



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Análise do Processo de Separação Criogênica de Ar através do HYSYS®

Autor: Cássio Silva Takarada



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



Análise do Processo de Separação Criogênica de Ar através do HYSYS®

Autor: Cássio Silva Takarada

**Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia
como parte dos requisitos necessários
para a aprovação na disciplina do
Projeto de Graduação do curso de
Engenharia Química.**

Uberlândia – MG
2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA DE
GRADUAÇÃO DE CÁSSIO SILVA TAKARADA, APRESENTADA À UNIVERSIDADE
FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 08 DE JANEIRO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro
Orientador – FEQUI/UFU

Prof. Dr. Rubens Gedraite
Co-Orientador – FEQUI/UFU

Prof. Dr^a. Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros
FEQUI/UFU

Prof. Dr. Ubirajara Coutinho Filho
FEQUI/UFU

Sumário

RESUMO	i
 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	 1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.3 Definições importantes e a aplicação do HYSYS®	2
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Conceitos guia para uma simulação ótima.....	6
2.1.1 <i>Process Flow Diagram</i> (PFD).....	6
2.1.2 Diagrama de Cebola.....	8
2.1.2 <i>Hazard and Operability Study</i> (HazOp).....	9
2.2 Particularidades do processo e suas operações unitárias	11
2.3 Consumo de Energia	13
CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Materiais Utilizados	15
3.2 Implementação	15
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1 Implementação	20
4.2 Consumo de energia	23
4.3 Pureza de oxigênio.....	25
4.4 HazOp.....	26
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	27
ANEXO A	29
ANEXO B.....	34
ANEXO C	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

Lista de Figuras:

Figura 1: Representação do Processo de Separação Criogênica de Ar através do software Edraw®.....	4
Figura 2: Diagrama de cebola (Smith, 2005).	9
Figura 3: Representação de dois trocadores de calor casco-tubo (Smith, 2005).....	12
Figura 4: Representação do processo no software HYSYS®.....	16
Figura 5: Representação do modelo alternativo implementado no HYSYS®.....	18
Figura 6: Diferença entre os resultados dos compressores K-102 para o modelo utilizando coolers (à esquerda) e trocadores de calor casco-tubo (à direita).....	20
Figura 7: Comparação de MHX1 dos dois modelos.	29
Figura 8: Comparação de MHX2 dos dois modelos.	29
Figura 9: Comparação de K-101 dos dois modelos.	30
Figura 10: Comparação de E-103 dos dois modelos.....	30
Figura 11: Comparação de E-104 dos dois modelos.....	30
Figura 12: Comparação de T-100 dos dois modelos.....	31
Figura 13: Comparação de T-101 dos dois modelos.....	31
Figura 14: Compressor K-100.....	32
Figura 15: Splitter TEE-100.....	32
Figura 16: Splitter TEE-101.....	33
Figura 17: Válvula VLV-100.	33
Figura 18: Válvula VLV-101.	33

Lista de Quadros:

Quadro 1: Lista das letras de respectivos equipamentos de um PFD (Turton et al, 2008).	7
Quadro 2: Identificação de cada corrente (Turton, 2008).	8
Quadro 3: Planilha utilizadas no estudo HazOp.	10
Quadro 4: Planilha utilizada no estudo HazOp.....	10
Quadro 5: Identificação dos equipamentos utilizados no processo.	11
Quadro 6: HazOp realizado para o parâmetro Pressão no para o equipamento E-100 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.....	35
Quadro 7: HazOp realizado para o parâmetro Vazão de água de resfriamento no para o equipamento E-100 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.	35
Quadro 8: HazOp realizado para o parâmetro Pressão no para o equipamento E-101 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.....	36
Quadro 9: HazOp realizado para o parâmetro Vazão de água de resfriamento no para o equipamento E-101 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.	36
Quadro 10: HazOp realizado para o parâmetro Pressão no para o equipamento E-102 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.....	37
Quadro 11: HazOp realizado para o parâmetro Vazão de água de resfriamento no para o equipamento E-102 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.	38
Quadro 12: HazOp realizado para o parâmetro Fluxo de fluido no splitter TEE-100.....	38
Quadro 13: HazOp realizado para o parâmetro Fluxo de fluido no splitter TEE-101.....	38

Lista de Tabelas:

Tabela 1: Composição típica de ar seco ao nível do mar (Castle, 2000).....	3
Tabela 2: Correntes do processo utilizando trocadores de calor casco-tubo.....	22
Tabela 3: Informações das correntes energéticas do processo utilizando trocadores de calor casco-tubo.....	23
Tabela 4: Condições da divisão de correntes no splitter TEE-100 e as implicações no consumo de energia de K-101 e K-102.	24
Tabela 5: Condições da divisão de correntes no splitter TEE-100 e as implicações na pureza de oxigênio na corrente “Oxigênio”.	25
Tabela 6: Informações das correntes mássicas do processo utilizando coolers.	34
Tabela 7: Informações das correntes energéticas do processo utilizando coolers.....	34

RESUMO

O processo de separação criogênica de ar é extremamente importante para diversas outras plantas industriais, como para a alimentação de processos de combustão, e, também, comerciais, como cilindros de oxigênio para hospitais. O processo é extremamente delicado e com alto custo energético, e por isso o estudo sobre o assunto é vital. O presente trabalho visou a implementação da planta de separação criogênica de ar através de colunas de destilação. Assim como apresentou-se a teoria e particularidades acerca do processo de separação criogênica de ar, e o modo operante do software utilizado. Após estes apontamentos, foi levantado o procedimento experimental da realização do projeto. Com o objetivo de obter oxigênio puro para fins de alimentação de plantas que necessitam de combustão, os resultados obtidos foram satisfatórios, onde, levando em consideração o consumo energético da planta e a pureza de oxigênio no produto, o processo ótimo realiza-se quando a razão da divisão de correntes em TEE-100 é entre 39 e 40% de extrato (61 e 60% de R_{total}). Por fim, concluiu-se que o processo, através da simulação no HYSYS[®], é viável tanto em relações energéticas, quanto de produtividade e segurança e operabilidade.

Palavras-chave: *simulação, separação criogênica e otimização*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A distância entre a Universidade e a prática ainda é muito grande, devido, inclusive, às burocracias e leis brasileiras. Existe uma infinidade de casos práticos que ainda necessitam ser mais estudados. Diferente, por exemplo, da Usina de Álcool e Açúcar, a qual já está bem implementada no Brasil, ou a produção de Benzeno através de Tolueno, a qual é descrita em vários livros inclusive em *Chemical Process Design and Integration* (Smith, 2005) – um dos livros utilizados para a defesa deste trabalho; plantas como a Separação Criogênica de Ar ainda podem e devem ser melhor investigadas e otimizadas. Estes estudos integrados aos Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC) possibilitam não só uma melhor inserção do Engenheiro Químico, que o afere, na indústria, como proporciona um material, possivelmente inédito, para outros engenheiros analisarem. Além disso, é considerado um benefício mútuo, pois quando acordado com a indústria, oferece uma solução a uma falha recorrente da planta, que por muitas vezes pode ser considerada irrelevante perante a outros problemas, mas que faz total diferença na otimização da planta quando resolvida.

Em um contexto histórico, a profissão de Engenheira Química nasceu da necessidade de instalações químico-industriais. “Com o advento da revolução industrial iniciada na Inglaterra no século XVIII, certos produtos químicos como ácido sulfúrico, carbonato de sódio e potássio passaram a ser constantemente requisitados em escala industrial para a produção de têxteis, vidros, sabão, entre outros” (BetaEQ, 2015). Engenheiros Mecânicos operavam as indústrias nessa época, porém não tinham nenhum conhecimento técnico em processos químicos, assim surgiu a necessidade e aprofundamento dos Engenheiros nesta área. Com o avanço dos estudos em Engenharia Química, outras necessidades foram requisitadas desses engenheiros. Uma delas é a otimização de plantas industriais em geral, devido ao amplo conhecimento em termodinâmica, fenômenos de transporte, operações unitárias e, em caso de processos químicos, cinética química e reatores.

Atualmente, foi detectado a necessidade de estudar o processo de separação criogênica de ar devido algumas insuficiências da planta em relações energéticas e de performance, bem como de segurança. Este é o principal processo de separação de ar que produz grandes quantidades de oxigênio, nitrogênio e argônio puro (Zhou et al , 2016), e que envolve várias operações unitárias, as quais podem ser desmembradas para futuros estudos. Além disso, é um

caso pouco estudado pelo curso de Engenharia Química, o qual poderá ser introduzido com maior frequência conforme sua progressão em artigos acadêmicos. Dos custos da planta, o maior contribuinte é o preço da energia elétrica (Misra et al, 2016). Deste modo, a implementação da planta em um software de simulação, como o HYSYS[®], faz-se necessário possibilitando assim, não apenas um estudo mais profundo sobre integração energética – diminuindo substancialmente os custos da mesma – como também a previsão de perigos e riscos que funcionários da planta sofrem sob as condições de trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o Processo de Separação Criogênica do Ar através do software de simulação HYSYS[®] para otimizar a planta em relação ao consumo energético, bem como maximizar sua produtividade, prevendo riscos de segurança e operabilidade que a planta oferece.

1.2.2 Objetivos Específicos

Além do levantamento bibliográfico sobre o processo e seu estudo, será realizado a utilização do software HYSYS[®] para implementação do sistema e identificação de melhorias, otimizando o processo, onde devido ao elevado consumo energético, o estudo do processo faz-se viável para que o mesmo aumente sua produtividade e pureza de oxigênio, minimizando o consumo de energia através de alterações comportamentais da produção com foco no oxigênio. Desta maneira, por fim, através da aplicação do *Hazard and Operability Study* (HazOp), será levantado um estudo sobre os riscos de segurança e operabilidade que a planta oferece. Assim, espera-se alcançar a aproximação entre o universo acadêmico e industrial, gerando futuros projetos de graduação e incentivando outras oportunidades semelhantes.

1.3 Definições importantes e a aplicação do HYSYS[®]

Ar é um fluido altamente versátil. Além de ser crucial para nossa sobrevivência, pode ser utilizado em indústrias para troca de calor, tanto para aquecimento quanto resfriamento de outros fluidos. Um exemplo disso é o Ciclo Reverso de Carnot e de Brayton. Outro processo que necessita de ar para seu funcionamento é a combustão de toda e qualquer substância. Este fato se deve a obrigatoriedade da existência de oxigênio para que a combustão ocorra.

A composição típica do ar seco é mostrada na Tabela 1 abaixo. Os principais componentes são nitrogênio, oxigênio e argônio.

Tabela 1: Composição típica de ar seco ao nível do mar (Castle, 2000).

Componente	Fração no ar	Componente^b	Fração no ar
Nitrogênio	78,09%	Metano	1 – 2 vppm ^c
Oxigênio	20,95%	Acetileno	<1 vppm
Argônio	0,93%	Kriptônio	1,14 vppm
Dióxido de Carbono	350 vppm	Óxido Nítrico	0,5 vppm
Monóxido de Carbono	3 – 5 vppm	Hidrogênio	0,5 vppm
Neônio	18 vppm	Ozônio	0,4 vppm
Hélio	5,2 vppm	Xenônio	0,086 vppm

^a: considerando ar seco

^b: Composição por volume

^c: vppm: Parte por milhão em volume.

A separação do ar torna-se crucial quando o custo-benefício da operação é viável e seus principais componentes são peças-chaves para outros processos e/ou são comercializáveis, como no caso de cilindros de oxigênio para hospitais. O maior uso comercial do gás oxigênio é na indústria de aço. Outros processos que utilizam grandes quantidades de gás oxigênio é a manufatura de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio. O nitrogênio possui uma maior gama de usos industriais e comerciais quando comparado com o oxigênio. As indústrias que mais requerem este componente são as de fertilizantes, ácido nítrico, *nylon* e explosivos. Esta substância também é comercializável como nitrogênio líquido para processos de criogenia, a qual pode ser utilizada, por exemplo, na gastronomia, congelamento óvulos, entre outras finalidades.

Ar é a única matéria-prima a qual é grátis e ilimitada, porém tem um alto custo operacional de separação, principalmente quando relacionado ao consumo de energia, que chega a ser superior à 90% do seu custo operacional (Adamson, 2016). Existem vários

processos de separação dos componentes do ar atualmente, porém os três mais utilizados são os métodos criogênico e dois não criogênicos, sendo estes por membrana e *pressure-swing adsorption (PSA)*. O processo criogênico possui a capacidade produtiva e qualitativa maior quando comparado com os outros processos, porém todos os processos ainda possuem melhorias a serem realizadas (Castle, 2002). No caso da separação criogênica o consumo de energia elétrica é o maior foco de otimização, visto que é consumida em grande escala para a separação principalmente do ar em oxigênio e nitrogênio, e subsequentemente compressão desses gases em líquido (Adamson, 2016).

O processo de separação criogênica de ar é descrito pelo *Process Flow Diagram (PFD)* abaixo feito no *software* Edraw®, e é a mesma implementação utilizada no HYSYS®:

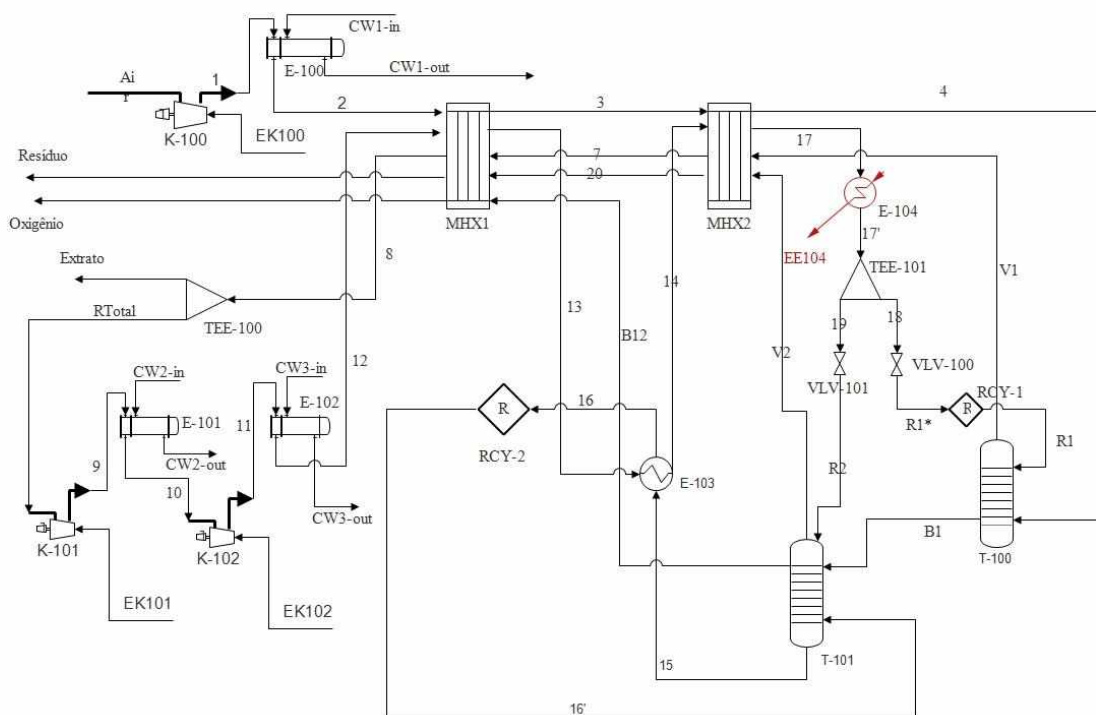


Figura 1: Representação do Processo de Separação Criogênica de Ar através do software Edraw®.

Basicamente, ar é comprimido e resfriado à temperatura ambiente (Fu et al, 2015) entra em duas colunas de destilação, onde o trocador E-103 atua como o reboiler da coluna T-101 e os trocadores de placa (MHX1 e MHX2) atuam como condensador da coluna T-100. Esta planta favorece/foca na produção de oxigênio. Nota-se pelo PFD que existe uma integração energética

entre algumas correntes (nos trocadores de placa MHX1 e MHX2), porém este processo ainda requer o uso de quatro trocadores de calor – E-100, 101, 102 e 104.

O HYSYS® não apenas é uma ferramenta de simulação, como também de análise e otimização de processos – característica crucial para um engenheiro, especialmente o químico. A aplicação desta planta no HYSYS® possibilita uma análise profunda e dinâmica do processo. Prevendo comportamentos diversos com diferentes integrações energéticas, inclusive proporcionando uma estimativa econômica do custo-benefício das possíveis mudanças em busca da otimização do processo, porém indicada em dólares americanos, pois o *software* em questão baseia-se na economia norte-americana. Também, *softwares* de simulação tem a capacidade de prever erros antes mesmo que eles aconteçam, contudo, obviamente, não se aproxima 100% do que ocorre na realidade. Além disso, no caso da planta de separação criogênica de ar, é possível estudar casos distintos, por exemplo, quando há foco na produção de oxigênio, foco na produção de nitrogênio ou foco na produção de argônio. Outros fatores que a aplicação do HYSYS® oferece é: otimização do *turnaround*, análise das margens para impulsão da rentabilidade, estudo da segurança e operabilidade e otimização da eficiência energética (Aspentech, 2018).

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho, foi avaliado o comportamento do Processo de Separação Criogênica de Ar através do *software* de simulação HYSYS®. Desta forma, aborda-se neste capítulo alguns conceitos importantes para a análise e otimização de processos, as particularidades teóricas do processo, passando por suas principais operações unitárias e o consumo de energia da planta – através da quantidade de água de resfriamento utilizada.

2.1 Conceitos guia para uma simulação ótima

A análise dos processos químico-industriais tanto em *greenfield* como uma planta em operação, é essencial para a realização da otimização do mesmo. Alguns conceitos auxiliam na avaliação operacional, de gestão e econômica, como o *Capital Expenditure* (Capex) e o *Operational Expenditure* (Opex) (Smith, 2005), que são baseados na economia norte-americana. Abaixo encontra-se os principais conceitos que guiaram as análises operacionais do processo.

- Process Flow Diagram (PFD);
- Diagrama de cebola;
- *Hazard and Operability Study* (HazOp).

2.1.1 *Process Flow Diagram* (PFD)

Existem três principais diagramas para a representação de uma planta perante a um Engenheiro o que estudará o processo industrial. São esses o *block flow diagram* (BFD), o *Process Flow Diagram* (PFD) e o *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID). No caso deste estudo o mais recomendado é o uso do PFD, pois o P&ID remete ao uso para o Engenheiro de Controle e o BFD contém informações mais básicas. O PFD contém dados maciços de engenharia química para o projeto, porém não existe um padrão universal a ser seguido – o que talvez ainda seja um problema onde cada planta demanda um certo tempo para ser interpretada dependendo de onde ela é provida. As informações que devem ser apresentadas no PFD são:

- Todos os equipamentos do processo identificados por um número juntamente com uma breve descrição do equipamento;
- Todas as correntes do processo identificadas por um número juntamente com uma breve descrição das condições de operação do processo e composição química;

- Todas as correntes de utilidades relacionadas ao processo (Turton et al, 2008);

As informações básicas fornecidas por um PFD podem ser categorizadas como topologia do processo, informações de correntes e informações sobre o equipamento (Turton et al, 2008). O formato geral da representação de cada equipamento e sua devida localização na planta é XX-YYY A/B, onde XX é a identificação do tipo de equipamento (ex.: bomba é representada pela letra P – *Pump*), Y é a área onde o equipamento se localiza na planta, ZZ é a representação do número do equipamento de uma mesma classe e A/B representam equipamentos paralelos que não são representados no PFD. O Quadro 1 abaixo mostra a nomenclatura utilizada por Turton no livro *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process* publicado em 2008 e é a mesma nomenclatura utilizada neste trabalho.

Quadro 1: Lista das letras de respectivos equipamentos de um PFD (Turton et al, 2008).

Letra	Equipamento
C	Compressores (<i>compressor</i>)
E	Trocadores de Calor (<i>heat exchanger</i>)
H	Aquecedor (<i>fired heater</i>)
P	Bomba (<i>pump</i>)
R	Reator (<i>reactor</i>)
T	Torre (<i>tower</i>)
TK	Tanque de armazenamento (<i>Storage Tank</i>)
V	Vaso (<i>vessel</i>)

Por exemplo, a bomba (P) representada por P-101 A/B indica que este equipamento se encontra na área 100 da planta, é especificamente a bomba número 1 e tem um equipamento reserva em paralelo (A/B).

As informações de cada corrente também podem ser especificadas por alguns símbolos, como indicado no Quadro 2 abaixo:

Quadro 2: Identificação de cada corrente (Turton, 2008).

Representação	Significado
lps	Vapor de baixa pressão
mps	Vapor de média pressão
hps	Vapor de alta pressão
htm	Meio de transferência de calor
cw	Água de resfriamento
wr	Água de rio
rw	Água resfriada
rb	Água salobre resfriada
cs	Água química residual
ss	Água sanitária residual
el	Calor elétrico
ng	Gás natural
fg	Gás combustível
fo	Óleo combustível
fw	<i>Fire water</i>

2.1.2 Diagrama de Cebola

O diagrama de cebola ou *Onion Model* é um modelo a ser seguido para a minimização de erros devido ao fluxo hierárquico que deve ser seguido antes de algumas decisões serem adotadas. O diagrama está representado na Figura 2 abaixo:

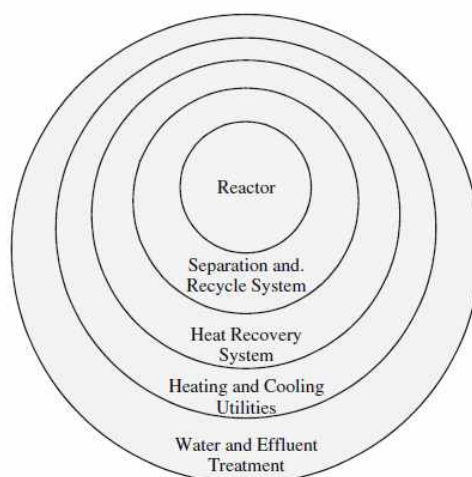


Figura 2: Diagrama de cebola (Smith, 2005).

Este diagrama indica que as decisões sobre os reatores devem ser tomadas antes dos métodos de separação e reciclo e subsequentemente o sistema de recuperação de calor, as utilidades de aquecimento e resfriamento que serão utilizadas e, por fim, o tratamento da água e efluente utilizadas no sistema. Este diagrama foi adotado para o estudo da planta em questão.

2.1.2 *Hazard and Operability Study (HazOp)*

A técnica denominada Estudo de Perigo e Operabilidade – HazOp, visa identificar problemas de operabilidade de uma instalação de processo, revisando metodicamente o projeto da unidade ou de toda fábrica (Crowl, 2002). Este método é baseado em um procedimento de perguntas estruturadas que sistematicamente gera uma série de respostas voltadas à uma palavra-guia as quais tendem a prever e prevenir erros e acidentes.

É extremamente importante denotar os conceitos de operabilidade e perigos quando se trata desse estudo. Operabilidade é a habilidade de manter um equipamento, um sistema ou uma planta inteira segura e com condições de funcionamento confiáveis de acordo com um padrão estabelecido. Perigo é a circunstância oferecida pela situação, diferente de risco que é a probabilidade de um acidente acontecer devido ao perigo. Assim o HazOp tende a definir os perigos para o discernimento e conhecimento dos mesmos pelos funcionários, bem como prever e prevenir que falhas aconteçam no sistema. Tais falhas, além de gerar mau funcionamento da planta e consequentemente desestabilização da produtividade, oferecem novos riscos aos funcionários, por isso é de extrema importância que a planta esteja funcionando de acordo com os padrões e/ou sendo, ainda, otimizada.

As palavras-guia geralmente utilizadas são:

- Não;
- Menos;
- Mais;
- Também;
- Parte de;
- Reverso;
- Outro que.

Estas palavras-guia podem sofrer desvios para melhor adequação do estudo, por exemplo a palavra não significa a negação de algo, por isso, quando se trata de fluxo é mais bem adequado a frase “nenhum fluxo” ao invés de “não fluxo”.

O estudo é realizado através do preenchimento de uma planilha. Tal planilha segue apresentada no Quadro 3 abaixo:

Quadro 3: Planilha utilizadas no estudo HazOp.

Exemplos de Planilhas utilizadas na HAZOP					
Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade					
Sistema:			Equipe:		Data:
Localização do Nó:					Página:
Item	Desvio	Causas	Consequências	Salvaguardas	Observações

O Quadro 4 apresenta uma outra forma da planilha:

Quadro 4: Planilha utilizada no estudo HazOp.

Análise de Perigos e Operabilidade						
Unidade						
Sistema:			Equipe:		Data:	
Parâmetro:			Nó:		Página:	
	Palavra Guia	Desvio	Causas	Detecção	Consequências	Providencias

2.2 Particularidades do processo e suas operações unitárias

Seguindo os conceitos apresentados anteriormente tem-se o PFD do processo representado pela Figura 1 implementado no *software* Edraw®. A Quadro 5 identifica todos os equipamentos utilizados no processo, que em sequência são basicamente descritos:

Quadro 5: Identificação dos equipamentos utilizados no processo.

Símbolo	Equipamento
K-100	Compressor 0, localizado na área 100 da planta
K-101	Compressor 1, localizado na área 100 da planta
K-102	Compressor 2, localizado na área 100 da planta
E-100	Trocador de calor (casco tubo) 0, localizado na área 100 da planta
E-101	Trocador de calor (casco tubo) 1, localizado na área 100 da planta
E-102	Trocador de calor (casco tubo) 2, localizado na área 100 da planta
E-103	Trocador de calor (casco tubo) 3, localizado na área 100 da planta
E-104	Trocador de calor (<i>cooler</i>) 4, localizado na área 100 da planta
MHX1	Trocador de calor 1
MHX2	Trocador de calor 2
TEE-100	Divisor de correntes 0, localizado na área 100 da planta
TEE-101	Divisor de correntes 1, localizado na área 100 da planta
VLV-100	Válvula 0, localizada na área 100 da planta
VLV-101	Válvula 1, localizada na área 100 da planta
RCY-1	Reciclo 1
RCY2	Reciclo 2
T-100	Torre de destilação 0, localizada na área 100 da planta
T-101	Torre de destilação 1, localizada na área 100 da planta

Compressores são equipamentos usados para aumentar a pressão de um gás no qual mecanicamente reduz o volume dentro de sua carcaça, e são capazes de lidar com grandes vazões com tamanhos relativamente pequenos (Bausbacher et al, 1993). Os três compressores mais comuns são: o de deslocamento positivo, o axial e o centrífugo; os quais podem ser acionados por motores elétricos e turbinas movidas a vapor.

Trocadores de calor são, simplesmente, um equipamento no qual ocorre a transferência de calor de um corpo denominado quente para outro denominado frio. Muitos tipos de trocadores de calor são utilizados em processos industriais. Porém, definitivamente o mais utilizado é o trocador casco-tubo (Smith, 2005). Dois dos mais utilizados estão ilustrados na Figura 3 abaixo:

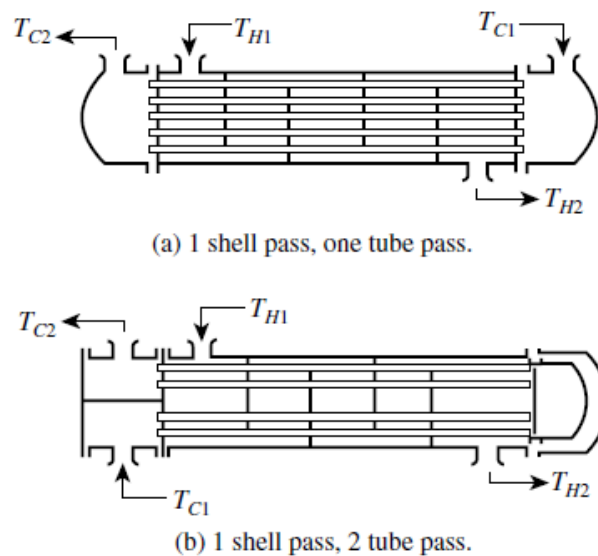


Figura 3: Representação de dois trocadores de calor casco-tubo (Smith, 2005).

O primeiro trocador mostra o fluido escoando pelos tubos em passe simples. Já o segundo trocador, passo duplo.

Os divisores de correntes ou *Splitter/Separator* são equipamentos que dividem uma corrente de entrada em duas ou mais correntes de saída. Por classificação, o *splitter* divide a corrente em outras de iguais informações (ex.: vazão molar), já o *separator* divide a corrente em outras com diferentes características (Felder e Rosseau, 2005).

Válvula é um equipamento crucial para todo e qualquer tipo de processo, seja ela manual ou automática. São elas que ajustam a vazão em um processo entre 0 e 100%, podendo, inclusive, evitar acidentes. Processos industriais são compostos por milhares de *malhas* de

controle em toda a rede de produção. Cada um destas *malhas de controle* é designada com uma importante função, seja ela controlar pressão, vazão, nível, temperatura, entre outras variáveis. Por isso, atualmente, válvulas de controle estão sendo altamente utilizadas para a otimização do processo, não apenas em termos produtivos como também de segurança.

Destilação é o processo o qual uma mistura líquida é parcialmente vaporizada (Bausbacher, 1993). Os vapores são condensados, separando os componentes individuais da mistura. Basicamente, então, a torre de destilação é um processo de separação da mistura. Em geral, após uma reação, deve-se separar os reagentes remanescentes e produtos secundários do principal, levando em consideração a maximização da recuperação do produto principal. No caso da separação criogênica do ar, não há reações ocorrendo; por isso, a principal operação unitária do processo é a destilação.

2.3 Consumo de Energia

A planta de separação criogênica de ar consome muita energia, chegando a ser maior que 90% do seu gasto operacional total, onde o maior consumo energético provém do processo de compressão do fluido.

O consumo de energia está ligado diretamente aos requerimentos de temperatura e pressão que as correntes devem estar para alcançar os resultados esperados sejam alcançados – no caso oxigênio e nitrogênio puro.

Para a análise do consumo de energia e a eficiência da interação de troca de calor entre correntes e uso das utilidades, pode-se adotar um dos seguintes métodos para otimizar a integração energética.

- 1) Utilização do HYSYS® – o *software* utilizado para simular a planta tem uma ferramenta dentro de seu sistema que avalia a economia dos custos energéticos da planta devido a suas modificações, e apresenta o quanto de energia está sendo gasto para que ocorra o processo;
- 2) Tecnologia *Pinch* (Douglas, 1988) – este método possibilita a reavaliação de todo sistema e todas as correntes que são capazes de trocar calor de forma eficiente para minimizar o uso de utilidades. Primeiramente, são definidas as correntes e suas temperaturas; logo em seguida, monta-se um diagrama diferenciando de um lado as correntes quentes (que cedem energia) e as correntes fria (que recebem energia), identificando um gradiente de temperatura mínimo para que a análise *Pinch* possa

ser realizada. Assim, constrói-se um diagrama chamado cascata, e é identificado a menor entalpia residual do sistema a qual será o *Pinch Point*. Faz-se a integração das correntes acima do *Pinch Point* e abaixo, e é avaliado o sistema – se é possível a integração ou não, identificando *loops* que possam ser quebrados para uma melhor otimização do processo.

Como o presente trabalho já prevê uma interação entre múltiplas correntes, a tecnologia *Pinch*, por realizar convencionalmente a integração energética de duas em duas correntes, seria, além de complexa, antiquada, visto que o processo em si já possui uma integração bem definida.

CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento experimental é simplificado pela implementação da planta. Neste capítulo será abordado os materiais utilizados para a realização desse trabalho, bem como o método de implementação do modelo da planta, passo a passo, utilizando o software da Aspen Tech, o HYSYS®.

3.1 Materiais Utilizados

Todos os itens utilizados na realização desta monografia estão citados na sequência, a saber:

- Dados coletados da literatura;
- *Software* HYSYS®;
- *Software* Edraw®;
- Computador/Notebook;

3.2 Implementação

A Figura 4 representa o modelo principal implementado para simulação no HYSYS®.

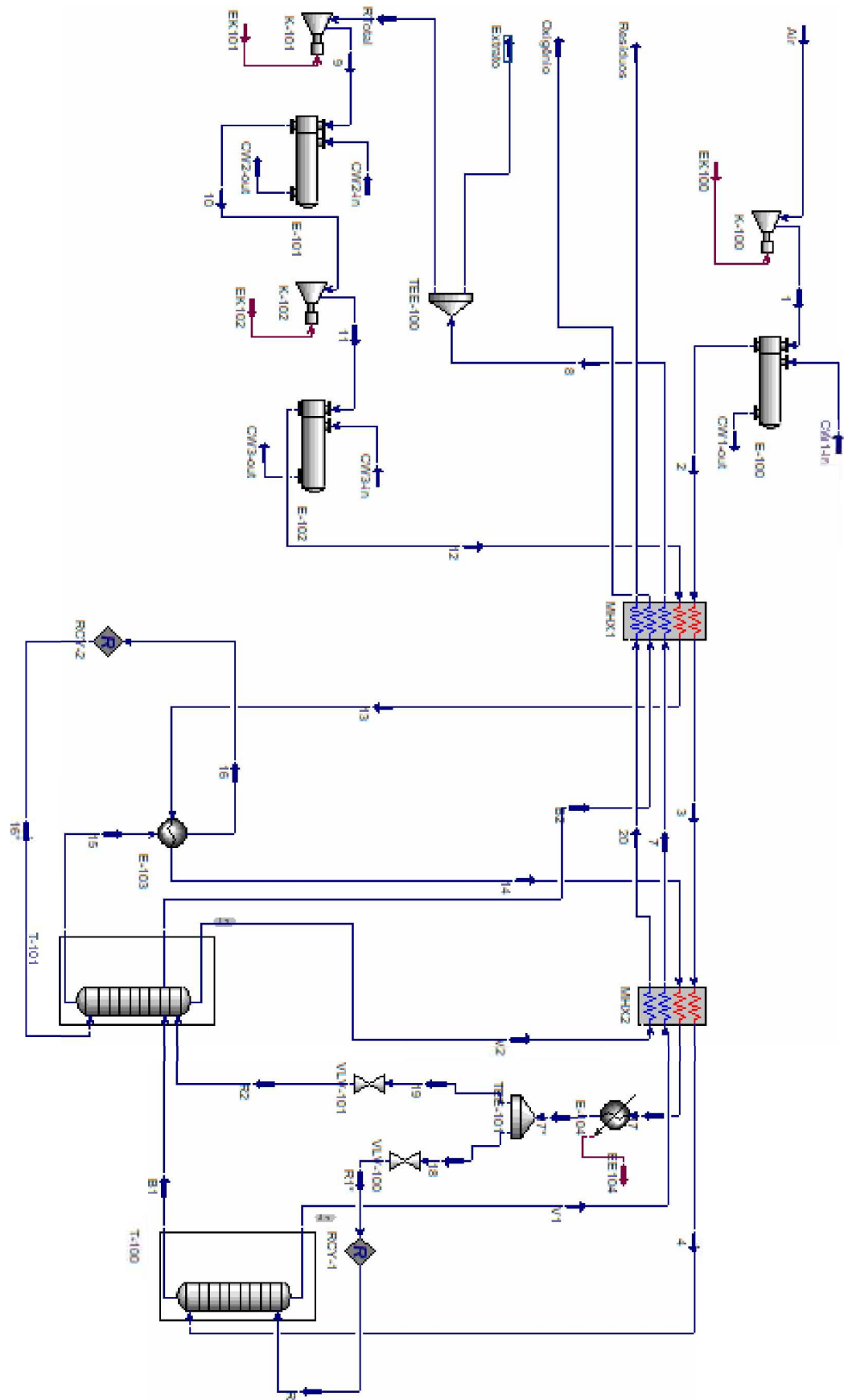


Figura 4: Representação do processo no software HYSYS®.

Ar é alimentado e comprimido por K-100 e segue como corrente 1 que é, então, resfriada por E-100 – um trocador de calor do tipo casco-tubo onde água é o fluido utilizado para resfriar o ar comprimido. Após E-100 a corrente de ar (corrente 2) segue para um segundo trocador de calor, MHX1, que sofre interação com outras correntes – processo que pode ser avaliado pela tecnologia *Pinch* (Douglas, 1988). Ainda, a corrente de ar, após sair o trocador MHX1 (corrente 3), passa por um segundo trocador de calor do mesmo tipo, MHX2, para, da mesma forma, interagir com outras correntes e trocar calor. Por fim a corrente de ar (corrente 4) é alimentada no fundo da primeira coluna de destilação T-100, onde o produto de topo (V1) interage com outras correntes em MHX1 (sai como corrente 7) e MHX2 (sai como corrente 8) e entra no divisor de correntes TEE-100, sendo separado em extrato que é retirado da planta e Rtotal que passará por outro processo. Rtotal é comprimido por K-101 (sai como corrente 9) e em seguida resfriado por E-101 (sai como corrente 10), sendo novamente comprimido por K-102 (sai como corrente 11) e resfriado por E-102 (sai como corrente 12); por fim, troca calor em MHX1 (sai como corrente 13), que troca calor em E-103 (sai como corrente 14) e MHX2 (sai como corrente 17). A corrente 17 passa pelo *cooler* E-104 e em seguida pelo divisor de correntes TEE-101, saindo como correntes 18 e 19. A corrente 18 passa pela válvula VLV-100 e é reciclada no topo da coluna de destilação T-100; a corrente 19 passa pela válvula VLV-101 e é reciclada no topo da coluna de destilação T-101. Já o produto de fundo (B1) da coluna T-100 entra no topo da segunda coluna de destilação, juntamente com a corrente R2, e sai como dois produtos de topo: V2 que trocará calor em MHX1 (sai como corrente 20) e MHX2 e sai como corrente residual da planta, e B2 que trocará calor apenas em MHX1 saindo como oxigênio da planta. Já o produto de fundo sai como corrente 15 trocando calor com a corrente 13, e sendo reciclado para o fundo da coluna T-101. As condições de cada corrente e equipamento será discutido no capítulo de Resultados e Discussão.

A implementação em si foi realizada de duas formas. A primeira maneira é a forma já apresentada anteriormente. A segunda forma é, ao invés de trocadores de calor casco-tubo, utilizando água como líquido refrigerante, foram utilizados *coolers*, como mostrado na Figura 5:

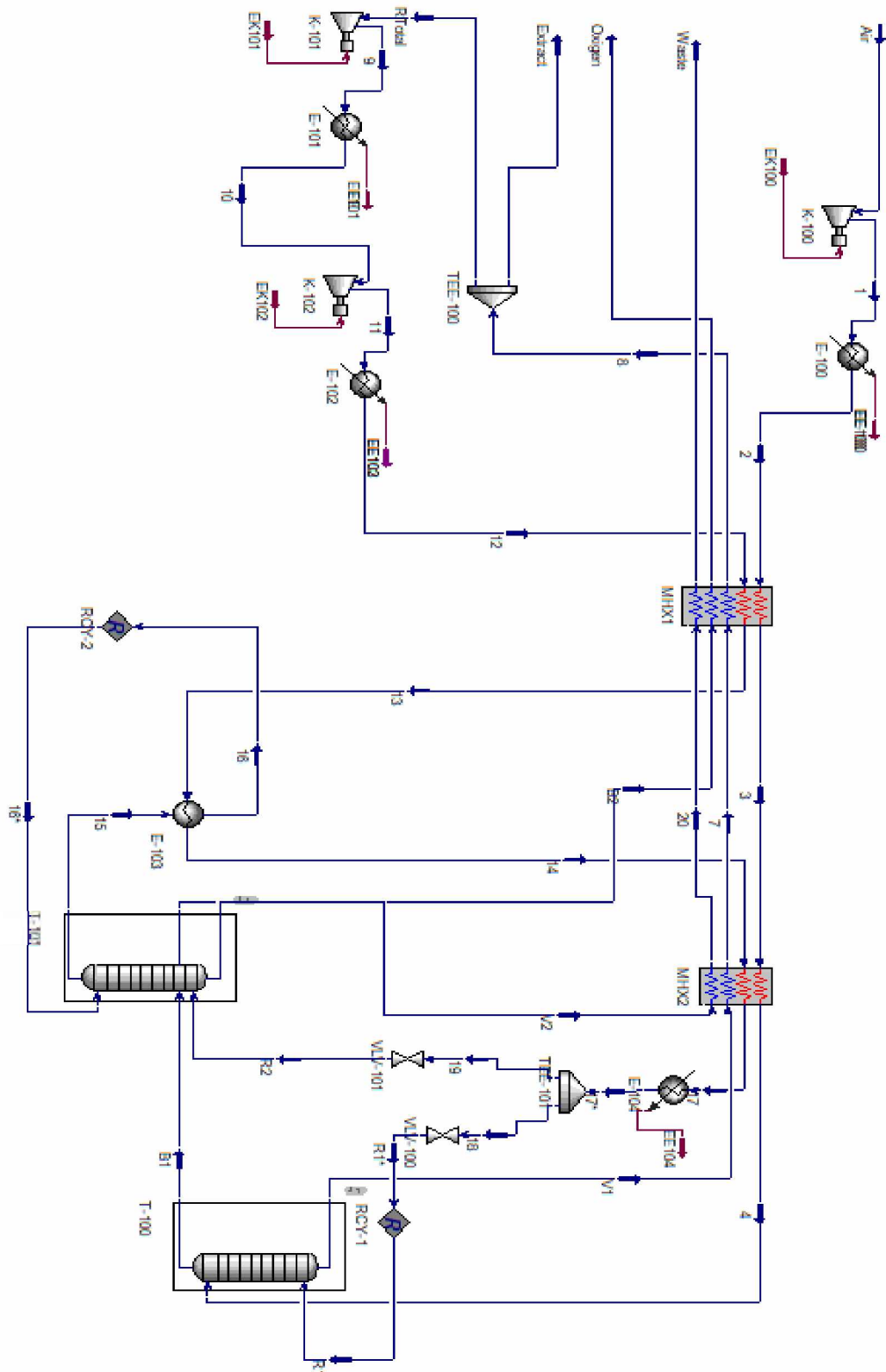


Figura 5: Representação do modelo alternativo implementado no HYSYS®.

É importante ressaltar que as duas simulações significam a mesma coisa. A única diferença é que o bloco da função trocador de calor casco-tubo ainda calcula a quantidade de água de resfriamento utilizada através do balanço de massa e energia que ocorrem na operação unitária em si.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a simulação, divididos em três tópicos a implementação do modelo, o consumo de energia e estudo de perigos e operabilidade (HAZOP).

Este capítulo é essencial para entender o impacto que cada mudança na planta tem, seja esse impacto causado no método de operação, no consumo de energia ou na prevenção de acidentes. Além disso, um trabalho bem estruturado proporciona novas oportunidades de investigação, pois, no campo da engenharia química um processo sempre pode ser melhorado.

4.1 Implementação

4.1.1 Operações Unitárias

Algumas condições foram consideradas para a implementação do modelo, sendo outras informações calculadas pelo próprio *software*. Como foram realizadas duas implementações, e estas não são idênticas, embora equivalentes, existem algumas divergências.

O resultado mais divergente encontra-se no bloco da função compressor K-102. Onde, quando implementado com trocadores casco-tubo apresentou a necessidade de 704.4 kW de trabalho e um $\Delta P = 387$ kPa. Já quando utilizado coolers, um trabalho de 671.1 kW e $\Delta P = 377$ kPa. Já era esperado que a maior divergência ocorresse no compressor K-102, pois este é o equipamento com maior acúmulo de mudanças seguindo o fluxo principal das tubulações. A Figura 6 apresenta um *print* da tela mostrando a diferença entre os compressores dos dois modelos:

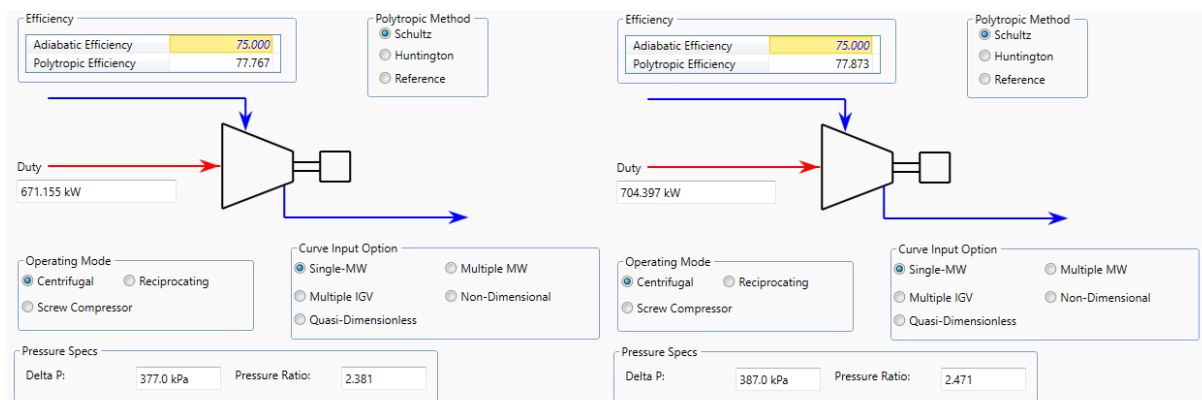


Figura 6: Diferença entre os resultados dos compressores K-102 para o modelo utilizando coolers (à esquerda) e trocadores de calor casco-tubo (à direita).

As principais informações sobre os equipamentos não abordados no corpo deste trabalho seguem no *Anexo A* deste documento.

Na prática, uma planta real utilizaria os trocadores de calor casco-tubo. Para tanto, os resultados de interesse são, especificamente, àqueles apresentados pela implementação dos mesmos. A utilização de *coolers* deu-se basicamente para mostrar que uma simulação criteriosa faz a diferença no objetivo final e real da indústria.

4.1.2 Correntes

Ao avaliar um projeto ou processo já existente, é necessário discernir as correntes mássicas e energéticas para comparação de diversos modelos, obtendo assim aquele que mais se aproxima da idealidade. Na Tabela 2 são apresentadas as informações sobre correntes mássicas relacionadas ao processo utilizando trocadores de calor casco-tubo:

Tabela 2: Correntes do processo utilizando trocadores de calor casco-tubo.

Corrente	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Vazão Molar (Kmol/h)	Composição de O ₂ (%)
Air	50	1.01	1000	0.21
1	108.1256	1.66	1000	0.21
2	50	1.56	1000	0.21
3	-169.5	1.46	1000	0.21
4	-176.1	1.36	1000	0.21
V1	-192.709	1.3	1129.481	0.035366
B1	-188.641	1.36	362.4924	0.517106
7	-181.5	1.25	1129.481	0.035366
8	45	1.2	1129.481	0.035366
Extrato	45	1.2	443.3213	0.035366
RTotal	45	1.2	686.1598	0.035366
9	144.9058	2.73	686.1598	0.035366
10	50	2.63	686.1598	0.035366
11	175.0385	6.5	686.1598	0.035366
12	50	6.4	686.1598	0.035366
13	-175	6.406414	686.1598	0.035366
14	-175.675	6.306414	686.1598	0.035366
15	-180.562	1.34	1045.876	0.97866
16	-181.298	1.24	1045.876	0.97866
17	-180.9	6.206414	686.1598	0.035366
18	-190.6	5.61	491.9766	0.035366
19	-190.6	5.61	194.1832	0.035366
R1*	-193.322	1.3	491.9766	0.035366
R2	-193.322	1.3	194.1832	0.035366
R1	-193.322	1.3	491.9735	0.035351
V2	-193.261	1.3	360.0002	0.012453
B2	-180.56	1.34	193.9562	0.964511
16*	-181.298	1.24	1043.157	0.978567
Oxigênio	45	1.25	193.9562	0.964511
20	-190.239	1.25	360.0002	0.012453
Resíduo	33.3616	1.2	360.0002	0.012453
17*	-190.6	5.61	686.1598	0.035366
CW1-in	25	1	1176.06	***
CW1-out	45	0.9	1176.06	***
CW2-in	25	1	1322.526	***
CW2-out	45	0.9	1322.526	***
CW3-in	25	1	1753.657	***
CW3-out	45	0.9	1753.657	***

As correntes energéticas do processo utilizando trocadores de calor casco-tubo estão representadas na Tabela 3:

Tabela 3: Informações das correntes energéticas do processo utilizando trocadores de calor casco-tubo.

Correntes	Calor Trocado (KJ/h)
EK100	1708009
EK101	2018968
EK102	2535829
EE103	3272218
EE104	377397.8

Para as condições apresentadas nas Tabelas 2 e 3 e no *Anexo A* – para o modelo utilizando trocadores de calor casco-tubo, a recuperação de oxigênio foi de 89,10% da alimentação. Sendo que a corrente denominada “Oxigênio” apresenta uma vazão molar de 194 kmol/h e 96,45% da corrente é composta por oxigênio. Logo a vazão molar de oxigênio é de aproximadamente 187,11 kmol/h. A corrente de alimentação foi de 1000 kmol/h, onde 21% era oxigênio, ou seja, 210 kmol/h era a vazão molar de oxigênio na alimentação. Existe uma divergência quando o modelo é implementado com *coolers*, e mesmo que a simulação seja equivalente, este fato ocorre porque os processos não são idênticos – existe uma distinção na queda de pressão, temperatura de saída do equipamento e outros fatores que influenciam no resultado. Logo, reafirmando a importância de implementar o modelo de uma planta o mais próximo possível da realidade, gerando uma simulação apurada.

4.2 Consumo de energia

Com relação ao o consumo de energia, é possível aferir a relação custo-benefício da planta utilizando o próprio aplicativo HYSYS®.

Como já mencionado, a simulação utilizando coolers e trocadores de calor casco-tubo é equivalente. A diferença do consumo de energia entre os modelos implementados se dá porque o trocador de calor leva em consideração as resistências de transporte de energia do metal e das camadas limite, por tanto, não é necessária a comparação entre os modelos quando o assunto é consumo de energia; mas sim, estudar e otimizar a operação unitária com maior consumo energético – compressão.

Otimizar o consumo de energia no processo de separação criogênica de ar é, fundamentalmente, otimizar todo o sistema já que o maior custo da planta é o processo de compressão do fluido, conseqüentemente, o consumo de energia.

Para isso, foi realizado o estudo de como o bloco da função *splitter* e a razão de divisão de correntes afeta a energia consumida pelos compressores. O vapor de topo da coluna T-100 passa pelos trocadores de placa MHX1 e MHX2 e subsequentemente passa pelo *splitter* TEE-100 (corrente 8 com vazão de 1129 kmol/h), onde parte da corrente sai do sistema como Extrato e parte volta como refluxo na coluna T-100. Antes de entrar na coluna T-100, o fluido é comprimido passando pelo compressor K-101, resfriado por E-101, novamente comprimido por K-102 e novamente resfriado por E-102, onde gera um consumo energético abundante.

Na Tabela 4 referente às alterações realizadas para a divisão do *splitter* TEE-100 e o consumo de energia EK 101 e EK 102 nos compressores K-101 e K-102.

Tabela 4: Condições da divisão de correntes no splitter TEE-100 e as implicações no consumo de energia de K-101 e K-102.

Divisão das correntes	EK 101 (kJ/h)	EK 102 (kJ/h)
Extrato = 0,36	2141002,47	2689138,64
R_{total} = 0,64		
Extrato = 0,37	2103038,14	2641443,96
R_{total} = 0,63		
Extrato = 0,38	2065610,53	2593836,49
R_{total} = 0,62		
Extrato = 0,39	2027398,45	2546416,93
R_{total} = 0,61		
Extrato = 0,4	1991724,43	2501604,48
R_{total} = 0,6		
Extrato = 0,41	1954357,97	2454661,72
R_{total} = 0,59		
Extrato = 0,42	1917728,86	2408646,96
R_{total} = 0,58		
Extrato = 0,43	1881422,81	2363038,40
R_{total} = 0,57		
Extrato = 0,44	1845315,77	2317680,31
R_{total} = 0,56		

Como já era esperado, quanto maior a razão do extrato, menor é a energia EK 101 e EK 102 consumida pelos compressores K-101 e K-102, respectivamente. Este fato se deve a

quantidade de fluido a ser comprimido. Quanto maior a quantidade, maior a energia gasta para comprimir o fluido para atingir as mesmas condições de saída dos compressores.

Contudo, quanto menor a razão de “ R_{total} ”, menor será a vazão da corrente “Oxigênio”, e mesmo que a pureza seja maior, menor será a quantidade retirada do sistema. Assim, cabe uma avaliação conjunta da energia consumida e quantidade e pureza de oxigênio no produto.

4.3 Pureza de oxigênio

Alterar a divisão de correntes em TEE-100 não apenas modifica o consumo energético como a pureza de oxigênio retirado na corrente “Oxigênio” do sistema. Para as condições apresentadas nas Tabelas 2 e 3 e no *Anexo A* a pureza da corrente é de 96,45% de oxigênio.

Na Tabela 5 são apresentadas a pureza de oxigênio na corrente “Oxigênio” com a modificação da divisão das correntes em TEE-100.

Tabela 5: Condições da divisão de correntes no splitter TEE-100 e as implicações na pureza de oxigênio na corrente “Oxigênio”.

Divisão das correntes	Vazão Molar (kmol/h)	Pureza de oxigênio (%)	Vazão Molar de oxigênio (kmol/h)
Extrato = 0,36	228,6	87,05	199,00
$R_{total} = 0,64$			
Extrato = 0,37	210,2	88,80	186,66
$R_{total} = 0,63$			
Extrato = 0,38	203,0	92,50	187,78
$R_{total} = 0,62$			
Extrato = 0,39	196,4	96,58	189,68
$R_{total} = 0,61$			
Extrato = 0,4	187,6	97,37	182,67
$R_{total} = 0,6$			
Extrato = 0,41	178,3	97,84	174,45
$R_{total} = 0,59$			
Extrato = 0,42	169,1	98,00	165,72
$R_{total} = 0,58$			
Extrato = 0,43	159,9	98,16	156,96
$R_{total} = 0,57$			
Extrato = 0,44	150,6	98,77	148,75
$R_{total} = 0,56$			

No caso da pureza de oxigênio e a quantidade do mesmo na corrente do produto, observa-se que quanto maior a razão retirada no “Extrato”, maior é a pureza do oxigênio no produto. Porém, menor é a vazão do mesmo. A partir do ponto onde a razão de extrato é de 39% da corrente 8, a pureza tem uma diferença irrisória quando a razão aumenta para 40% e assim subsequentemente, porém tem uma vazão significativamente maior. Por isso, o ponto ótimo está entre a razão de extrato de 39 a 40%.

Analisando o consumo de energia, a diferença entre 39% e 40% é pouco significativa. Então, levando em consideração que a pureza e o consumo de energia têm uma diferença mínima entre 39% e 40%, a condição que viabiliza o ponto ótimo é a vazão de oxigênio na corrente do produto. Logo, a divisão que melhor cabe ao *splitter* TEE-100 é quando Extrato = 39% e $R_{total} = 61\%$.

4.4 HazOp

A análise ou estudo de perigos e operabilidade também é um dos fatores que influenciam na escolha do uso de equipamentos. Caso exista a oportunidade de trabalhar com processos com de mais fácil manutenção e controle, especialmente se tratando de pressão e temperatura, e, obviamente, sendo este processo eficiente, essa sempre será a escolha devido a segurança operacional. No *Anexo C* são apresentados os Quadros do estudo de perigos e operabilidade dos trocadores casco-tubo.

Segundo o estudo, o uso de trocadores de calor casco-tubo é seguro em relação aos perigos e riscos que os funcionários estão sob condição. Porém, devido à ausência do P&ID, a análise se torna simplificada e o uso de uma malha de controle uma recomendação, já que não se sabe ao certo se a planta já utiliza um sistema de controle ou não. Além disso, os métodos de detecção se tornam subjetivos (ex.: visual), o que limita as precauções a serem tomadas às manutenções preventivas, gerando um custo significativo de mão-de-obra, para que a operabilidade do processo esteja de acordo com o padrão e não ofereça nenhum risco devido a falhas das operações unitárias em questão.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho conseguiu abranger todos os objetivos propostos. Primeiramente, foi possível a identificação e implementação do processo de separação criogênica de ar através do *software* HYSYS®, utilizando dados literários e aplicando conceitos como o diagrama de cebola. Em sequência, foi avaliado o processo utilizando trocadores de calor casco-tubo.

Feitas as adaptações necessárias no modelo, uma avaliação operacional foi realizada para a identificação de como o processo comporta com diferentes razões de divisão de correntes em TEE-100. Concluiu-se que quando a razão é 39% de extrato e 61% de R_{total} o processo é otimizado, devido ao consumo de energia pelos compressores K-1-1 e K-102 e a pureza do produto em relação ao oxigênio.

Em sequência, realizou-se o estudo de consumo energético e a economia de energia disponível, calculada pelo próprio HYSYS®. Quando a razão de TEE-100 é ótima, há um consumo energético em K-101 e K-102 de 2027398,45 kJ/h e 2546416,93 kJ/h, respectivamente. O modelo utilizando os trocadores de calor casco-tubo têm uma economia energética disponível de $1,37 \times 10^6$ kJ/h, o que equivale a uma economia de 16% do modelo atual – cálculo realizado através do HYSYS®.

Por fim, um estudo sobre os perigos e a operabilidade dos modelos foi realizada a fim de denotar os principais nós. Chegou-se à conclusão de que o modelo não oferece riscos de operações relevantes. Porém o modelo é simplificado e ainda deve ser detalhadamente estudado.

Para dar continuidade neste trabalho recomenda-se um estudo mais profundo sobre interações energéticas utilizando os trocadores de calor do tipo casco-tubo. Além disso, análises utilizando a tecnologia *Pinch* para fazer tal integrações, confirmaria o que o HYSYS® gera como resposta, dando maior confiabilidade aos resultados. Algumas correntes ainda não sofrem interações, como a corrente 1, e, um estudo sobre a interação completa do sistema seria extremamente viável, visto que o maior gasto dessa planta é o consumo de energia.

Outro fator que pode ser estudado com maior profundidade é a análise HazOp. Existem muitas correntes e operações unitárias, inclusive as que já foram realizadas, que devem ter um procedimento bem especificado em relação à segurança industrial. Tanto para prevenção de acidentes quanto para o comprometimento da performance do processo. Através do estudo,

chega-se a realização de um procedimento a ser seguido para que essa cautela seja seguida. Para que este estudo seja realizado, é necessário a obtenção do P&ID.

Um terceiro estudo que é recomendado em cima da planta são as possíveis malhas de controle que o processo pode e deve ter. Visto que existem muitas quedas de pressão e temperatura, é crucial que o processo esteja estável em um *setpoint* determinado. Dessa forma, novas válvulas de controle podem ser implementadas nas tubulações do sistema e sensores podem ser alocados nas operações unitárias existentes na planta – a fim de manter nível, vazão, temperatura e pressão adequadas ao padrão.

Por fim, como a separação de ar em, principalmente, oxigênio e nitrogênio é extremamente importante atualmente, sugere-se o estudo do levantamento de um projeto *greenfield* dessa planta. Hoje, no Brasil, não existem plantas satisfatórias que forneçam os gases em questão para setores industriais (B to B), nem setores comerciais (B to C) de maneira eficiente e suficiente. Por isso, ter o estudo de um projeto da planta é um avanço muito grande para a sociedade brasileira e uma forma de fomentar a economia da mesma, diversificando o mercado do país.

ANEXO A – Figuras de informações sobre as operações unitárias que se assemelham em ambos processos

Os equipamentos TEE-100, TEE-101, K-100, VLV-100 e VLV-101 são idênticos, por isso não são objetos de comparação, porém mostrados em apenas uma imagem.

Os equipamentos K-102, E-100, E-101 e E-102 foram abordados no trabalho acima.

Segue nas Figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 os demais equipamentos e suas principais informações para comparação dos modelos, reafirmando a importância da assertividade da implementação de um modelo para sua simulação.

Overall Performance		Detailed Performance		Overall Performance		Detailed Performance	
Duty	1.093e+07 kJ/h	Est UA Curvature Error	1.262e+004 kJ/C-h	Duty	1.093e+07 kJ/h	Est UA Curvature Error	9490 kJ/C-h
Heat Leak	0.000e-01 kJ/h	Hot Pinch Temp.	50.0000 C	Heat Leak	0.000e-01 kJ/h	Hot Pinch Temp.	50.0000 C
Heat Loss	0.000e-01 kJ/h	Cold Pinch Temp.	45.0000 C	Heat Loss	0.000e-01 kJ/h	Cold Pinch Temp.	45.0000 C
UA	1.280e+006 kJ/C-h	Cold Inlet Eqm. Temp.	-190.239 C	UA	1.314e+006 kJ/C-h	Cold Inlet Eqm. Temp.	-190.194 C
Min. Approach	5.000 C	Hot Inlet Eqm. Temp.	50.000 C	Min. Approach	5.000 C	Hot Inlet Eqm. Temp.	50.000 C
LMTD	8.536 C			LMTD	8.314 C		

Side Results							
Pass Name	Inlet T	Outlet T	Molar Flow	Duty	UA	Hot/Cold	
2-3	50.00	-169.50	1000.00	-6.31314e+06	7.43159e+05	Hot	
7-8	-181.50	45.00	1129.48	7.37158e+06	8.56141e+05	Cold	
12-13	50.00	-175.00	686.16	-4.61539e+06	5.37088e+05	Hot	
B2-Oxygen	-180.56	45.00	193.96	1.23607e+06	1.43830e+05	Cold	
20-Waste	-190.24	33.36	360.00	2.32087e+06	2.80275e+05	Cold	

Side Results							
Pass Name	Inlet T	Outlet T	Molar Flow	Duty	UA	Hot/Cold	
2-3	50.00	-169.50	1000.00	-6.31693e+06	7.63667e+05	Hot	
7-8	-181.50	45.00	1128.68	7.36636e+06	8.80067e+05	Cold	
12-13	50.00	-175.00	685.67	-4.61178e+06	5.50757e+05	Hot	
B2-Oxygen	-180.57	45.00	191.67	1.22165e+06	1.46260e+05	Cold	
20-Waste	-190.19	35.29	360.00	2.34070e+06	2.88098e+05	Cold	

Figura 7: Comparação de MHX1 dos dois modelos.

Overall Performance		Detailed Performance		Overall Performance		Detailed Performance	
Duty	4.046e+05 kJ/h	Est UA Curvature Error	1.194 kJ/C-h	Duty	4.042e+05 kJ/h	Est UA Curvature Error	1.555 kJ/C-h
Heat Leak	0.000e-01 kJ/h	Hot Pinch Temp.	-175.6717 C	Heat Leak	0.000e-01 kJ/h	Hot Pinch Temp.	-175.6746 C
Heat Loss	0.000e-01 kJ/h	Cold Pinch Temp.	-186.7491 C	Heat Loss	0.000e-01 kJ/h	Cold Pinch Temp.	-186.7353 C
UA	3.447e+004 kJ/C-h	Cold Inlet Eqm. Temp.	-193.265 C	UA	3.447e+004 kJ/C-h	Cold Inlet Eqm. Temp.	-193.261 C
Min. Approach	11.077 C	Hot Inlet Eqm. Temp.	-169.500 C	Min. Approach	11.061 C	Hot Inlet Eqm. Temp.	-169.500 C
LMTD	11.74 C			LMTD	11.73 C		

Side Results							
Pass Name	Inlet T	Outlet T	Molar Flow	Duty	UA	Hot/Cold	
3-4	-169.50	-176.10	1000.00	-1.85097e+05	15709.7	Hot	
V1-7	-192.71	-181.50	1128.68	3.71147e+05	31404.4	Cold	
14-17	-175.67	-180.90	685.67	-2.19495e+05	18765.3	Hot	
V2-20	-193.27	-190.19	360.00	33453.1	3070.7	Cold	

Side Results							
Pass Name	Inlet T	Outlet T	Molar Flow	Duty	UA	Hot/Cold	
3-4	-169.50	-176.10	1000.00	-1.84659e+05	15679.1	Hot	
V1-7	-192.71	-181.50	1129.48	3.71233e+05	31394.3	Cold	
14-17	-175.67	-180.90	686.16	-2.19513e+05	18788.3	Hot	
V2-20	-193.26	-190.24	360.00	32941.2	3073.1	Cold	

Figura 8: Comparação de MHX2 dos dois modelos.

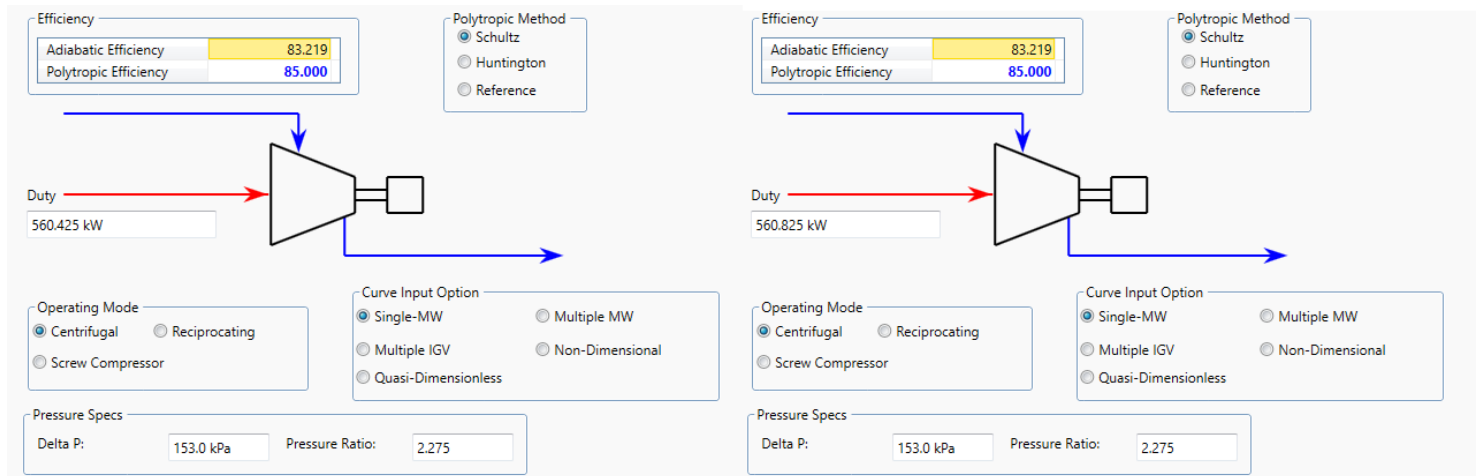


Figura 9: Comparação de K-101 dos dois modelos

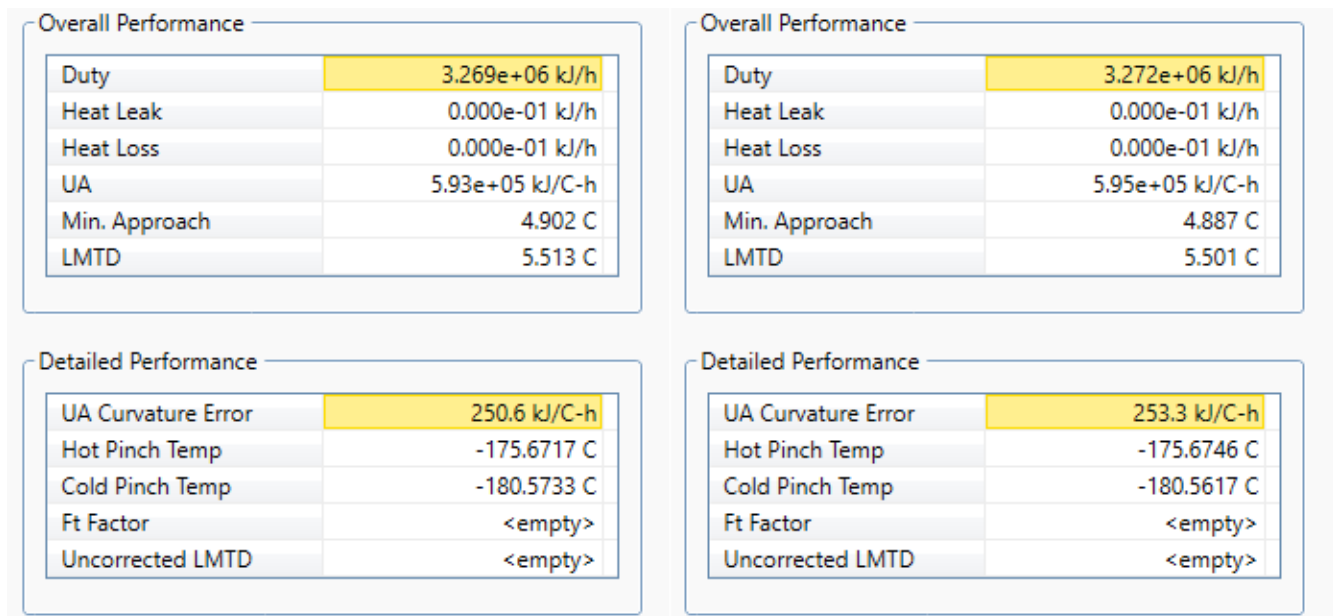


Figura 10: Comparação de E-103 dos dois modelos.



Figura 11: Comparação de E-104 dos dois modelos.

Feeds			
	20	4	
Flow Rate (kgmole/h)	491.9735	1.000000e+03	
Nitrogen	0.9579	0.7800	
Oxygen	0.0354	0.2100	
Argon	0.0068	0.0100	

Feeds			
	20	4	
Flow Rate (kgmole/h)	491.9735	1.000000e+03	
Nitrogen	0.9579	0.7800	
Oxygen	0.0354	0.2100	
Argon	0.0068	0.0100	

Products			
	5	6	
Flow Rate (kgmole/h)	1.128676e+03	363.2980	
Nitrogen	0.9581	0.4676	
Oxygen	0.0351	0.5168	
Argon	0.0068	0.0157	

Products			
	5	6	
Flow Rate (kgmole/h)	1.129481e+03	362.4924	
Nitrogen	0.9578	0.4672	
Oxygen	0.0354	0.5171	
Argon	0.0068	0.0157	

Figura 12: Comparação de T-100 dos dois modelos.

Feeds			
	R2	B1	16*
Flow Rate (kgmole/h)	194.0447	363.2980	1.121257e+03
Nitrogen	0.9581	0.4676	0.0024
Oxygen	0.0351	0.5168	0.9784
Argon	0.0068	0.0157	0.0192

Feeds			
	R2	B1	16*
Flow Rate (kgmole/h)	194.1832	362.4924	1.043157e+03
Nitrogen	0.9578	0.4672	0.0020
Oxygen	0.0354	0.5171	0.9786
Argon	0.0068	0.0157	0.0194

Products			
	V2	15	B2
Flow Rate (kgmole/h)	359.9993	1.126934e+03	191.6662
Nitrogen	0.9835	0.0024	0.0089
Oxygen	0.0123	0.9783	0.9631
Argon	0.0042	0.0192	0.0280

Products			
	V2	15	B2
Flow Rate (kgmole/h)	360.0002	1.045876e+03	193.9562
Nitrogen	0.9833	0.0020	0.0073
Oxygen	0.0125	0.9787	0.9645
Argon	0.0043	0.0194	0.0282

Figura 13: Comparação de T-101 dos dois modelos.

Efficiency

Adiabatic Efficiency	83.922
Polytropic Efficiency	85.000

Polytropic Method

☒ Schultz

☐ Huntington

☐ Reference

Duty

474.447 kW

Operating Mode

☒ Centrifugal ☐ Reciprocating

☐ Screw Compressor

Curve Input Option

☒ Single-MW ☐ Multiple MW

☐ Multiple IGV ☐ Non-Dimensional

☐ Quasi-Dimensionless

Pressure Specs

Delta P: 65.00 kPa Pressure Ratio: 1.644

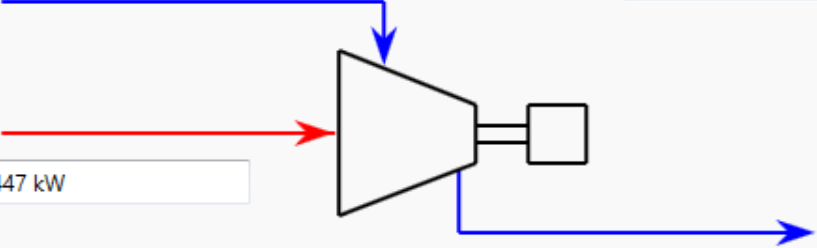


Figura 14: Compressor K-100.

Splits

	Flow Ratios
Extract	0.3925
RTotal	0.6075

Figura 15: Splitter TEE-100.

Splits	
	Flow Ratios
18	0.7170
19	0.2830

Figura 16: Splitter TEE-101.

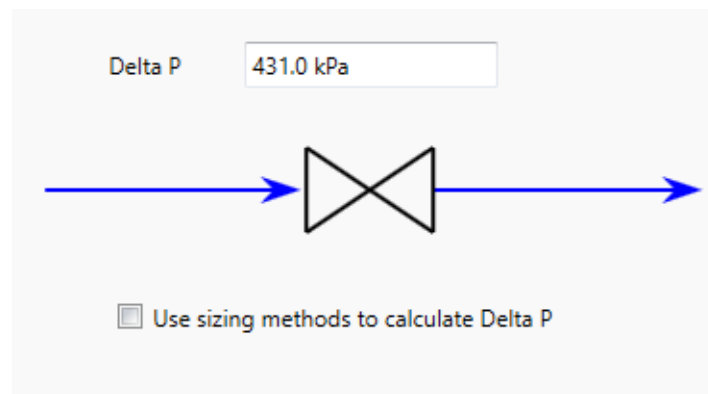


Figura 17: Válvula VLV-100.

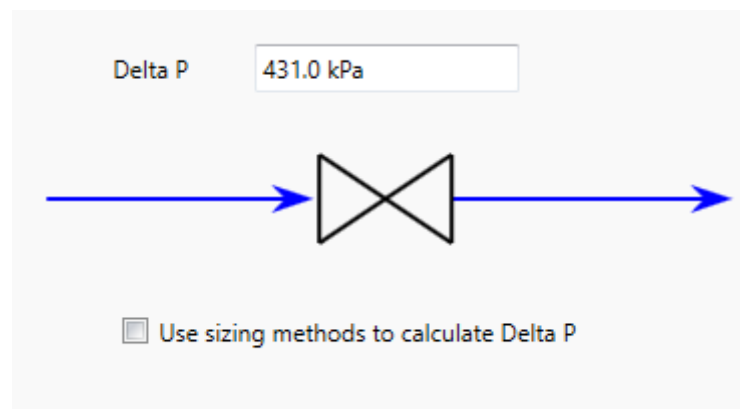


Figura 18: Válvula VLV-101.

ANEXO B – Informações das correntes utilizando *coolers* na simulação

Tabela 6: Informações das correntes mássicas do processo utilizando coolers.

Corrente	Temperatura (°C)	Pressão (bar)	Vazão Molar (Kmol/h)	Composição de O ₂ (%)
Air	50	1.01	1000	0.21
1	108.1256	1.66	1000	0.21
2	50	1.66	1000	0.21
3	-169.5	1.56	1000	0.21
4	-176.1	1.46	1000	0.21
V1	-192.714	1.3	1128.676	0.035131
B1	-188.645	1.36	363.298	0.516768
7	-181.5	1.25	1128.676	0.035131
8	45	1.2	1128.676	0.035131
Extrato	45	1.2	443.0052	0.035131
RTotal	45	1.2	685.6704	0.035131
9	144.9059	2.73	685.6704	0.035131
10	50	2.73	685.6704	0.035131
11	169.2898	6.5	685.6704	0.035131
12	50	6.5	685.6704	0.035131
13	-175	6.408805	685.6704	0.035131
14	-175.672	6.308805	685.6704	0.035131
15	-180.573	1.34	1126.934	0.978342
16	-181.306	1.24	1126.934	0.978342
17	-180.9	6.208805	685.6704	0.035131
18	-190.6	5.61	491.6257	0.035131
19	-190.6	5.61	194.0447	0.035131
R1*	-193.323	1.3	491.6257	0.035131
R2	-193.323	1.3	194.0447	0.035131
R1	-193.322	1.3	491.9735	0.035351
V2	-193.265	1.3	359.9993	0.012321
B2	-180.572	1.34	191.6662	0.963087
16*	-181.305	1.24	1121.257	0.978362
Oxigênio	45	1.25	191.6662	0.963087
20	-190.194	1.25	359.9993	0.012321
Resíduos	35.28832	1.2	359.9993	0.012321
17*	-190.6	5.61	685.6704	0.035131

Tabela 7: Informações das correntes energéticas do processo utilizando coolers.

Corrente	Calor Trocado (KJ/h)
EK100	1708009
EK101	2018529
EK102	2416159
EE103	2432779
EE104	377147.2

Anexo C – Quadros de estudo de perigos e operabilidade

Os Quadros foram elaborados para os equipamentos E-100, E-101 e E-102 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.

Quadro 6: HazOp realizado para o parâmetro Pressão no para o equipamento E-100 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	E-100	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 30, 2017
Parâmetro:	Pressão	Nó:	1	Página:	1 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteccção	Consequências	Providências
Menos	Menos Pressão	Vazamento do fluido através do casco de E-100	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
		Vazamento na tubulação da corrente 1	Sensor (implementar caso não haja)		Implementação de uma malha de controle
		Erro na compressão em K-100			
Mais	Mais Vazão	Entopimento na tubulação da corrente 2		Risco de explosão	
		Erro na compressão em K-100			

Quadro 7: HazOp realizado para o parâmetro Vazão de água de resfriamento no para o equipamento E-100 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	E-100	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 23, 2017
Parâmetro:	Vazão de água de resfriamento	Nó:	2	Página:	2 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteção	Consequências	Providências
Menos	Menos Vazão	Vazamento na tubulação da corrente CW1-in	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
			Sensor (implementar caso não haja)	Menor retirada de energia que o necessário	Implementação de uma malha de controle de temperatura (<i>setpoint</i>)
Não	Sem Vazão	Entopimento da tubulação de água de resfriamento		Sem fluxo de energia	
Mais	Mais Vazão	Erro na alimentação de CW1-in		Maior retirada de calor do que necessário	

Quadro 8: HazOp realizado para o parâmetro Pressão no para o equipamento E-101 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	E-101	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 30, 2017
Parâmetro:	Pressão	Nó:	3	Página:	2 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteção	Consequências	Providências
Menos	Menos Pressão	Vazamento do fluido através do casco de E-101	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
		Vazamento na tubulação da corrente 9	Sensor (implementar caso não haja)		Implementação de uma malha de controle
		Erro na compressão em K-101			
Mais	Mais Vazão	Entopimento na tubulação da corrente 10		Risco de explosão	
		Erro na compressão em K-101			

Quadro 9: HazOp realizado para o parâmetro Vazão de água de resfriamento no para o equipamento E-101 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	E-101	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 30, 2017
Parâmetro:	Vazão de água de resfriamento	Nó:	4	Página:	2 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteção	Consequências	Providências
Menos	Menos Vazão	Vazamento na tubulação da corrente CW2-in	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
			Sensor (implementar caso não haja)	Menor retirada de energia que o necessário	Implementação de uma malha de controle de temperatura (<i>setpoint</i>)
Não	Sem Vazão	Entopimento da tubulação de água de resfriamento		Sem fluxo de energia	
Mais	Mais Vazão	Erro na alimentação de CW2-in		Maior retirada de calor do que necessário	

Quadro 10: HazOp realizado para o parâmetro Pressão no para o equipamento E-102 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	E-102	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 30, 2017
Parâmetro:	Pressão	Nó:	5	Página:	3 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteção	Consequências	Providências
Menos	Menos Pressão	Vazamento do fluido através do casco de E-100	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
		Vazamento na tubulação da corrente 1	Sensor (implementar caso não haja)		Implementação de uma malha de controle
		Erro na compressão em K-100			
Mais	Mais Vazão	Entopimento na tubulação da corrente 2		Risco de explosão	
		Erro na compressão em K-100			

Quadro 11: HazOp realizado para o parâmetro Vazão de água de resfriamento no para o equipamento E-102 do modelo de trocadores de calor casco-tubo.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	E-102	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 30, 2017
Parâmetro:	Vazão de água de resfriamento	Nó:	6	Página:	3 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteção	Consequências	Providências
Menos	Menos Vazão	Vazamento na tubulação da corrente CW3-in	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
			Sensor (implementar caso não haja)	Menor retirada de energia que o necessário	Implementação de uma malha de controle de temperatura (<i>setpoint</i>)
Não	Sem Vazão	Entupimento da tubulação de água de resfriamento		Sem fluxo de energia	
Mais	Mais Vazão	Erro na alimentação de CW3-in		Maior retirada de calor do que necessário	

Quadro 12: HazOp realizado para o parâmetro Fluxo de fluido no splitter TEE-100.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	TEE-100	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 23, 2017
Parâmetro:	Fluxo	Nó:	7	Página:	4 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteção	Consequências	Providências
Menos	Menos Fluxo	Vazamento do fluido através na corrente 8	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
		Vazamento do fluido no equipamento	Sensor (implementar caso não haja)		Implementação de uma malha de controle
Mais	Mais Fluxo	Erro na alimentação			
Não	Sem Fluxo	Intupimento das correntes anteriores			
		Sem alimentação			

Quadro 13: HazOp realizado para o parâmetro Fluxo de fluido no splitter TEE-101.

Análise de Perigos e Operabilidade					
Unidade:	Processo de Separação Criogênica de Ar				
Sistema:	TEE-101	Equipe:	-	Data:	Saturday, December 23, 2017
Parâmetro:	Fluxo	Nó:	8	Página:	4 de 4
Palavra-Guia	Desvio	Causas	Deteccão	Consequências	Providências
Menos	Menos Fluxo	Vazamento do fluido através na corrente 8	Visual	Comprometimento da performance do processo	Inspeção e manutenção frequente dos equipamentos
		Vazamento do fluido no equipamento	Sensor (implementar caso não haja)		Implementação de uma malha de controle
Mais	Mais Fluxo	Erro na alimentação			
Não	Sem Fluxo	Intupimento das correntes anteriores			
		Sem alimentação			

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASPENTECH. Aspen HYSYS®. Disponível em: <
<http://home.aspentech.com/products/engineering/aspen-hysys>>. Acesso em: 02 dez.
 2018.
- BAUSBACHER, E.; HUNT, R. Process Plant Layout and Piping Design. New Jersey, Prentice Hall Inc., 1993.
- BETAEQ. A Origem da Engenharia Química. Disponível em:
 <<https://betaeq.com.br/index.php/2015/07/13/a-origem-da-engenharia-quimica/>>.
 Acesso em: 02 dez. 2018.
- CASTLE, W. F. Air separation and liquefaction: recent developments and prospects for the beginning of the new millennium. International Journal of Refrigeration. n. 25, p. 158-172, jun/dez, 2002.
- CROWL, D. A.; LOUVAR, J. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. 2nd Ed. New Jersey, Prentice Hall Inc., 2002.
- DOUGLAS, J. Conceptual Design of Chemical Processes: Capítulo 8. Singapore, McGraw Hill Books Co, 1988.
- FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W. Elementary Principles of Chemical Processes. 3rd Ed. Georgia, John Winley & Sons Inc., 2005.
- FU, Q.; KANSHA, Y.; SONG, C.; LIU, Y.; ISHIZUKA, M.; TSUTSUMI, A. A cryogenic air separation process based on self-heat recuperation for oxy-combustion plants. Applied Energy. n. 162, p. 1114-1121, nov/mar, 2016.
- MISRA, S.; KAPADI, M.; GUDI, R. D.; SRIHARI, R. Production Scheduling of an Air Separation Plant. Science Direct. n. 49-7, p. 675-680, 2016.
- PERIODIC TABLE. Oxygen. Disponível em: <<http://www.rsc.org/periodic-table/element/8/oxygen>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- PERIODIC TABLE. Nitrogen. Disponível em: < <http://www.rsc.org/periodic-table/element/7/nitrogen>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- SMITH, R. Chemical Process Design and Integration. England, McGraw Hill Books Co, 2005.
- THERMOPEDIA. Heat Exchangers. Disponível em: <
<http://www.thermopedia.com/content/832/>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- TURTON, R.; BAILIE, R.C.; WHITING, W.B.; SHAEIWITZ, J.A. Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. 3rd Ed. Boston, Prentice Hall Inc., 2008.

ZHOU, D.; ZHOU, K.; ZHU, L.; ZHAO, J.; XU, Z.; SHAO, Z.; CHEN, X. Optimal scheduling of multiple sets of air separation units with frequent load-change operation. Separation and Purification Technology. n. 172, p. 178 – 191, jan/ago, 2018.

WERMAC. Introduction to Valves – Control Valves. Disponível em: <
http://www.wermac.org/valves/valves_control-valves_principles-of-operation.html>.
Acesso em: 15 nov. 2018.