes construtivos de equipamentos;
 - Diagramas de elétrica, tubulação e instrumentação

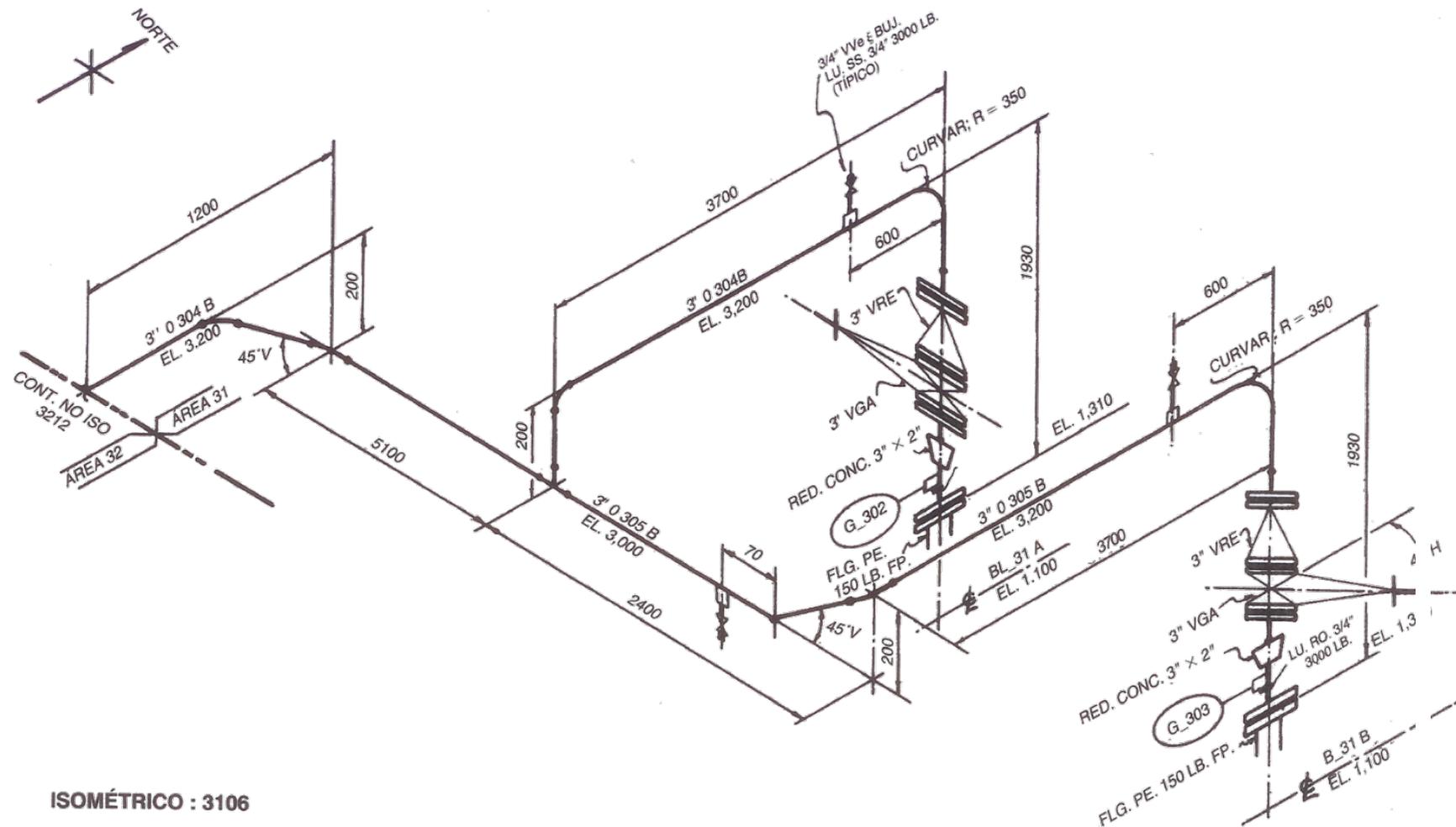
Projeto de engenharia (detalhado)

- Projeto executivo
 - No projeto executivo todos os desenhos e descrições são suficientemente detalhados para construir a unidade ou montar equipamentos e instalações.

Planta de tubulações



Tubulações em perspectiva isométrica



ISOMÉTRICO : 3106

FC

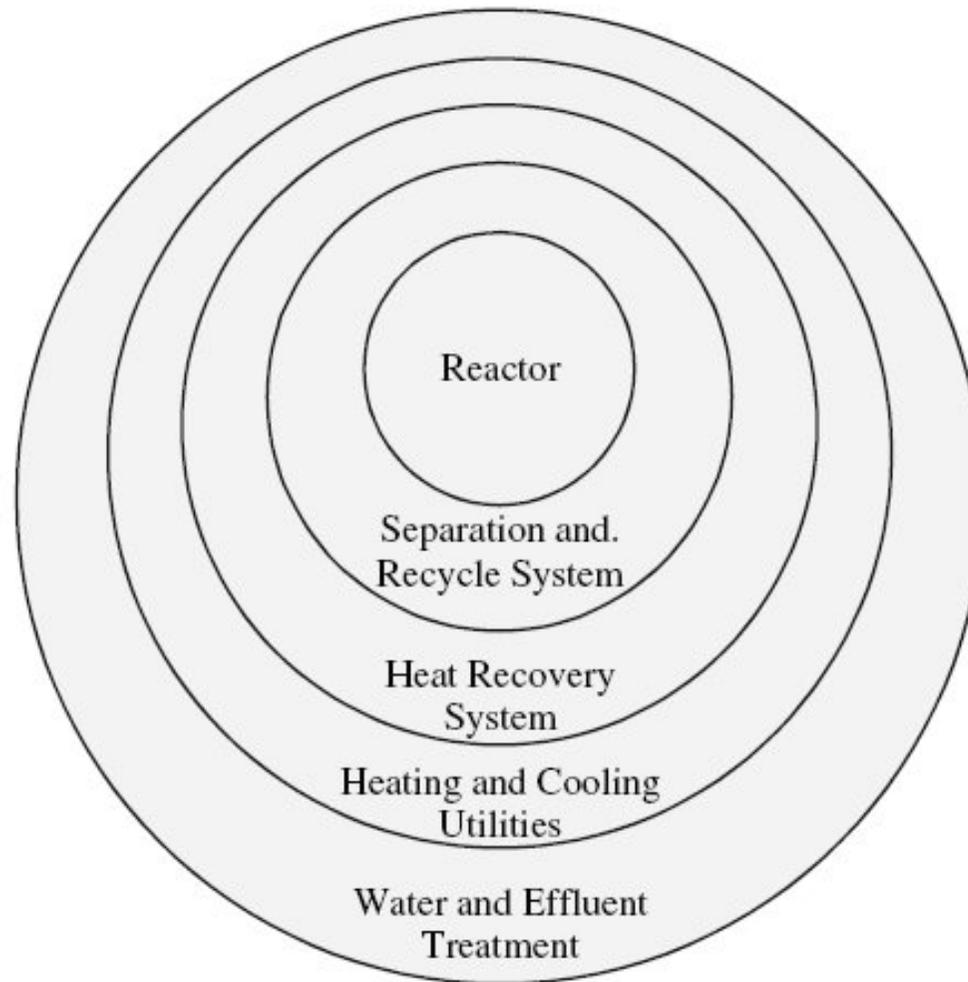
LINHAS : 30" O 304 B; 30" O 305 B

PROJETO CONCEITUAL (DOUGLAS)

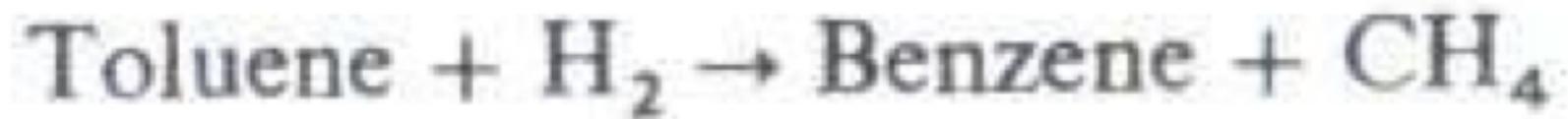
Abordagem hierárquica para projeto conceitual

- Método de engenharia:
 - Inicia-se desenvolvendo-se soluções muito simples, aproximadas
 - Adicionam-se camadas de detalhe sucessivamente
 - É importante ter em mente as variáveis de decisão em cada nível

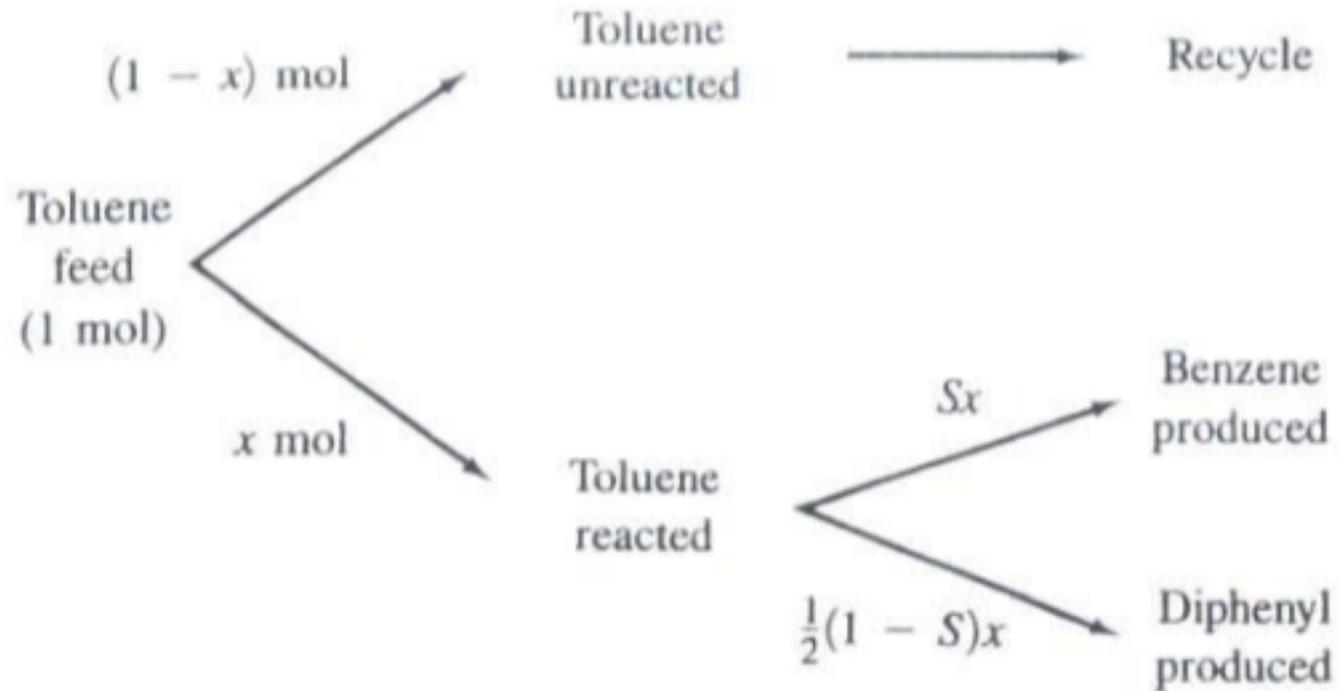
Abordagem Hierárquica



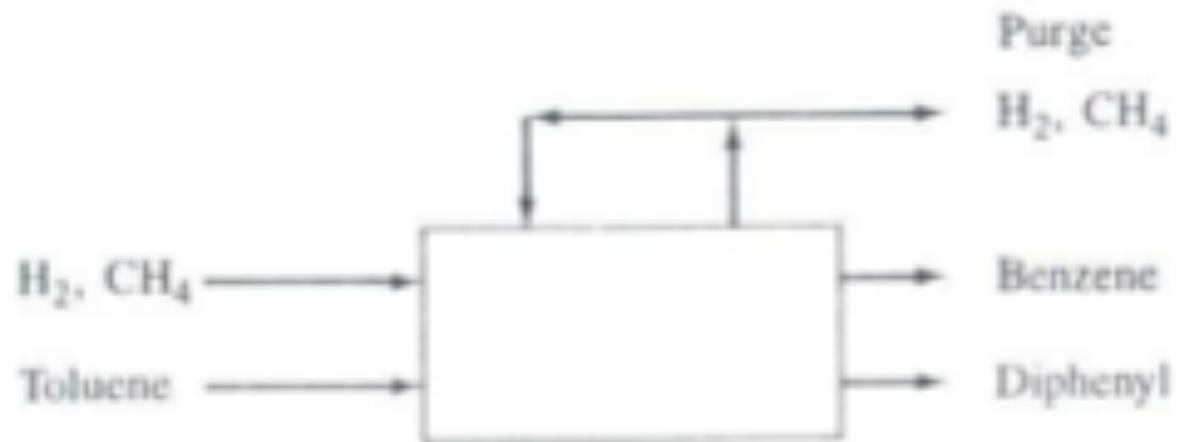
Processo HDA



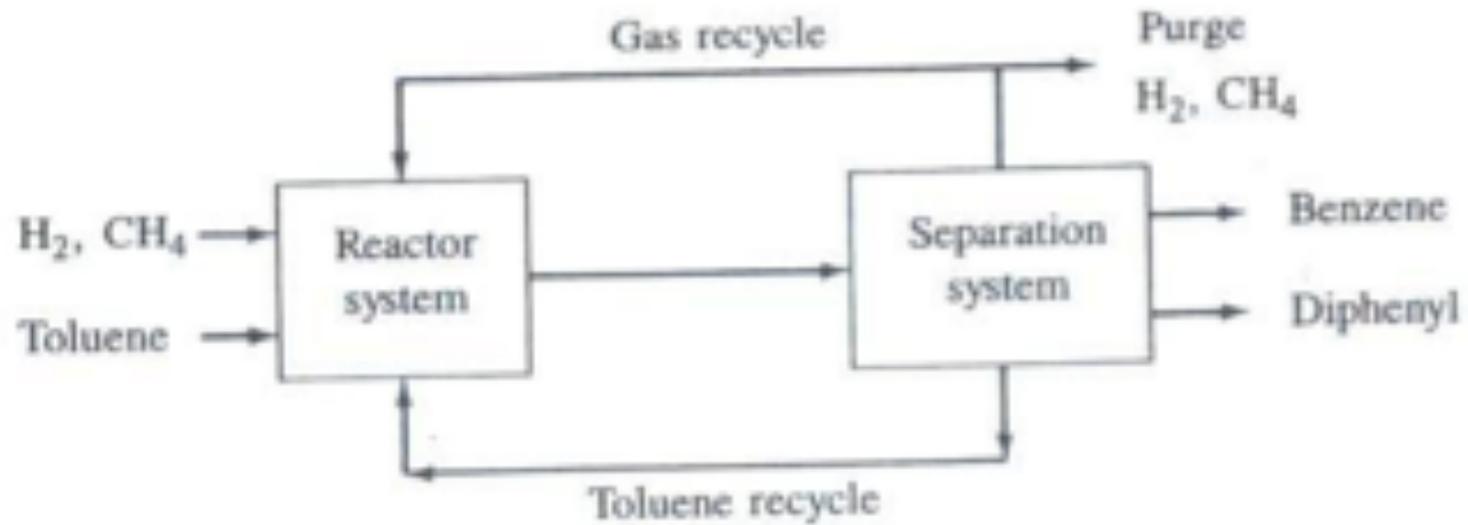
Processo HDA



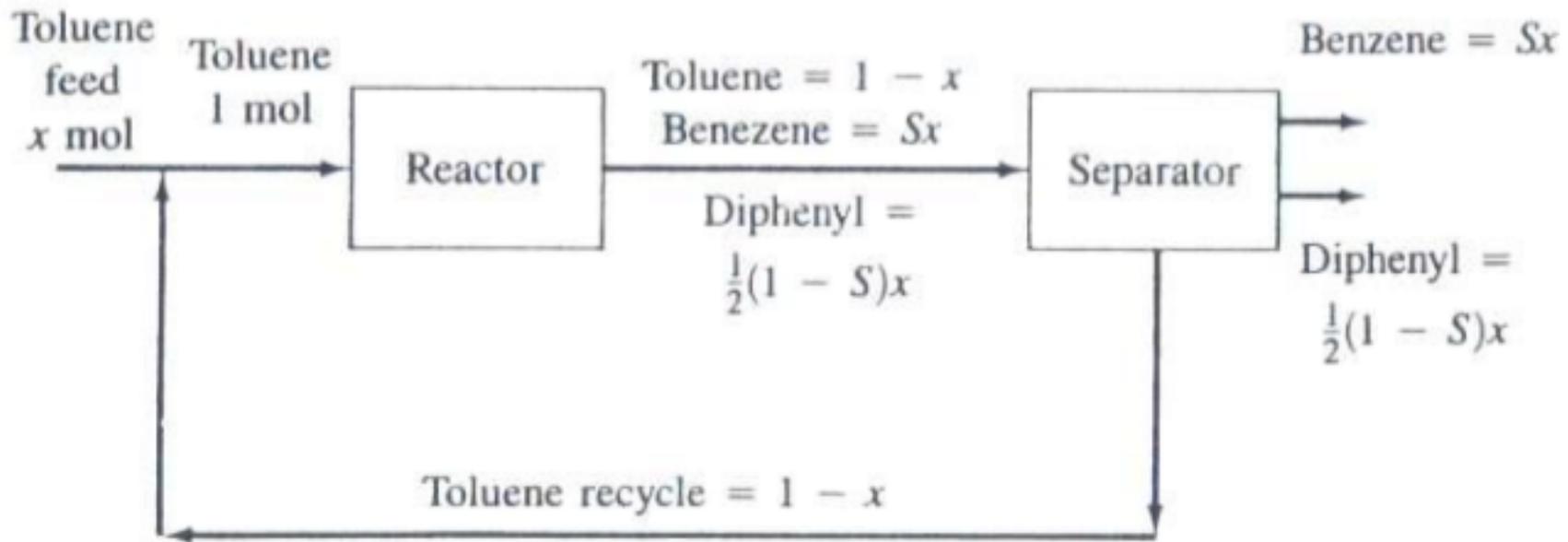
Processo HDA



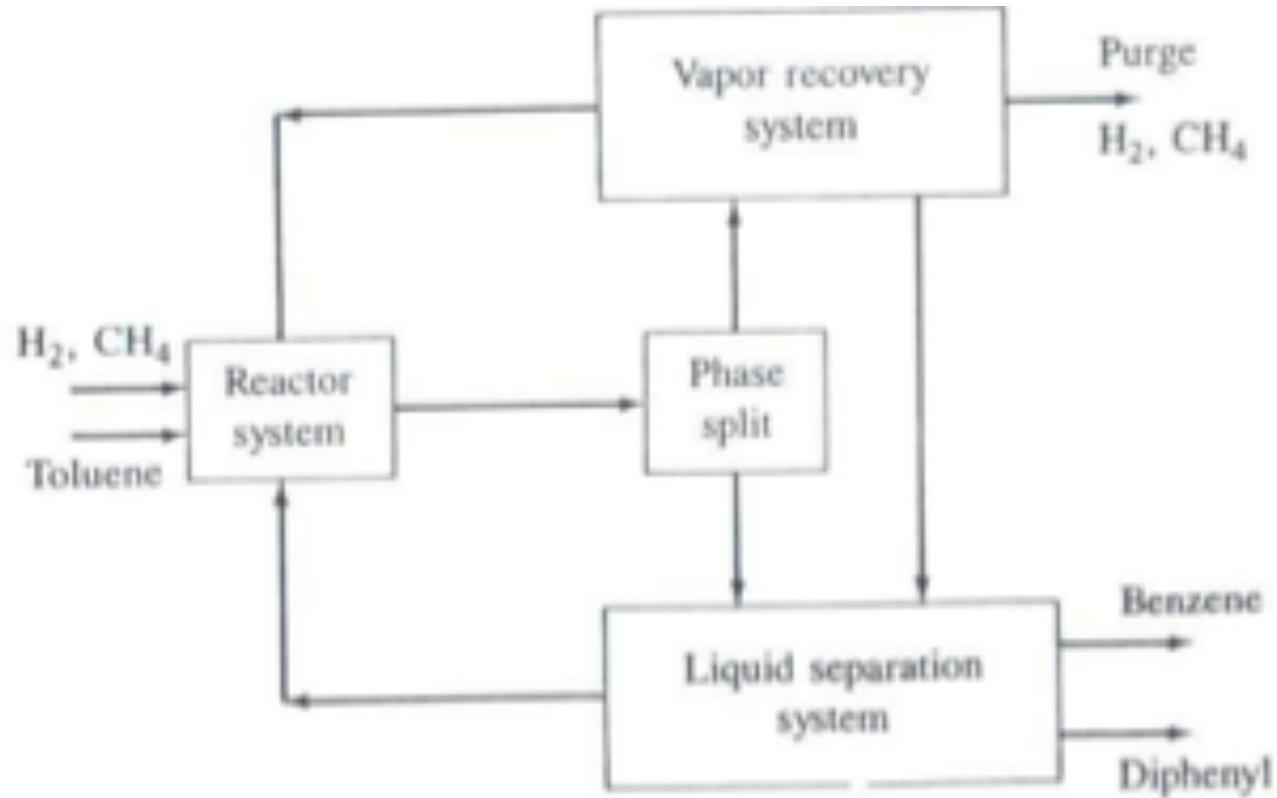
Processo HDA



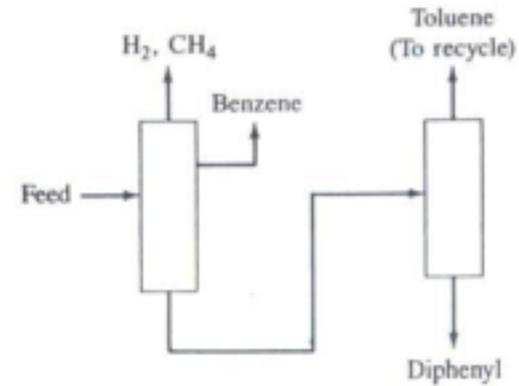
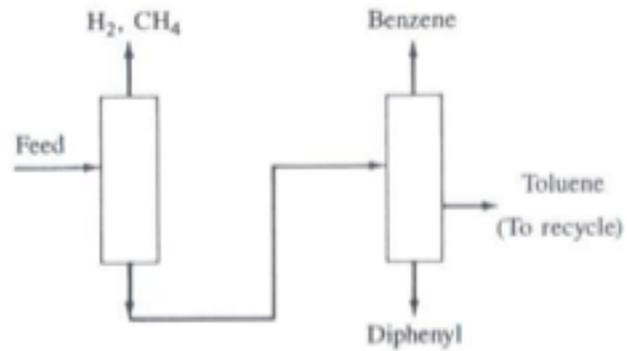
Processo HDA



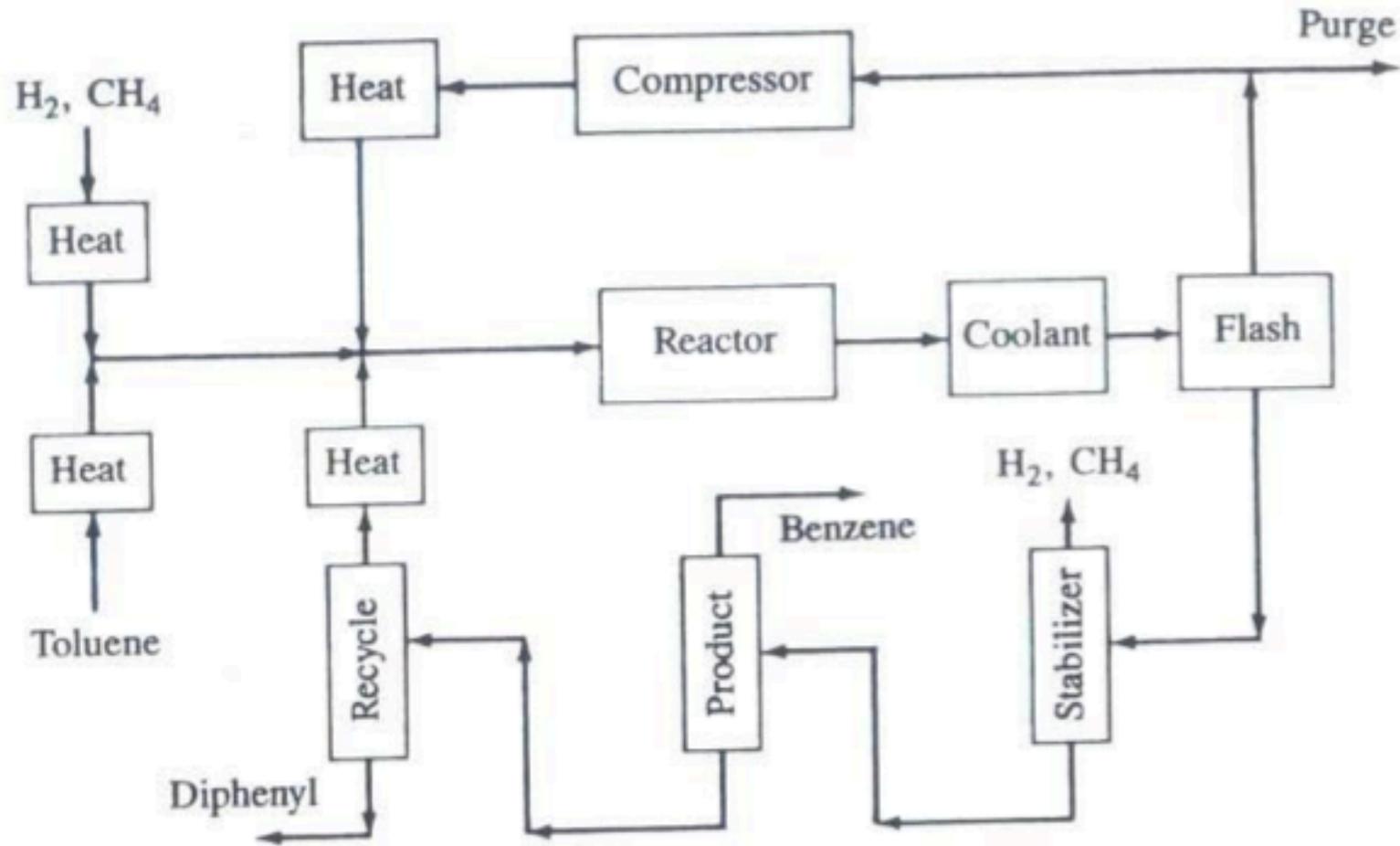
Processo HDA



Processo HDA



Processo HDA



ANÁLISE ECONÔMICA

Projeto de Processos

- Toda decisão deve ser baseada em custos
 - Respeitadas as restrições de segurança, ambientais e de facilidade de operação

Análise Econômica

- Custo = compromisso entre custos fixos e custos variáveis
- Comparação com outras oportunidades de investimento: valor temporal. Custo de oportunidade.

Análise Econômica – custos variáveis

- Os custos variáveis são compostos por:
 - ◆ Utilidades
 - ◆ Operação (mão de obra e serviços)
 - ◆ Manutenção
 - ◆ Overhead operacional
 - ◆ Depreciação
 - ◆ Vendas
 - ◆ administração

Análise Econômica – custos Fixos

- Os custos Fixos são compostos por:
 - Equipamentos
 - Custo de preparação do terreno e instalação da infraestrutura
 - Infraestrutura de utilidades
 - Custo de contingências
 - Custo do terreno + royalties + Start-up
 - Capital de giro

Análise Econômica – Medidas de Rentabilidade

- Aproximadas

- ◆ Retorno sobre o investimento (ROI)

$$\text{ROI} = \frac{S - \text{Custos de Operação} - \text{impostos}}{C_{\text{TCI}}}$$

- ◆ Período de retorno (Payback period)

$$\text{PBP} = \frac{C_{\text{TDC}}}{S - \text{COS} - \text{impostos} + \text{depreciação anual}}$$

- ◆ TAC – custo total anualizado

Análise Econômica – Medidas de Rentabilidade

- Valor presente líquido (NPV)
 - Corrigir o fluxo de caixa ao valor atual
 - Levar em conta a depreciação
 - Os fluxos de caixa são anualizados e convertidos ao valor presente, com uma taxa de juros pré-definida
 - pode se ver em quanto tempo o retorno é positivo
- IRR – Taxa de Retorno do Investidor
 - Cálculo análogo ao anterior mas com prazo fixo
 - A ideia é achar a taxa que faz que o valor presente líquido seja zero neste prazo

SISTEMATIZAÇÃO

Sistematização

- Coleção de perguntas e compromissos econômicos
 - Variam de autor para autor
 - É importante que sejam extensivas
- Ter em mente a diferença entre projeto conceitual e o simples dimensionamento de equipamentos
 - No projeto conceitual fica a cargo do projetista definir as especificações

Douglas

- Informação de entrada
 1. Reações e condições de reação
 2. As vazões de produção desejadas
 3. As purezas desejadas dos produtos e/ou alguma informação sobre a relação entre pureza e preço
 4. As matérias primas e/ou alguma informação sobre a relação entre pureza e preço
 5. Informações sobre as taxas de reação e taxa de desativação dos catalisadores
 6. Qualquer restrição de processamento
 7. Outros dados sobre a planta ou sobre o seu local
 8. Propriedades físicas de todos os componentes
 9. Informações a respeito de segurança, toxicidade e impacto ambiental dos materiais envolvidos no processo
 10. Dados de custo para subprodutos, equipamentos e utilidades

Douglas

- Informação sobre reações
 1. A estequiometria de todas as reações envolvidas
 2. Os limites de temperatura e pressão para as reações
 3. As fases das reações
 4. Alguma informação sobre a distribuição de produtos em função da conversão
 5. Informação sobre a conversão em função da velocidade espacial ou do tempo de residência
 6. Se algum catalisador for ser usado informação sobre o estado do catalisador e sobre a sua taxa de desativação e sobre a sua regeneração (método)

Douglas

- Dados da planta e do local
 1. Utilidades
 - a. Suprimento de combustíveis
 - b. Níveis de pressão do vapor
 - c. Entrada de água de resfriamento e temperaturas de saída
 - d. Níveis de refrigeração
 - e. Energia elétrica
 2. Facilidades de disposição de resíduos

Douglas

- Hierarquia das decisões
 1. Batch vs contínuo
 2. Estrutura de entrada e saída do processo
 3. Estrutura de reciclo do processo
 4. Estrutura geral de separação
 - a. Sistema de recuperação de Vapor
 - b. Sistema de separação de líquido
 5. Rede de trocadores de calor

Douglas

- Nível 2 de decisões
 1. As correntes de alimentação devem ser purificadas antes de entrar no processos?
 2. Deve-se remover ou reciclar subprodutos reversíveis?
 3. Deve-se usar um reciclo de gás e correntes de purga?
 4. Não devemos nos preocupar com a recuperação e reciclo de alguns reagentes?
 5. Quantas correntes de produto haverá?
 6. Quais são as variáveis de projeto para a estrutura de entrada e saída e qual o compromisso entre as diferentes variáveis?

Douglas

- Procedimentos para implementar os balanços globais de massa
 1. Comece com a vazão de produto especificada
 2. A partir da estequiometria (ou das relações de distribuição de produto para reações complexas) calcule as vazões de subprodutos e de reagentes(em função das variáveis de projeto)
 3. Calcule as vazões de entrada e saída das impurezas para as correntes de alimentação quando os reagentes são totalmente recuperados e reciclados
 4. Calcule as vazões de saída de reagentes em função de um excesso especificado (além dos requisitos da reação) quando os reagentes não forem recuperados e reciclados completamente (reciclo e purga de ar ou água)
 5. Calcule as vazões de entrada e saída para as impurezas que entram com as correntes consideradas no item 4

Douglas

- Variáveis de projeto possíveis para o nível 2
 - Reações complexas: conversões no reator, razões molares de reagentes, temperatura e pressão de reação
 - Excesso de reagentes: reagentes não recuperados ou reciclo e purga de gases

Douglas

1. Quantos reatores são necessários? Há alguma separação entre reatores?
2. Quantas correntes de reciclo são necessárias?
3. É necessário usar um excesso de algum reagente na entrada do reator?
4. O reator deve ser operado adiabaticamente, com aquecimento ou resfriamento direto, ou algum diluente ou agente de calor é necessário?
5. Deseja-se manipular a conversão de equilíbrio? Como?
6. Como os custos do reator afetam o potencial econômico?

Douglas

Na sequência:

- Detalhamento da separação
- Detalhamento de integração energética

Será visto depois

Bibliografia

- BIEGLER, L.T., GROSSMANN, I.E., WESTERBERG, A.W. Systematic methods of chemical process design. Prentice Hall, 1997.
- DOUGLAS, J.M. Conceptual process design. McGraw-Hill, 1988.
- EL-HALWAGI, M.M. Sustainable Design through Process Integration. Fundamentals and Applications to Industrial Pollution Prevention, Resource Conservation, and Profitability Enhancement, Elsevier, 2017
- PETERS M.S., TIMMERHAUS, K.D. Plant design and economics for chemical engineers. McGraw-Hill, 4a. Ed. 1991, 5a. Ed. 2003.
- SEIDER, W.D., SEADER, J.D., LEWIN, D.R., WIDADGO, S., *Product and Process design principles: Synthesis, Analysis and Design, 3rd Ed.* John Wiley & Sons, 2009
- SMITH, R. Chemical process design and integration, Wiley, 2005.
- TURTON, R., BAILIE, R.C., WHITING, W.B., SHAEIWITZ, J.A., BHATTACHARYYA, D., *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*, 4th Edition, Prentice Hall, 2012