

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Guilherme Felix Tassara Panazzolo



**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA
DE UMA PLANTA DE DESTILAÇÃO CRIOGÊNICA DO AR:
ESTUDO DE CASOS**

RIO DE JANEIRO

2024

Guilherme Felix Tassara Panazzolo

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA DE UMA
PLANTA DE DESTILAÇÃO CRIOGÊNICA DO AR: ESTUDO DE CASOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Prof. Argimiro Resende Secchi

Rio de Janeiro

2024

CIP – Catalogação na Publicação

F187s Felix Tassara Panazzolo, Guilherme
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DA SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA
DE UMA PLANTA DE DESTILAÇÃO CRIOGÊNICA DO AR: ESTUDO
DE CASOS / Guilherme Felix Tassara Panazzolo. -- Rio
de Janeiro, 2024.
101 f.

Orientador: Argimiro Resende Secchi.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Destilação criogênica do ar. 2. Sensibilidade
Paramétrica. 3. Simulação de Processos. 4. UNISIM.
I. Resende Secchi, Argimiro, orient. II. Título.

Guilherme Felix Tassara Panazzolo

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA DE UMA
PLANTA DE DESTILAÇÃO CRIOGÊNICA DO AR: ESTUDO DE CASOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado em 08 de fevereiro de 2024.

Argimiro Resende Secchi, *D. Sc*, Escola de Química - UFRJ

Roymel Rodriguez Carpio, *D. Sc*, Escola de Química - UFRJ

Eduardo Benício Cavalcante Júnior, Engenheiro Químico

Rio de Janeiro
2024

Dedico este trabalho, a minha sanidade e a
minha felicidade à minha mãe e aos meus
amigos mais próximos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Suzana Felix Tassara e Nilo José Panazzolo, por absolutamente tudo que já fizeram por mim. Todo o amor, apoio e dedicação incondicionais foram essenciais durante esses anos na faculdade e no início da vida adulta.

A minha família querida e a minha avó Regina, por representar um cultivo de grande amor, carinho e sabedoria, o qual procuro seguir como exemplo e guia.

Aos meus amigos mais especiais desse mundo, Ana, Antônio, Bruno, Casini, Dora, Guedes, Julia, Maria Clara e Maria Alice, vocês, sem dúvida alguma, fizeram-me ser muito mais feliz e leve nessa vida. Às vezes, tudo o que mais precisamos é de alguém que nos faça rir e desligar do mundo real.

Ao Prof. Argimiro Resende Secchi, por ter me orientado pacientemente nos passos que levaram à conclusão deste trabalho acadêmico.

Aos meus parceiros de trabalho, pelas palavras encorajadoras e ensinamentos nesse meu período conturbado de estudos e estágio.

Aos meus professores da Escola de Química, responsáveis por semear não somente o ensino, como também a responsabilidade e a excelência essenciais a profissionais estruturados e capazes de tudo.

Por fim, a mim mesmo. Enquanto somos nosso maior obstáculo, também somos aqueles que mais precisam lutar e se amar para alcançar nossos objetivos. A força de vontade, o autocuidado e a fé foram os valores mais significativos que cultivei ao longo do tempo. É sábio valorizar o esforço que dedicamos a nós mesmos.

“Três paixões, simples, mas irresistivelmente fortes,
têm governado a minha vida: a ânsia de amar, a
busca pelo conhecimento e uma desesperada
compaixão pelo sofrimento humano.”

- Bertrand Russell

RESUMO

PANAZZOLO, Guilherme Felix Tassara. **Simulação e Análise da Sensibilidade Paramétrica de uma Planta de Destilação Criogênica do Ar: Estudo de Casos.** Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A transferência de uma planta existente de separação criogênica do ar impulsionou a busca por novas condições operacionais que atendessem o novo cliente. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo analisar a sensibilidade de diferentes parâmetros como a vazão de alimentação de ar, a razão de refluxo da coluna inferior e a vazão de entrada de N_2 *shelf* na coluna superior. A análise proporcionou o entendimento do comportamento das vazões e purezas dos produtos finais (oxigênio gasoso e líquido, nitrogênio gasoso e líquido e argônio líquido) da planta frente às variações desses três parâmetros. Também, realizou-se a análise de consumo energético e de utilidades frias da planta existente. A metodologia adotada envolveu o estudo do processo de destilação criogênica do ar, a simulação no *software* UNISIM® *Design Suite* 450 e a elaboração de dois cenários com condições operacionais distintas. O cenário DESIGN foi modelado a partir de dados de processo da planta existente antes de sua transferência. O cenário TURNDOWN foi construído a partir de modificações paramétricas do cenário DESIGN, com objetivo de atender as demandas contratuais do novo cliente e do mercado de líquidos, localizados no Mato Grosso do Sul. Após a convergência das duas simulações, realizaram-se as análises de sensibilidade em ambos os cenários. No caso DESIGN, foi possível manter os antigos requerimentos de vazão e pureza diminuindo a vazão de ar a -4%, obtendo uma economia de 549 kW de energia elétrica e de 61,5 m³/h de água de resfriamento. No caso TURNDOWN, atingiu-se os novos requerimentos alterando a vazão de ar para 61.000 Nm³/h, resultando numa economia de 4057 kW de energia elétrica e de 426,16 m³/h de água de resfriamento. Por fim, concluiu-se como viável as modificações das condições operacionais da planta existente para satisfazer tanto a vazão e a pureza de oxigênio gasoso do cliente, como à demanda do mercado de líquidos da região.

Palavras-chave: destilação criogênica; análise de sensibilidade paramétrica; simulação de processos; UNISIM

ABSTRACT

PANAZZOLO, Guilherme Felix Tassara. **Simulation and Sensitivity Parametric Analysis of a Cryogenic Air Distillation Plant: Cases Study**. Rio de Janeiro, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The transfer of an existing cryogenic air separation plant prompted the exploration of new operational conditions to meet the requirements of the new client. In this context, the objective of the study was to analyze the sensitivity of various parameters such as the air feed rate, the reflux ratio of the HP column, and the N₂ shelf inlet flow to the LP column. The analysis provided an understanding of the behavior of flow rates and purities of the final products (gaseous and liquid oxygen, gaseous and liquid nitrogen, and liquid argon) of the plant in response to variations in these three parameters. Additionally, an analysis of the energy consumption and cold utilities of the existing plant was conducted. The adopted methodology involved the study of the cryogenic air distillation process, simulation using the UNISIM® Design Suite 450 software, and the development of two scenarios with distinct operational conditions. The DESIGN scenario was modeled based on process data from the existing plant before its transfer, while the TURNDOWN scenario was constructed through parametric modifications to meet the contractual demands of the new client and the liquid market in Mato Grosso do Sul. Following the convergence of both simulations, sensitivity analyses were performed in both scenarios. In the DESIGN scenario, it was possible to maintain the previous flow and purity requirements by reducing the air flow by -4%, resulting in an energy saving of 549 kW of electrical power and 61.5 m³/h of cooling water. In the TURNDOWN scenario, the new requirements were achieved by adjusting the air flow to 61,000 Nm³/h, resulting in a savings of 4,057 kW of electrical power and 426.16 m³/h of cooling water. In conclusion, it was deemed feasible to modify the operational conditions of the existing plant to meet both the gas oxygen flow and purity requirements of the client, as well as the demand of the liquid market in the region.

Keywords: cryogenic distillation; parametric sensibility analysis; process simulation; UNISIM

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – PFD simplificado da Seção Quente do processo
- Figura 2.2 – Representação da *Bridge Machine*
- Figura 2.3 – Representação das seções do *Main Heat Exchanger*
- Figura 2.4 – Curvas do ponto de bolha e de orvalho da mistura de O₂ e N₂
- Figura 2.5 – PFD da Seção Fria do processo
- Figura 3.1 – Fluxograma do cenário DESIGN da Seção Fria do UNISIM
- Figura 3.2 – Fluxograma do cenário DESIGN dos compressores do UNISIM
- Figura 4.1 – Composição da fase líquida *versus* N° do estágio da coluna HP
- Figura 4.2 – Temperatura *versus* N° do estágio da coluna HP
- Figura 4.3 – Composição da fase líquida *versus* N° do estágio da coluna LP
- Figura 4.4 – Temperatura *versus* N° do estágio da coluna LP
- Figura 4.5 – Composição da fase líquida *versus* N° do estágio da coluna de argônio
- Figura 4.6 – Temperatura *versus* N° do estágio da coluna de argônio
- Figura 4.7 – Variação percentual de energia total consumida *versus* variação percentual da vazão de ar - DESIGN
- Figura 4.8 – Variação percentual de água consumida *versus* variação percentual da vazão de ar - DESIGN
- Figura 4.9 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da vazão de ar - DESIGN
- Figura 4.10 – Variação percentual de pureza dos produtos *versus* variação percentual da vazão de ar - DESIGN
- Figura 4.11 – Variação percentual da vazão de *kettle* e produtos *versus* variação percentual da razão de refluxo - DESIGN
- Figura 4.12 – Variação percentual da pureza de *kettle* e produtos *versus* variação percentual da razão de refluxo - DESIGN
- Figura 4.13 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da vazão de N₂ shelf - DESIGN
- Figura 4.14 – Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da vazão de N₂ shelf - DESIGN
- Figura 4.15 – Variação percentual de energia total consumida *versus* variação percentual da vazão de ar – TURNDOWN

Figura 4.16 – Variação percentual de água consumida *versus* variação percentual da vazão de ar - TURNDOWN

Figura 4.17 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da vazão de ar - TURNDOWN

Figura 4.18 – Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da vazão de ar - TURNDOWN

Figura 4.19 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da razão de refluxo - TURNDOWN

Figura 4.20 – Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da razão de refluxo - TURNDOWN

Figura 4.21 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da vazão de N₂ *shelf* - TURNDOWN

Figura 4.22 – Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da vazão de N₂ *shelf* - TURNDOWN

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 – Composição do ar e ponto de ebulição dos componentes
- Tabela 3.1 – Requerimentos do antigo cliente
- Tabela 3.2 – Especificações das correntes de alimentação de ar
- Tabela 3.3 – Configuração e especificações da coluna HP
- Tabela 3.4 – Configuração e especificações da coluna LP
- Tabela 3.5 – Configuração e especificações da coluna de argônio
- Tabela 3.6 – Configuração do trocador MHE-WL
- Tabela 3.7 – Especificações das correntes no trocador MHE-WL
- Tabela 3.8 – Configuração do trocador MHE-CL
- Tabela 3.9 – Configuração do trocador MHE-SH
- Tabela 3.10 – Especificações das correntes nos trocadores MHE-SH
- Tabela 3.11 – Vazões totais na alimentação de ar utilizadas na análise de sensibilidade
- Tabela 3.12 – Vazões de N₂ shelf utilizadas na análise de sensibilidade
- Tabela 3.13 – Razões de refluxo utilizadas na análise de sensibilidade
- Tabela 3.14 – Especificações das correntes de alimentação de ar
- Tabela 3.15 – Especificações do MAC e do BRIM A.2
- Tabela 3.16 – Requerimentos do novo cliente.
- Tabela 4.1 – Comparação entre as vazões dos produtos e seus erros relativos e absolutos.
- Tabela 4.2 – Comparação entre as purezas dos produtos e seus erros relativos e absolutos.
- Tabela 4.3 – Temperaturas da coluna HP e da coluna LP
- Tabela 4.4 – Especificações particulares do cenário TURNDOWN
- Tabela 4.5 – Resultados do cenário TURNDOWN
- Tabela 4.6 – Consumo de energia DESIGN *versus* TURNDOWN
- Tabela 4.7 – Consumo de água de resfriamento DESIGN *versus* TURNDOWN

LISTA DE SÍMBOLOS

T_C	Temperatura crítica
P_C	Pressão crítica
T_R	Temperatura reduzida
V_M	Volume molar do sistema
T	Temperatura
P	Pressão
R	Constante universal dos gases
N_F	Quantidade de graus de liberdade
N_V	Números de variáveis
N_E	Números de equações
κ	Parâmetro da correlação de estados correspondentes de Peng-Robinson
ω	Fator acêntrico de Pitzer
a	Parâmetros da equação de estado
b	Parâmetros da equação de estado

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASU	<i>Air Separation Unit</i>
O ₂	Oxigênio
N ₂	Nitrogênio
Ar	Argônio
MHE	<i>Main Heat Exchanger</i>
PFD	<i>Process Flow Diagram</i>
MAC	<i>Main Air Compressor</i>
IGV	<i>Inlet Guide Vane</i>
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
BRIM	<i>Bridge Machine</i>
RAC	<i>Recycle Air Compressor</i>
WRT	<i>Warm Recycle Turbine</i>
HP	<i>High Pressure</i>
LP	<i>Low Pressure</i>
RR	<i>Ratio Reflux</i> ou Razão de Refluxo
GOX	Oxigênio gasoso
GAN	Nitrogênio gasoso
LOX	Oxigênio líquido
LIN	Nitrogênio líquido
LAR	Argônio líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO.....	17
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	18
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA DOS GASES ATMOSFÉRICOS.....	19
2.1.1 Matéria-prima.....	19
2.1.2 Métodos de distribuição dos gases industriais	20
2.1.3 Produtos e aplicações.....	21
2.1.4 Processo de Separação de Gases Atmosféricos por Destilação Criogênica.....	22
2.1.4.1 Filtração	23
2.1.4.2 Compressão do ar	24
2.1.4.3 Pré-Purificação	26
2.1.4.4 <i>Bridge Machine</i> e <i>Warm Recycle Turbine</i>	27
2.1.4.5 Trocador de Calor Principal	28
2.1.4.6 Coluna Inferior	30
2.1.4.7 Coluna Superior.....	32
2.1.4.8 Coluna de Argônio Cru e a Coluna Superestagiada de Argônio	33
2.2 SIMULADOR DE PROCESSOS - UNISIM®	36
2.2.1 Pacotes Termodinâmicos	37
2.3 GRAUS DE LIBERDADE.....	38
2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	39
3 METODOLOGIA.....	40
3.1 MATERIAIS	40
3.2 CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO DESIGN	40
3.3 ESTUDO DE CASO – DESIGN.....	49
3.4 ESTUDO DE CASO – TURNDOWN	53
4 RESULTADOS	55
4.1 CASO DESIGN	55
4.1.1 Simulação	55
4.1.2 Análise de sensibilidade paramétrica	60
4.2 CASO TURNDOWN	67

4.2.1 Simulação	67
4.2.2 Análise de sensibilidade paramétrica	70
5 CONCLUSÃO.....	77
6 REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O ar é uma substância ilimitada, e a sua pronta disponibilidade o torna atrativo para processos que utilizem seus componentes – em sua maior parte, nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e argônio (Ar), seguidos de pequenas frações de diversos gases nobres e, por fim, traços de dióxido de carbono e vapor d'água (SHREVE,1956). Existem várias rotas de separação para produção desses gases, mas a Destilação Criogênica é um processo que possibilita, ao mesmo tempo, altíssimos graus de pureza e grandes quantidades de produto, por isso é amplamente utilizado na indústria.

Desde o ano de 1902, quando o processo criogênico industrial de separação de gases do ar obteve a primeira planta no mundo capaz de produzir oxigênio em larga escala (LINDE, 2013), até os tempos atuais, verificou-se o aumento da concorrência global na indústria de gases atmosféricos. Esse crescimento tem impulsionado uma atenção especial no aprimoramento dos processos com um foco na eficiência operacional, uma vez que a redução no consumo de energia, mantendo as exigências de restrições de projeto, representa uma significativa redução no custo operacional de uma planta industrial. Logicamente, a otimização de um processo mostra-se um fator decisivo na determinação dos custos dos produtos finais e, conseqüentemente, no lucro de uma empresa (BARALDI, 2015).

As plantas industriais onde ocorrem os processos de destilação criogênica de separação dos gases atmosféricos utilizam, principalmente, duas matérias-primas: o ar atmosférico e a energia elétrica. Levando em conta que o ar atmosférico é obtido sem custo direto, a energia elétrica assume papel central como a principal despesa de produção. Os principais projetos de otimização nas plantas de retificação criogênica são focados na área de eficiência energética.

Dito isso, a partir da transferência física de uma planta ASU (*Air Separation Unit*) existente em Minas Gerais para o Mato Grosso do Sul e da alteração dos requerimentos de pureza e vazão de oxigênio gasoso pelo novo cliente, surgiu a oportunidade de avaliar novas condições operacionais para o sistema. Nessas avaliações, o foco é aprimorar a eficiência operacional da produção da planta em relação ao projeto original existente, propondo variações nas vazões das correntes de processo e nas razões de refluxo das colunas de destilação. Portanto, as análises dos possíveis modos de operação da unidade criogênica foram motivadas em resposta às novas demandas do cliente.

Assim, para alcançar a melhor eficiência do processo, um caminho é a realização de testes experimentais pela análise paramétrica da planta existente. Entretanto, modificar uma planta de modo local implica na parada de uma planta, traduzindo-se em risco operacional e prejuízo à empresa. Desse modo, um caminho alternativo é a realização da modelagem e simulação computacional, que permite inúmeras possibilidades de testes e alternativas para a construção do processo.

O desafio de estudar diferentes cenários operacionais avaliando a sensibilidade paramétrica do processo existente de separação criogênica de gases industriais, somado às oportunidades de ganho econômico e energético provenientes da otimização, foram as principais motivações para a realização deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste trabalho é simular, com auxílio de software apropriado, a unidade existente de separação de ar em seus componentes principais, bem como avaliar a sensibilidade paramétrica do processo através das modificações nos parâmetros operacionais das correntes chaves da planta, com vistas a buscar melhores condições operacionais que atendam aos requisitos do novo cliente.

Buscou-se, através desse trabalho, atingir alguns objetivos específicos listados abaixo:

- Levantar as características das correntes de entrada e de saída do processo;
- Modelar o processo de destilação criogênica no *software* UNISIM;
- Identificar os parâmetros operacionais e avaliar a sensibilidade desses parâmetros nos resultados finais de pureza e de vazão de oxigênio gasoso produto;
- Simular um cenário operacional específico para a planta existente transferida;
- Quantificar a economia de utilidade fria e de energia elétrica no novo cenário operacional

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, incluindo motivação e os objetivos. No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica pertinente ao assunto do trabalho, fornecendo uma visão tanto sobre o processo de separação criogênica dos gases atmosféricos quanto das aplicações dos produtos obtidos. Além disso, é apresentado o software de simulação a ser utilizado e o conceito de análise de sensibilidade paramétrica. No Capítulo 3, é apresentada a metodologia desenvolvida para simulação dos casos de estudo e definidas as variáveis a serem modificadas no processo criogênico. No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos dois estudos de casos, analisando a sensibilidade dos parâmetros modificados em cada um dos cenários. Após a análise, propôs-se novas condições operacionais para cada um dos casos visando a economia de energia e de utilidades frias. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho. Por último, são listadas as referências bibliográficas examinadas e citadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SEPARAÇÃO CRIOGÊNICA DOS GASES ATMOSFÉRICOS

2.1.1 Matéria-prima

O ar atmosférico é composto majoritariamente por três substâncias diferentes: oxigênio, nitrogênio e argônio. Tais substâncias correspondem, em volume, a mais de 99,95% do ar seco. No processo de destilação criogênica, é importante considerar que o ar utilizado como matéria-prima é aquele que possui umidade. A concentração de vapor d'água, dependendo da localização e clima, pode variar entre 0,1 a 2,8% do volume do ar.

Mais importante é o ponto de ebulição dos constituintes do ar. O processo tem como princípio condensar e separar, principalmente, o nitrogênio do oxigênio a temperaturas criogênicas (abaixo de -150°C) e pressões relativamente baixas. As diferenças no ponto de ebulição e na pressão de vapor entre o nitrogênio, oxigênio e argônio é o que permite a destilação desses componentes nas colunas de retificação criogênica.

Abaixo, a Tabela 2.1 mostra a composição do ar e seus pontos de ebulição à pressão atmosférica:

Tabela 2.1 – Composição do ar e ponto de ebulição dos componentes

Constituintes	Fração Volumétrica do Ar (%)	Ponto de Ebulição ¹ (°C)
Nitrogênio	78,08	-195,8
Oxigênio	20,95	-183,0
Argônio	0,93	-185,9
Neônio	0,0018	-246,1
H₂O	0,1 - 2,8	100
CO₂	0,035	*

Fonte: Adaptado de LINDE GROUP, 2019.

1 → À pressão atmosférica.

* → À pressão atmosférica, o dióxido de carbono não existe no estado líquido em nenhuma temperatura. Abaixo de -78,5°C, o dióxido de carbono passa do estado gasoso para sólido (ressublimação).

Outras impurezas às quais se deve dar atenção são os hidrocarbonetos, principalmente em regiões industrializadas. Mais adiante, veremos como funciona o processo de retirada da água, do dióxido de carbono e dos hidrocarbonetos e o porquê dessa etapa.

Por fim, é essencial ter em mente que o ar é uma matéria-prima gratuita e ilimitada, porém tem um alto custo operacional de separação, principalmente quando relacionado ao consumo de energia, que chega a ser superior a 90% do seu custo operacional (MISRA, KAPADI, *et al.*, 2016).

2.1.2 Métodos de distribuição dos gases industriais

Os três métodos principais para distribuição e fornecimento de gases industriais e medicinais aos clientes, geralmente integrados em uma mesma planta, incluem o transporte por gasodutos, a granel e em cilindros. A escolha do meio de fornecimento é baseada no atendimento eficiente às necessidades do cliente ao menor custo, considerando fatores como volume demandado, padrão de consumo, pureza e a forma de utilização do produto (gás ou líquido) (PEREIRA e ASSAFIN, 2014).

- Gasodutos: Esta modalidade é utilizada para clientes que consomem grandes volumes de maneira contínua. Unidades de separação do ar (ASU) são construídas nas proximidades ou dentro da planta do cliente (on-site), sendo frequentemente superdimensionadas para atender à demanda dos consumidores e de mercados próximos através do fornecimento de produtos na forma líquida. Exemplos de clientes incluem indústrias siderúrgicas, petroquímicas e de óleo e gás (PEREIRA e ASSAFIN, 2014)

- Líquidos (Granel): Esta opção atende a clientes de médio porte com demanda flutuante. Gases industriais são transportados no estado líquido por caminhões-tanque especiais da planta de produção até tanques de armazenamento no cliente. O transporte e armazenamento na forma líquida são vantajosos devido ao menor volume ocupado. O raio de distribuição é limitado pelos custos de transporte, exigindo uma logística eficiente (PEREIRA e ASSAFIN, 2014).

- Packaged: Modalidade de fornecimento para clientes que consomem volumes pequenos, onde os produtos são entregues em cilindros de metal pressurizados. Este método é comum em oficinas mecânicas e laboratórios de análises clínicas (PEREIRA e ASSAFIN, 2014).

2.1.3 Produtos e aplicações

Os três principais produtos oriundos do processo da destilação criogênica são: nitrogênio, oxigênio e argônio. Nos setores de siderurgia e metalurgia, que são grandes consumidores de gases industriais, o oxigênio desempenha um papel crucial. Ele é utilizado, ao mesmo tempo, para otimizar a eficiência da combustão na produção de metais ferrosos e não ferrosos e para remoção do carbono no ferro por oxidação. Além disso, o nitrogênio é empregado como gás de transporte e purga na fabricação de aço, impedindo a oxidação e desempenhando um papel vital no tratamento térmico. Por outro lado, o argônio desempenha um papel importante na prevenção da oxidação durante o processamento, mantendo a temperatura e a consistência da composição. Ele também é eficaz na eliminação do monóxido de carbono e na redução das perdas de cromo durante o processo de refino de aço inoxidável por meio da descarburização com argônio-oxigênio (WHITE MARTINS, 2013).

No setor de refinarias, o oxigênio é amplamente utilizado para aumentar a capacidade das unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC) e das unidades de recuperação de enxofre (SRU), melhorando também as operações de tratamento de efluentes. O nitrogênio é empregado para inertizar tanques de armazenamento e tubulações em refinarias, além de auxiliar na remoção de componentes orgânicos voláteis (COVs) de correntes de processos químicos e efluentes, reduzindo as emissões. Na indústria de petróleo e de gás natural, o nitrogênio auxilia na eficiência operacional de seus processos, como por exemplo na injeção de poços para pressurização, como gás de purga em tubulações e tanques, e na criação de uma atmosfera inerte em torno de tanques que contêm materiais inflamáveis, entre outras aplicações (WHITE MARTINS, 2013).

No setor automotivo e de transporte, o oxigênio é utilizado como gás de corte de plasma, auxiliar em corte a laser e, ocasionalmente, adicionado em pequenas quantidades a gases de proteção. Algumas linhas de montagem usam o nitrogênio em combinação com outros gases para a soldagem de autopeças, chassis, silenciadores e outros componentes, devido à sua capacidade de criar a atmosfera adequada para produzir soldas de qualidade com diversos materiais. Além disso, o nitrogênio desempenha um papel crucial na segurança dos airbags, assim como o argônio, que, por ser um gás inerte, proporciona um ambiente sem oxigênio e nitrogênio em processos de recozimento (WHITE MARTINS, 2013).

No campo da saúde, o oxigênio é utilizado como gás medicinal em clínicas e hospitais para tratar e prevenir a hipoxemia e a hipoxia por meio da oxigenoterapia. O nitrogênio líquido é empregado para congelar e preservar sangue, tecidos e outros materiais biológicos, bem como para congelar e destruir tecidos doentes por meio da criocirurgia. Além disso, o nitrogênio é usado para alimentar e purgar equipamentos médicos (WHITE MARTINS, 2013).

No tratamento de águas e efluentes, o oxigênio pode ser usado para complementar ou substituir o ar na aeração, maximizando a capacidade de tratamento, reduzindo as emissões de COVs, minimizando o odor e a espuma e aumentando a flexibilidade do processo. Ele também é empregado como gás de alimentação para gerar ozônio, utilizado na desinfecção da água (WHITE MARTINS, 2013).

Além desses setores mencionados, outras indústrias, como a química, papel e celulose, aeroespacial, alimentícia, energética e diversas outras, também fazem uso dos gases atmosféricos produzidos pela destilação criogênica (WHITE MARTINS, 2013).

2.1.4 Processo de Separação de Gases Atmosféricos por Destilação Criogênica

Quando se aborda o processo de retificação criogênica, não se pode negligenciar a contribuição do engenheiro e cientista alemão Carl Von Linde. Em 1895, ele concebeu e patenteou o pioneiro processo contínuo de liquefação do ar, baseando-se no fenômeno Joule-Thomson. Em síntese, o ar da atmosfera é comprimido, posteriormente expandido até alcançar temperaturas criogênicas (inferiores a -150°C), e, então, fracionado em duas colunas de destilação, operando sob pressões distintas obtendo nitrogênio, oxigênio e argônio puros (LINDE, 2013).

Mais especificamente, a destilação é um processo de separação que se utiliza da manipulação da temperatura e pressão para controle da volatilidade relativa de substâncias, de

forma a alterar suas concentrações em fases diferentes. Quando obtido uma concentração elevada de apenas uma substância em fases opostas, a mistura previamente existente é separada (AZEVEDO e ALVES, 2013).

No entanto, dependendo da natureza da mistura, apenas um estágio de separação pode não ser suficiente, pois sua eficiência é bastante limitada (AZEVEDO e ALVES, 2013), tendo como base a diferença das volatilidades dos componentes. Para otimizar o processo de forma geral, propôs-se uma sequência de destilações visando obter produtos com grau mais elevado de pureza, ou seja, maximizar a capacidade de separação dos componentes.

Na indústria, tal melhora foi realizada pela montagem de colunas de destilação fracionada por pratos teóricos e correntes de refluxo. Em tal configuração, uma corrente de alimentação é introduzida com a mistura na coluna de destilação. No topo da coluna, parte da corrente purificada no componente mais volátil retorna como refluxo na torre após ser condensada. O contato do refluxo do líquido frio com o gás quente gera transferência de massa e calor, provocando, simultaneamente, uma vaporização do líquido (com maior vaporização do componente mais volátil) e uma condensação do gás (com maior condensação do componente menos volátil) (AZEVEDO e ALVES, 2013). Dessa forma, como a temperatura apresenta um perfil variável ao longo da coluna, sendo mais quente no fundo e mais frio no topo, a composição dos componentes varia a cada estágio de equilíbrio líquido-vapor. Também a pressão apresenta um perfil variável.

Levando em conta os baixíssimos pontos de ebulição do O_2 e do N_2 à pressão atmosférica, para que se possa efetuar um processo eficiente de separação, é essencial a operação em faixas de temperaturas criogênicas, isto é, menores que -150°C . Esse é um dos motivos que justifica a elevada demanda energética do processo e, conseqüentemente, o custo significativo de projetos dessa natureza (AZEVEDO e ALVES, 2013).

Em seguida, são descritas as etapas do processo de destilação criogênica, detalhando inclusive algumas etapas particulares da planta em estudo. Na Figura 2.1, encontra-se um fluxograma de processo (PFD) simplificado da Seção Quente do processo.

2.1.4.1 Filtração

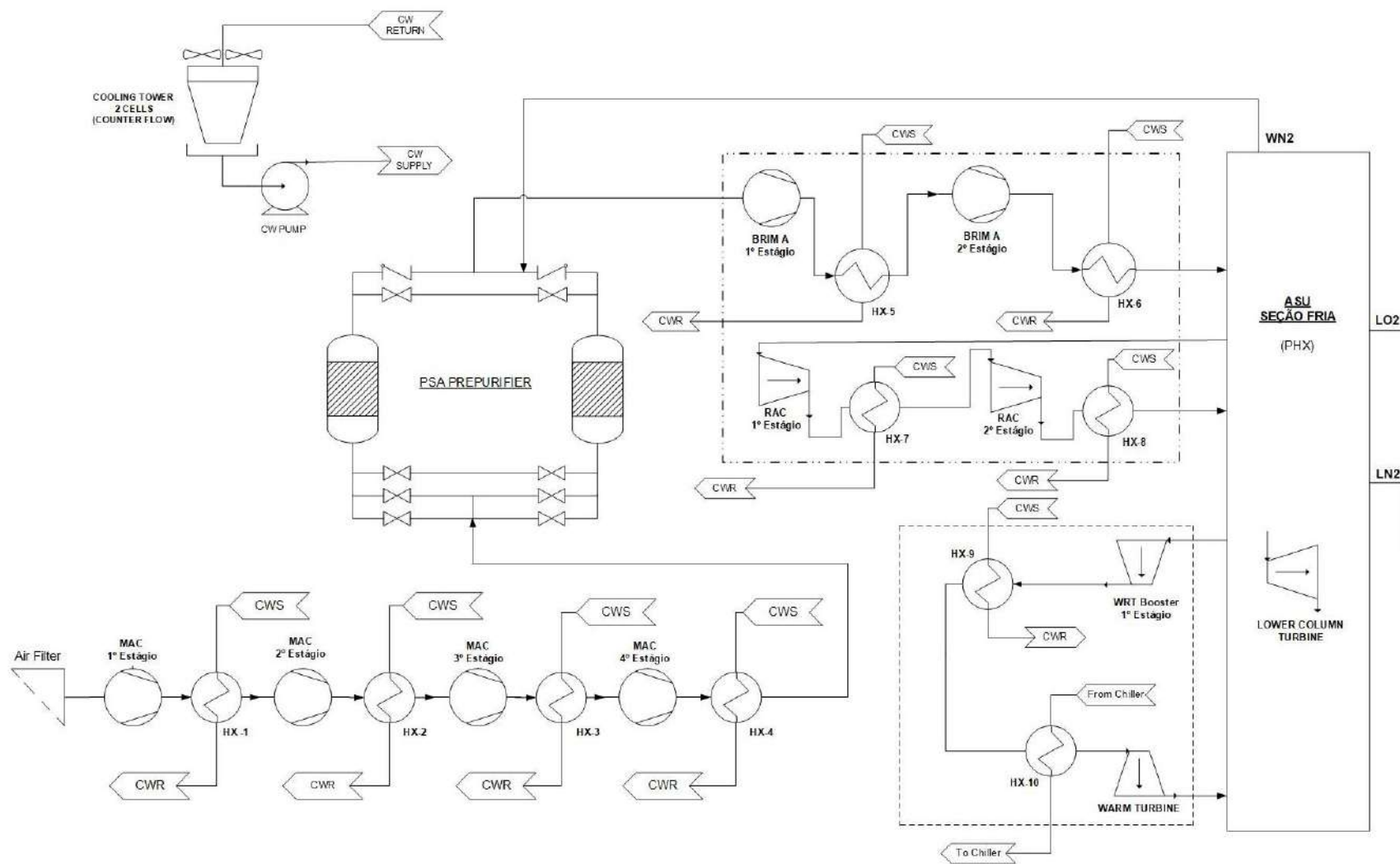
A 1ª etapa do processo é a filtragem. O ar atmosférico, em pressão e temperatura ambiente, é succionado por filtros físicos que retêm as partículas sólidas que apresentariam um risco de danificar os compressores subseqüentes. Um filtro de ar típico é composto por 3 estágios, onde a perda de carga é o principal fator a ser controlado (LINDE, 2017).

2.1.4.2 Compressão do ar

Após a filtração, o ar é direcionado à sucção do compressor principal de ar (*Main Air Compressor* ou MAC) por várias câmaras ou estágios de compressão (3 a 6 estágios). Após cada estágio, o ar sofre uma transformação adiabática, na qual o trabalho externo exercido na compressão do gás gera uma elevação na energia interna do sistema, resultando também no aumento da temperatura do gás (GASPAR, 2001). Usualmente, a vazão de ar comprimida é controlada pela abertura das venezianas de sucção, chamadas também de *Inlet Guide Vane* (IGV). Portanto, posterior a cada estágio de compressão, existe um trocador de calor intermediário (*intercooler*) com objetivo de reduzir a temperatura do ar comprimido pela troca de calor com água de resfriamento. Essa redução contribui para o aumento de eficiência energética do MAC, uma vez que a energia necessária para comprimir um gás é diretamente proporcional ao volume específico, que aumenta com a elevação da temperatura do sistema (BOLES e CENGEL, 2006). O *Main Air Compressor* é o maior consumidor energético de uma planta de destilação criogênica.

Após ser comprimido pelo último estágio, o ar passa pelo último trocador de calor do MAC, o *aftercooler*, antes de ser direcionado à terceira etapa: Pré-purificação. Na maioria das plantas de separação de gases do ar, o ar é comprimido pelo MAC até a pressão manométrica de 6 – 7 barg (HOWARD & NOWOBILSKI, 2006).

Figura 2.1 – PFD da Seção Quente do processo



Fonte: Autoria própria.

2.1.4.3 Pré-Purificação

Na terceira etapa, ocorre a remoção dos principais contaminantes que ameaçam a segurança e eficiência do processo: umidade, dióxido de carbono e hidrocarbonetos. O fenômeno de solidificação da água e do CO₂ ocorre a temperaturas muito superiores às temperaturas criogênicas, nas quais a parte fria da planta de separação opera, acarretando na obstrução das passagens de gases no processo e na danificação dos trocadores de calor e das colunas de destilação. Isso leva a uma perda de eficiência e a custos significativos de manutenção. Além disso, ao longo do tempo, a concentração crescente dos hidrocarbonetos no condensador principal (*Main Condenser*), onde é mantida uma atmosfera de oxigênio de altíssima pureza, eleva significativamente o risco de explosões dentro das colunas de destilação (EPIEPANG, 2016).

Atualmente, o método mais utilizado para a remoção dos contaminantes é pela adsorção física, utilizando tecnologia PSA (*Pressure Swing Adsorption*). A adsorção é realizada em, pelo menos, dois vasos pré-purificadores recheados com peneiras moleculares e uma malha de válvulas de controle automatizadas (EPIEPANG, 2016).

A peneira molecular é uma importante classe dos absorventes sintéticos que possuem a propriedade de adsorção física seletiva em relação a diversas substâncias diferentes. Com alta porosidade, as peneiras retêm as moléculas indesejadas por meio de intensas forças físicas até a sua saturação, necessitando, posteriormente, de um processo de dessorção do material adsorvente provocado pela redução da pressão do vaso em um processo cíclico de aumento e redução da pressão (EPIEPANG, 2016).

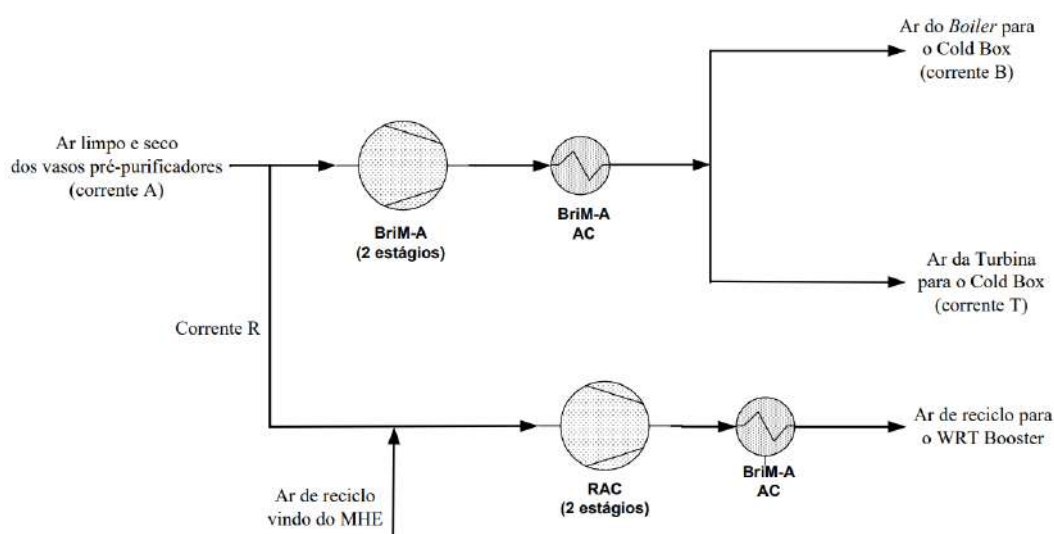
Dessa forma, os vasos operam de forma alternada: o primeiro vaso, em operação, será pressurizado recebendo a corrente de ar comprimida a ser purificada. Umidade, CO₂ e hidrocarbonetos são adsorvidos preferencialmente pelas peneiras moleculares, causando a saturação de seus sítios. Ao mesmo tempo, o segundo vaso (saturado) é despressurizado e regenerado pela diminuição da pressão do vaso e, conseqüentemente, pelo contrafluxo caracterizado por uma corrente chamada “*waste*” (rica em nitrogênio) oriunda do próprio processo. A corrente *waste* é retirada da coluna superior em um estágio logo abaixo do nitrogênio gasoso produto de alta pureza (*top hat*). É comum, devido à grande concentração de nitrogênio no ar atmosférico e seu caráter inerte, aproveitar parte desse nitrogênio em processos de purga e regeneração de equipamentos. A cada ciclo, a operação se reinicia e o vaso que estava sendo regenerado é pressurizado, voltando a receber a corrente de ar a ser purificada (HOWARD & NOWOBILSKI, 2006).

2.1.4.4 Bridge Machine e Warm Recycle Turbine

Usualmente, após a pré-purificação, abordar-se-ia a parte criogênica do processo (Seção Fria); entretanto, a unidade ASU estudada neste trabalho possui mais uma etapa anterior à parte fria do processo que é fundamental para maximização da refrigeração das correntes de processo e envolver uma quantidade significativa de trocas de calor nos equipamentos.

A primeira parte é a *Bridge Machine* (BriM), um equipamento mecânico que conecta a Seção Quente à Seção Fria da planta. A BriM é composta por dois compressores, a BriM A e o *Recycle Air Compressor* (RAC). Ilustrado abaixo, parte da corrente de ar oriunda dos vasos PSA segue para a BriM A, onde é comprimida, resfriada e dividida em duas correntes, *Boiler Air* (Corrente B) e *Turbine Air* (Corrente T). A segunda parte da corrente de ar (Corrente R) segue para o RAC onde é comprimida, resfriada e enviada para a alimentação de outro compressor.

Figura 2.2– Representação da *Bridge Machine*



Fonte: Autoria própria.

As correntes B e T são direcionadas para a Seção Fria (*Cold End*) do processo, que é representada pela Caixa Fria (*Cold Box*). O *Cold Box* é uma grande estrutura de aço cujo nome baseia-se dos processos criogênicos que ocorrem em seu interior, além do isolamento térmico proporcionado aos equipamentos internos, como trocadores de calor e colunas de destilação.

A corrente R é direcionada para a segunda parte, o *Warm Recycle Turbine* (WRT). O WRT é um sistema de refrigeração em malha fechada cujo objetivo é fornecer mais frio para as correntes B e T antes de ingressarem nas colunas de destilação do processo. Após ser comprimida no RAC, a corrente R passa por outra compressão no *Warm End Booster*, é resfriada e expandida na *Warm End Turbine*. Após a troca de calor com as outras correntes, a corrente R retorna para o RAC, reiniciando assim o ciclo de refrigeração semelhante ao Ciclo de Brayton inverso (VALÉRIO, 2019). Portanto, a *Bridge Machine* e o WRT são o fim da Seção Quente.

2.1.4.5 Trocador de Calor Principal

Apesar da existência de diversas plantas de separação de gases do ar, cada uma delas apresenta particularidades no processo de destilação criogênica em relação à integração e às exigências das correntes quentes e frias. Nesse sentido, para continuidade da discussão sobre a Seção Fria, é importante ressaltar que esta revisão bibliográfica considera a unidade ASU pertencente ao estudo de caso de interesse.

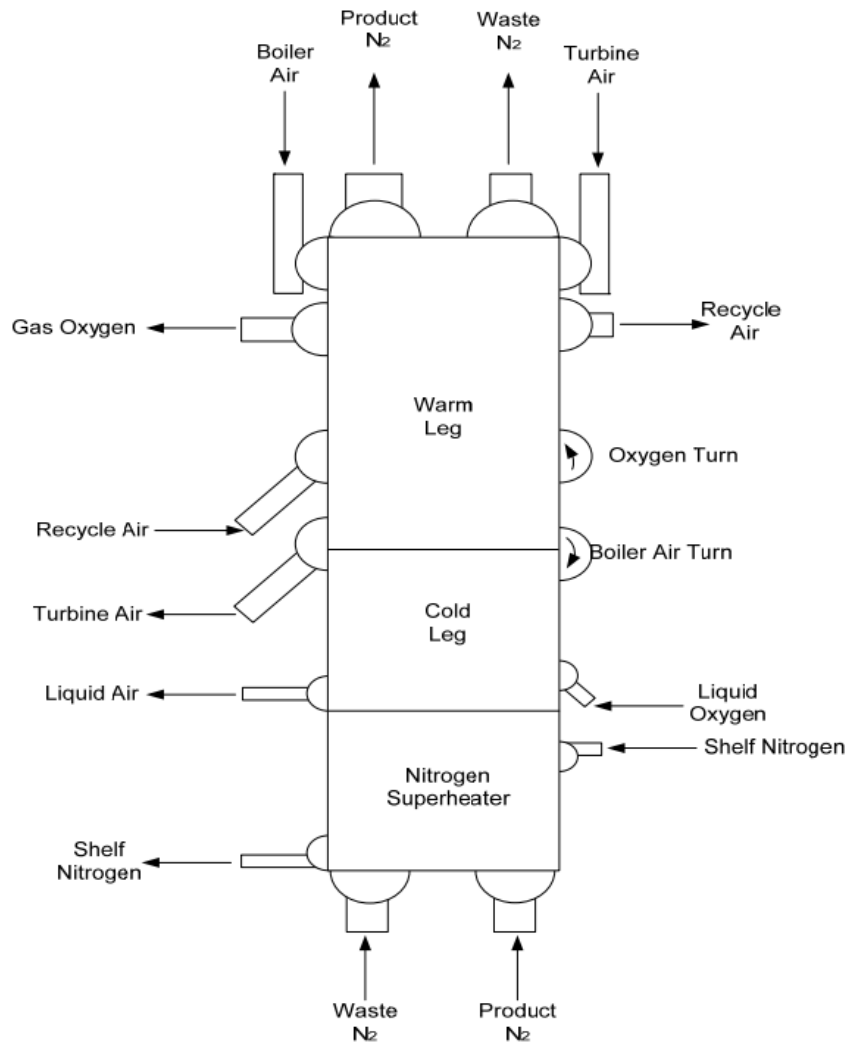
No *Cold Box*, o primeiro equipamento é o Trocador de Calor Principal (MHE – *Main Heat Exchanger*) onde se encontra as primeiras correntes de processo em condições criogênicas e, ao mesmo tempo, a maior malha de integração energética entre as correntes da seção fria.

O MHE é constituído por um trocador de calor de placas aletadas multicorrentes, através do qual as alimentações de ar trocam calor com os produtos das colunas de destilação. Este trocador possui três seções de transferência de calor, ramo quente (*warm leg*), ramo frio (*cold leg*) e o superaquecedor (*superheater N₂*) de nitrogênio, assim como é mostrado na Figura 2.3.

No interior do MHE, as correntes quentes de ar que ingressam no *Cold Box* trocam calor com as correntes frias de produto que estão saindo do *Cold Box* em direção à seção quente. No total, são setes correntes de processo que perpassam o Trocador de Calor Principal: a corrente *Boiler Air*, a corrente T *Turbine Air*, a corrente *Recycle Air*, a corrente “N₂ product”, a corrente “N₂ waste” e a corrente “O₂ product”.

O oxigênio líquido proveniente da bomba de processo de oxigênio é enviado à extremidade do ramo frio do MHE. Em seguida, após o processo de vaporização, o oxigênio é aquecido no ramo quente para recuperar a refrigeração.

Figura 2.3– Representação em seções do *Main Heat Exchanger*



Fonte: Autoria própria.

As correntes de nitrogênio puro gasoso e nitrogênio waste entram no MHE, através da extremidade fria do superaquecedor de nitrogênio. Elas são aquecidas em todas as seções do MHE e saem pela extremidade quente, à temperatura ambiente.

O ar de alta pressão (*boiler air*), responsável por transferir calor ao oxigênio vaporizado, é totalmente condensado na extremidade fria do ramo frio. Após sair do MHE, essa corrente de ar líquida é dividida e enviada à coluna inferior e à coluna superior, com suas pressões devidamente ajustadas por válvulas de controle.

O ar da turbina (*turbine air*) é resfriado apenas no ramo quente e, em seguida, é enviado à turbina da coluna inferior. O sistema de turbina da WRT é capaz de aumentar a refrigeração que é produzida pelo *Cold Box*. O fluxo de ar de reciclo resfriado, após ser

expandido na turbina da WRT, é enviado ao ponto médio do MHE, sendo aquecido pela corrente de *turbine air*. Assim, o ar de reciclo é retirado no ramo quente do MHE.

2.1.4.6 Coluna Inferior

A separação parcial do ar é realizada na coluna inferior de alta pressão (HP – *high pressure*). A coluna HP fornece refluxo à coluna superior de baixa pressão (LP – *low pressure*), na qual ocorre o último estágio de separação do ar em nitrogênio e oxigênio puros. O vapor, a alguns graus acima do ponto de orvalho, entra no fundo da coluna inferior, abaixo do último estágio através dos orifícios presentes nas bandejas ou pratos, criando bolhas no líquido que fluem por sobre as mesmas.

O ar liquefeito entra na coluna HP, acima do estágio cinco (N°5). O líquido que flui para baixo de bandeja a bandeja é chamado de "refluxo". Uma vez que a temperatura de ebulição do nitrogênio é menor do que a do oxigênio, o nitrogênio é, de preferência, vaporizado e separado da fase líquida. Já o oxigênio é, de preferência, condensado na fase líquida que flui para baixo de bandeja para bandeja.

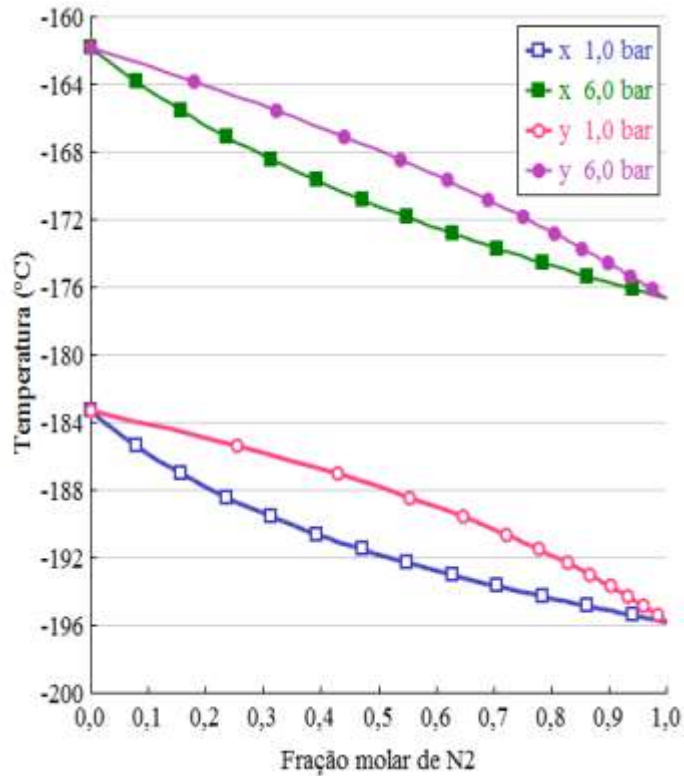
Quando o vapor chega ao topo da coluna HP, ele se concentra em nitrogênio puro. O nitrogênio gasoso (*shelf*), do topo da coluna inferior, entra no condensador principal, no qual, é condensado no lado da coluna inferior pelo oxigênio líquido que vaporiza no fundo da coluna superior (LINDE, 2017).

Tal evento só é possível pois o aumento da pressão na coluna inferior promove um deslocamento nas curvas de ponto de bolha (líquido saturado) e orvalho (vapor saturado) para temperaturas maiores. Na coluna inferior, que opera a pressões em torno de 5 bar, o produto de topo é um vapor altamente rico em nitrogênio, enquanto que na coluna superior, que opera em pressões de cerca de 1 bar, o produto de fundo é um líquido de elevada pureza em oxigênio. A diferença de pressão gera um gradiente de temperatura entre essas correntes de aproximadamente 7°C, que permite uma troca de calor latente entre as mesmas. A Figura 2.4 mostra essa diferença.

Quem desempenha o papel de refeedor/condensador da coluna dupla é trocador de calor do tipo termossifão. Esse trocador de calor opera em contracorrente e está imerso em oxigênio líquido. O fluxo de nitrogênio gasoso entra nos tubos e é condensado para nitrogênio líquido. Simultaneamente, oxigênio líquido entra na parte inferior do invólucro do trocador e, ao vaporizar parcialmente, carrega consigo uma quantidade significativa de líquido que é

recirculada. Para manter a recirculação do oxigênio líquido, é essencial manter um nível adequado da piscina de O_2 , garantindo que o trocador permaneça submerso.

Figura 2.4– Gráfico das curvas de ponto de bolha e orvalho para mistura de O_2 e N_2



Fonte: (TEIXEIRA e PASSOS, 2017)

O nitrogênio líquido (*shelf*) produzido pela condensação realizada pelo condensador principal, é dividido em dois fluxos: a maior parte é devolvida ao topo da coluna inferior em forma de refluxo, enquanto que o restante é subresfriado no superaquecedor de nitrogênio (*superheater N_2*) do MHE e, em seguida, é enviado rapidamente ao topo da coluna superior como refluxo (LINDE, 2017)

O refluxo de nitrogênio líquido que foi devolvido a coluna inferior flui pela bandeja superior, desce através dos *downcomers* de cada bandeja e o processo se repete da mesma forma, bandeja a bandeja, até que o refluxo chegue ao fundo da coluna.

O processo de retificação da fase líquida ocorre após descer a coluna e atravessar as bandejas, entrando em contato com o vapor que sobe através dos orifícios dos pratos. O líquido de refluxo é então coletado no fundo da coluna (corrente *kettle*) contendo cerca de 33% de oxigênio, em comparação aos 21% que existem no ar da atmosfera (LINDE, 2017)

O fluxo de nitrogênio líquido endereçado à coluna superior é monitorado por um controlador de fluxo, através de um orifício, o qual também ajusta, de forma adequada, a abertura da válvula de transferência. O nível de pureza do nitrogênio presente no topo da coluna inferior é determinado pela quantidade de refluxo que é devolvida à coluna inferior.

O *kettle* líquido é continuamente retirado do fundo da coluna inferior. Em seguida, o fluxo é separado e enviado à coluna superior e ao condensador de argônio. A proporção de *kettle* líquido que é transferida ao condensador de argônio bruto é controlada, visando manter um nível estável de líquido no fundo da coluna inferior. O *kettle* líquido endereçado ao condensador de argônio é parcialmente vaporizado. Assim, as fases líquidas e vapor formadas no condensador de argônio fluem, separadamente, para a coluna superior (LINDE, 2017)

2.1.4.7 Coluna Superior

O funcionamento da coluna superior é semelhante ao da coluna inferior. O líquido torna-se rico em oxigênio e argônio, à medida que desce a coluna, enquanto que o vapor torna-se rico em nitrogênio, à medida que sobe. O nitrogênio fica concentrado no topo da coluna, o oxigênio na seção de fundo e o argônio em um ponto intermediário que fica a cerca de 1/3 da coluna, partindo da parte inferior.

O nitrogênio líquido proveniente da coluna inferior é subresfriado através do superaquecedor de nitrogênio localizado no MHE. Em seguida, há uma quebra para a pressão da coluna superior através de uma válvula que controla a entrada de nitrogênio *shelf* no topo da coluna superior, atuando como refluxo para a mesma.

Ao contrário da coluna inferior que contém bandejas destinadas à separação de parcelas de oxigênio e de nitrogênio, a coluna superior consiste, quase que inteiramente, de leitos (recheios) acondicionados os quais oferecem menor perda de carga, menor tempo de residência do líquido e maior contato entre as fases gás e líquido.

O líquido que sai da última seção acondicionada da coluna superior forma uma piscina, na qual o condensador principal é parcialmente imerso. O líquido presente na piscina apresenta 99,5% de oxigênio e menos de 0,5% de argônio e quantidades insignificantes de nitrogênio.

Parte do oxigênio líquido é vaporizada no condensador principal pelo nitrogênio gasoso vindo da coluna inferior que condensa gerando o nitrogênio líquido (LN2 – *shelf*). Esse vapor sai do condensador principal e sobe pelas seções de leitos entrando em contato com o líquido descendente, proporcionando o funcionamento da coluna superior. O oxigênio

produto é retirado da parte mais baixa da coluna superior e, em seguida, é enviado a bomba de processo de oxigênio.

A bomba de oxigênio aumenta a pressão do oxigênio líquido. A maior parte do fluxo de líquido é transferida para o MHE, onde ocorre a vaporização do oxigênio trocando calor com a corrente de ar de alta pressão (*boiler air*) que por sua vez sofre condensação saindo do trocador com ar líquido. O oxigênio vaporizado é, em seguida, aquecido no MHE até atingir a temperatura ambiente. O oxigênio líquido restante proveniente da bomba de processo é retirado da planta na forma de oxigênio líquido produto e enviado para o tanque de estocagem.

O nitrogênio puro *top hat*, em estado gasoso, é retirado do topo (parte superior) da coluna superior e é aquecido no MHE, visando recuperar a refrigeração.

A corrente de nitrogênio *waste* que é removida abaixo do topo da coluna representa a parcela do ar que não pôde ser separada, de forma eficiente, através de processo de destilação. Essa parcela eliminada proporciona a estabilidade processual necessária à preservação da pureza do oxigênio produto, em uma ampla gama de condições operacionais. Após ser aquecido no MHE, o nitrogênio *waste* é utilizado como gás de regeneração do pré-purificador.

2.1.4.8 Coluna de Argônio Cru e a Coluna Superestagiada de Argônio

Em uma região específica da coluna superior, a composição do vapor atingirá aproximadamente 12% molar de argônio, com o restante sendo composto por oxigênio e apenas traços de nitrogênio. Essa área é conhecida como Zona de Transição, também denominada em inglês como "*Argon Belly*", e sua extensão depende das condições operacionais e da razão de refluxo da coluna. Nessa zona, encontra-se a retirada lateral que alimenta o fundo da coluna de argônio cru, e a transferência de correntes entre essas colunas ocorre por meio de um diferencial de pressão (LINDE ENGINEERING, 2017a).

O argônio presente no fluxo alimentado concentra-se no vapor que ascende para o topo da coluna, enquanto o oxigênio se acumula no líquido (90% O₂ e 10% Ar) que desce para a seção inferior da coluna. O líquido acumulado na base da coluna é drenado, por ação da gravidade, retornando para a coluna superior. O líquido proveniente do reservatório da coluna superestagiada é bombeado para a coluna de argônio cru e utilizado como refluxo (BERNSTEIN, 1999)

O vapor rico em argônio é liquefeito no condensador de argônio localizado no topo da coluna superestagiada. O condensador fornece líquido para refluxo da coluna, através da

condensação do vapor proveniente do topo, que é realizada pela troca de calor com a corrente de *kettle* vinda da coluna inferior. As parcelas de vapor e de líquido geradas a partir da corrente de *kettle* saem da parte superior e da parte inferior do condensador de argônio, respectivamente, e são enviadas à coluna superior.

A coluna superestagiada recebe esse nome por possuir um elevado número de estágios teóricos, possibilitados pelo uso de recheios estruturados. A volatilidade relativa entre oxigênio e argônio é pequena, uma vez que a região entre as curvas de ponto de bolha e de orvalho na pressão de 1 bar é diminuta. Assim, são necessários muitos estágios para que se alcance a pureza necessária (BERNSTEIN, 1999).

O argônio condensado é devolvido à coluna superestagiada, na forma de refluxo. Argônio em estado líquido, puro, é retirado da coluna superestagiada, a quatro estágios abaixo do topo da coluna. Este pequeno leito acondicionado, presente na coluna, é comumente conhecido como a seção de "pasteurização". Ela permite que o nitrogênio seja retirado do argônio (BERNSTEIN, 1999).

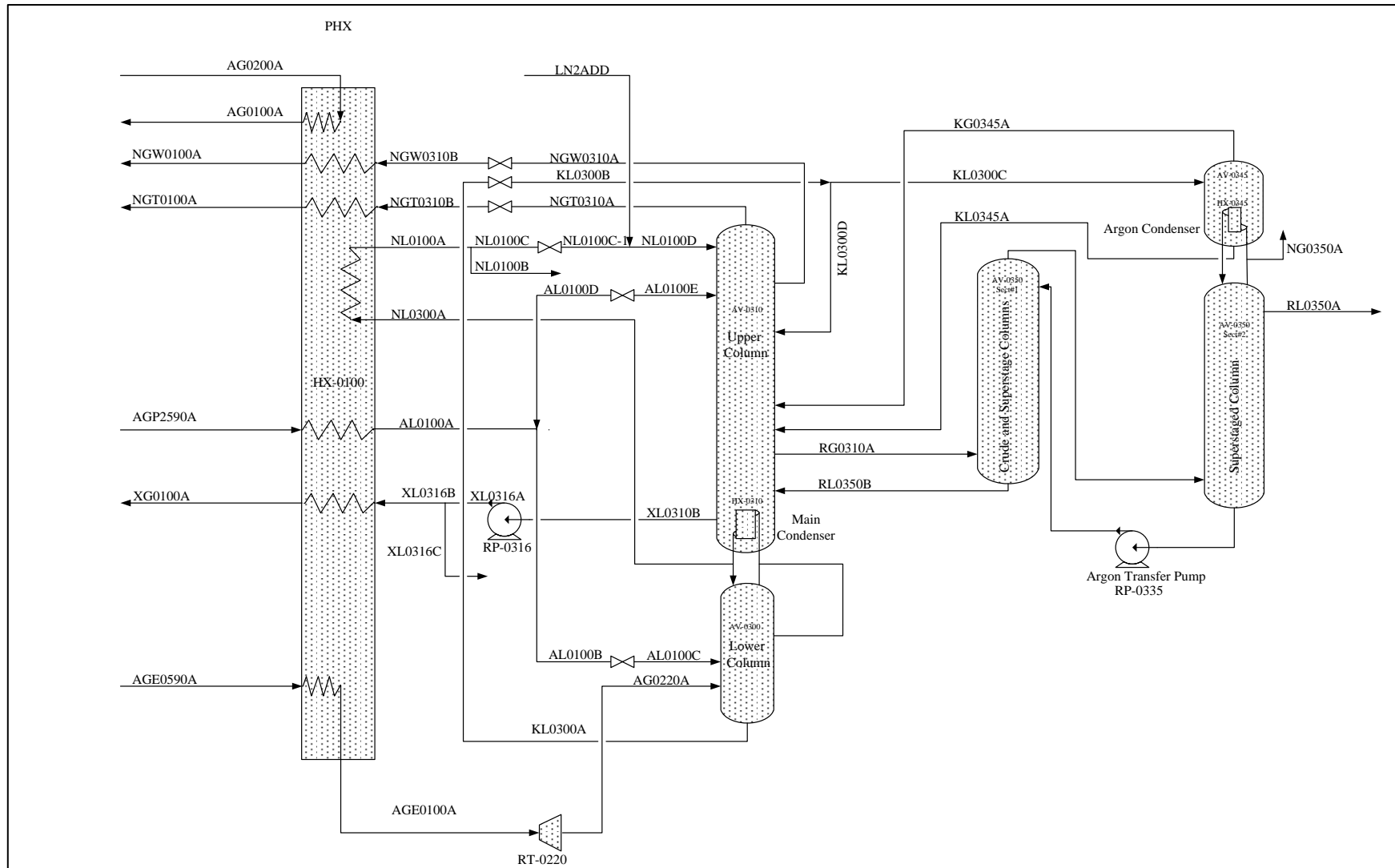
A condensação realizada pelo condensador de argônio controla o fluxo de argônio bruto que é alimentado, a partir da coluna superior. As pressões das duas colunas são, basicamente, iguais e a diminuição na pressão resultante do vapor de condensação, presente no condensador, constitui a força motriz que leva o fluxo alimentado a ser direcionado à coluna de argônio cru e a coluna superestagiada.

Durante a utilização da coluna de argônio cru e da coluna superestagiada de argônio, é fundamental manter o nível de pureza nos limites especificados para a alimentação e para os fluxos dos produtos. Um aumento repentino no nível de pureza do argônio pode fazer com que o teor de nitrogênio, presente na alimentação de argônio bruto, aumente até atingir um ponto, no qual o sistema não irá mais funcionar corretamente e o vapor do condensador de argônio ficará aprisionado. Na Figura 2.5, visualiza-se o fluxograma simplificado do processo, mostrando a integração das correntes das três colunas.

O nível de pureza do argônio varia de acordo com:

- O nível de pureza do condensador principal da coluna superior.
- A taxa de alimentação do argônio bruto (vazão de alimentação de argônio vindo da zona de transição da coluna superior).
- A taxa de consumo do argônio produto (vazão de argônio produto).

Figura 2.5 – PFD da Seção Fria do processo



Fonte: Autoria própria.

A produção de oxigênio controla o nível de pureza do condensador principal. Um alto teor de oxigênio na zona de transição (região da alimentação de argônio) reduz o teor de argônio na corrente de alimentação de argônio bruto, causando uma diminuição do produto de argônio líquido produto para o tanque de estocagem.

2.2 SIMULADOR DE PROCESSOS - UNISIM®

O software Honeywell UNISIM *Design Suite* é um ambiente de modelagem rigorosa para projeto, análise de desempenho, otimização, análise dinâmica e controle de processos. O desenvolvimento comercial de simuladores de processos, como este tipo de software é conhecido, teve início nas décadas de 60 a 80. São aplicados em muitas áreas, principalmente na indústria de óleo e gás, plantas químicas, refinarias, sistemas de tratamento, usinas de geração de energia, processos bioquímicos e na indústria alimentícia. Em 2004, a AspenTech foi forçada a alienar seus ativos da antiga Hyprotech, incluindo o código fonte do software HYSYS, permitindo o desenvolvimento do UNISIM® pela empresa Honeywell (PRATA, 2013).

A modelagem, por meio de hipóteses e de princípios de conservação (balanço de massa, de energia e de quantidade de movimento) gera modelos matemáticos que permite caracterizar o estado do sistema analisado pelo simulador, funcionando como uma representação do processo químico próximo da realidade. Ou seja, através da modelagem de um sistema, conseguimos analisar suas falhas, otimizar sua operação, melhorar o design dos equipamentos utilizados e, finalmente, simular diferentes modos de operação para obter o melhor cenário energético.

Conforme apontado por Ramirez (1997), a análise de riscos, juntamente com a avaliação da qualidade do processo em questão, constitui uma das principais vantagens da simulação de processos. Além disso, essa abordagem dispensa a necessidade de alocação de espaço físico adicional, o que representa outra vantagem significativa. A simulação também oferece a vantagem de proporcionar uma plataforma contínua para a experimentação de melhorias, testando novas estratégias e ideias e possibilitando o ajuste da planta conforme necessário.

Neste trabalho, utilizou-se o software UNISIM *Design Suite* 450. O UNISIM *Design Suite* apresenta-se como uma ferramenta acurada e fidedigna à realidade, permitindo a análise da sensibilidade paramétrica e a obtenção de condições de operação adequadas para o processo em questão.

2.2.1 Pacotes Termodinâmicos

O software UNISIM® possibilita a utilização de diversos pacotes termodinâmicos para cálculo das propriedades dos componentes envolvidos na simulação. As equações de estado permitem a definição das propriedades termodinâmicas, como por exemplo, volume molar, densidade, entropia, entalpia, pressão de vapor, entalpia de vaporização, dentre outros. (SMITH, 2005). Equações de estado são uma relação entre o volume molar, a temperatura e a pressão $V_M(T, P)$.

As principais equações de estado disponíveis no UNISIM são bastante consolidadas na literatura, tais como equação do gás ideal, equação de Peng-Robinson e equação SRK (Soave Redlich-Kwong) (SMITH, 2005).

Para este trabalho, utilizou-se a equação Peng-Robinson, que representa satisfatoriamente o comportamento termodinâmico de líquidos e vapores para gases atmosféricos.

A equação de Peng-Robinson é descrita como:

$$P = \frac{RT}{V_M - b} - \frac{\alpha a}{V_M^2 + 2bV_M - b^2} \quad (2.2)$$

Em que:

V_M – Volume molar do sistema;

T – Temperatura;

P – Pressão;

R – Constante universal dos gases.

Os demais parâmetros presentes na Equação 2.2 são mostrados nas Equações (2.3) a (2.7):

$$a = 0,457235 \frac{R^2 T_C^2}{P_C} \quad (2.3)$$

$$b = 0,077796 \frac{R T_C}{P_C} \quad (2.4)$$

$$\alpha = [1 + \kappa (1 - T_R^{0,5})]^2 \quad (2.5)$$

$$T_R = \frac{T}{T_C} \quad (2.6)$$

$$\kappa = 0,37463 + 1,54226 \omega - 0,26992 \omega^2 \quad (2.7)$$

Em que T_C e P_C representam, respectivamente, a temperatura e a pressão crítica. T_R representa a temperatura reduzida. κ é um parâmetro característico de cada substância e ω é o fator acêntrico de Pitzer, “a” e “b” são fatores relativos às forças de atração e repulsão entre as moléculas de uma determinada substância.

2.3 GRAUS DE LIBERDADE

Antes da simulação de um processo, é fundamental garantir que as equações do modelo formem um conjunto solucionável. Em outras palavras, as variáveis de saída devem ser resolvidas em termos das variáveis de entrada. Para que o modelo tenha uma solução, o número de variáveis desconhecidas deve ser igual ao número de equações independentes do modelo. Isso implica que todos os graus de liberdade devem ser utilizados. O grau de liberdade de um sistema pode ser determinado pela Equação 2.8. Um processo poderá ser resolvido quando todos os graus de liberdade forem especificados (SEBORG, EDGAR e MELLICHAMP, 2011).

$$N_F = N_V - N_E \quad (2.8)$$

Em que:

N_F – Quantidade de graus de liberdade;

N_V – Número de variáveis;

N_E – Números de equações.

Uma análise de graus de liberdade permite que os problemas de modelagem sejam classificados de acordo com as seguintes categorias (SEBORG, EDGAR e MELLICHAMP, 2011):

- 1) $NF = 0$: o sistema está definido ou totalmente especificado, o número de equações é igual ao número de variáveis ($NE = NV$).
- 2) $NF < 0$: o sistema está superespecificado, indicando que o número de variáveis é menor que o número de equações ($NV < NE$) evidenciando problemas na modelagem,

com possível redundância nas equações, ou um número excessivo de variáveis especificadas.

- 3) $NF > 0$: para problemas relacionados à simulação, o sistema está subespecificado, significando que o número de variáveis é maior que o número de equações, devendo-se avaliar se estão faltando equações ou se devem ser especificadas um número maior de variáveis. Se a situação estiver relacionada a um caso de otimização, é necessário que NF seja maior que zero.

2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é uma técnica de avaliação que busca prever as variáveis de saída de um modelo frente às oscilações das variáveis determinantes (parâmetros de entrada). Em outras palavras, são realizadas simulações computacionais com valores diferentes de variáveis de entrada para compreender o efeito de cada uma no modelo do processo a partir das respostas do sistema (FREY e PATIL, 2002).

Essa abordagem fornece *insights* valiosos para entender a robustez do modelo e identificar quais parâmetros têm um impacto mais significativo nas respostas do sistema. Além disso, a análise de sensibilidade paramétrica é importante na otimização de processos, permitindo a identificação de ajustes necessários para atingir objetivos específicos.

É possível classificar a influência das variáveis independentes sobre a variabilidade da saída, avaliando dessa forma quais parâmetros são desprezíveis para o modelo final.

Neste trabalho, será realizada a análise de sensibilidade local da planta. Pequenas perturbações em torno de um valor de um único parâmetro afetarão os valores de saída, determinando o impacto local dessas variações em um pequeno intervalo em torno de um valor nominal de referência.

Ao realizar essa análise, projetistas e pesquisadores podem tomar decisões mais acuradas, aprimorar a confiabilidade dos modelos e direcionar seus esforços para áreas críticas. Em resumo, a análise de sensibilidade paramétrica é uma ferramenta valiosa para entender a dinâmica de sistemas complexos e aprimorar a precisão das previsões em diversas disciplinas.

3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho fornece de modo organizado as etapas necessárias para simulação e análise operacional dos dados de processo, tomados de uma planta industrial real existente, de forma a auxiliar futuros estudos de simulação e otimização de sites industriais existentes, visando melhorias no desempenho energético do processo como um todo.

3.1 MATERIAIS

As ferramentas utilizadas na realização deste trabalho são: *Software* UNISIM Design Suite 450, *Software* Excel, computador (Processador Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, 16 GB RAM, Sistema operacional de 64 bits) e os dados coletados da literatura.

3.2 CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO DESIGN

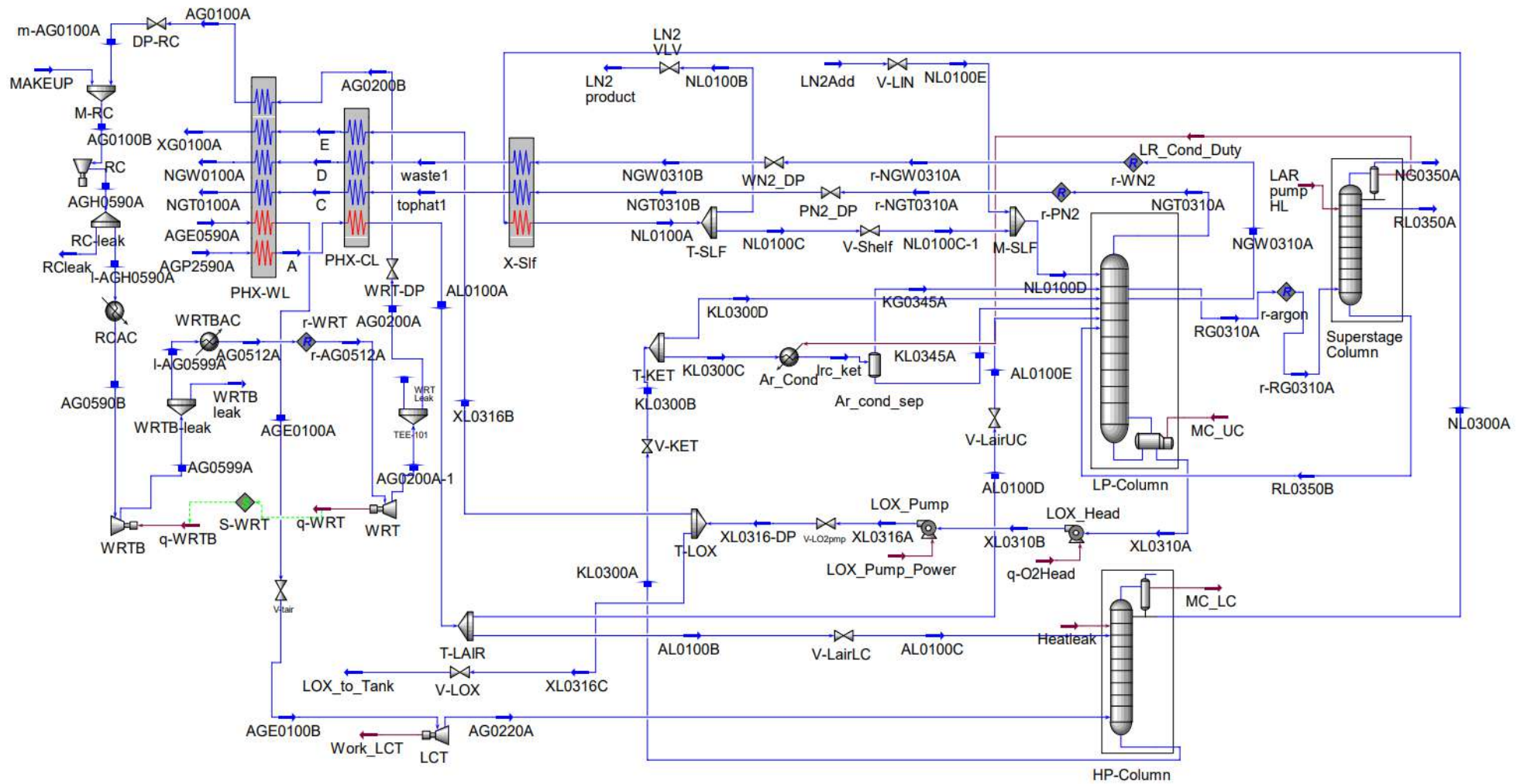
O primeiro passo deste trabalho foi simular a obtenção de oxigênio líquido (LOX) e gasoso (GOX), nitrogênio líquido (LIN) e gasoso (GAN) e de argônio líquido (LAR) a partir do processo de separação criogênica do ar da planta existente. Para fins de referência, o cenário original foi denominado de "DESIGN". E elaborou-se uma simulação pelo UNISIM do cenário DESIGN, na qual os dados de processo da simulação computacional foram comparados aos parâmetros operacionais reais da planta existente. Esses parâmetros foram extraídos do sistema de monitoramento e controle em tempo real da ASU em questão, que registra diariamente os valores de temperatura, pressão, composição e vazão. A comparação entre os valores foi realizada de forma que o erro relativo entre os parâmetros de vazão mássica dos produtos LOX, GOX, LIN, GAN, LAR fossem menores que 1%. A escolha de 1% se deu pela necessidade de que as vazões e purezas calculadas fossem precisas a ponto de possuir o mesmo números de algarismos significativos que os valores reais.

Os valores reais da planta existente foram extraídos do Sistema de Controle e Monitoramento Operacional (SCMO) da empresa. Dentro de um intervalo de 1 ano, os dados de processo extraídos foram transformados, através de uma média aritmética, em um valor apenas que servirá como base de comparação.

Nessa simulação, foram estabelecidos os parâmetros e o pacote termodinâmico a serem utilizados. Os equipamentos da Seção Quente do processo, como o compressor principal do ar, a *Bridge Machine* e as peneiras moleculares da unidade de pré-purificação, não foram incluídos na simulação. A modelagem foi restrita à Seção Fria do processo, a qual inclui as correntes do WRT. A Figura 3.1 representa o modelo original implementado para nossa simulação no UNISIM.

Para a simulação computacional, assumiu-se algumas hipóteses no processo: operação em estado estacionário; ausência de quaisquer linhas que são usadas fora de condições normais de operação (purga/degelo); existência de perda de carga nos equipamentos e ausência de contaminantes (umidade, CO₂ e hidrocarbonetos) na corrente de alimentação de ar.

Figura 3.1 – Fluxograma do cenário DESIGN da Seção Fria no UNISIM



Fonte: Autoria própria

A criação do fluxograma de processo no UNISIM foi realizada a partir dos seguintes passos:

1. Escolha dos componentes puros que irão compor as correntes no banco de dados do simulador, no caso, o oxigênio, nitrogênio e argônio;
2. Escolha do pacote termodinâmico Peng Robinson para fase vapor e líquida;
3. Inserção de todas as correntes e das operações unitárias pertinentes para a planta existente de destilação criogênica do ar;
4. Inclusão dos dados de processo nas correntes de alimentação, como pressão, temperatura, vazão e composição
5. Escolha das especificações de forma a utilizar todos os graus de liberdade do sistema;
6. Convergência do modelo computacional até os valores de vazão e de pureza calculados na simulação do cenário DESIGN possuírem menos de 1% de erro relativo em relação às vazões e purezas reais dos produtos na planta existente conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1– Requerimentos do antigo cliente

Produto	Vazão	Pressão ¹	Pureza (molar)
Oxigênio Gasoso	10000 Nm ³ /h	14 barg	99,5 % $N_2 \leq 200 \text{ ppm}$
Nitrogênio Gasoso	8000 Nm ³ /h	8 barg	99,95% $O_2 \leq 300 \text{ ppm}$
Oxigênio Líquido ²	6,0 m ³ /h	N/A	99,5%
Nitrogênio Líquido ²	7,5 m ³ /h	N/A	99,95%
Argônio Líquido ²	0,5 m ³ /h	N/A	99,999%

Nota 1: Valores de pressão no limite de bateria da planta. Por conta da perda de carga no gasoduto, garantir uma pressão de saída do Cold Box 2 bar acima da pressão do limite de bateria.

Nota 2: Essas demandas específicas dão-se pelo mercado de líquido existente na região Sudeste, em 2008

Os dados de processo inseridos nas correntes de alimentação AGE0590A e AGP2590A seguem os parâmetros reais da planta existente como composição (seco e limpo), pressão, temperatura e estado físico. As correntes de alimentação AGE0590A e AGP2590A são encaminhadas para o MHE que é dividido em três seções, conforme mencionado no Capítulo 2. Elas trocam calor com as correntes frias de *waste*, GAN e GOX. A corrente

AGE0590A deixa o MHE no final da seção *warm leg* ainda no estado gasoso e é conduzida à turbina da coluna inferior LCT sofrendo expansão no equipamento. Após a expansão, é direcionada para a entrada no fundo da coluna LP, no estágio 43. Em contraste, a corrente AGP2590A é retirada do MHE apenas após o fim da seção *cold leg* onde é liquefeita. Em seguida, é direcionada ao divisor de correntes T-LAIR, resultando nas correntes AL0100B e AL0100D, que seguem para a coluna inferior (estágio 39) e superior (estágio 19), respectivamente. A pressão da corrente AL0100B é ajustada pela válvula V-LairLC, assim como a pressão da AL0100D é ajustada pela válvula V-LairUC. A Tabela 3.2 exhibe as especificações definidas nas correntes de alimentação de ar atmosférico na simulação.

O software UNISIM não dispõe da coluna dupla de destilação nos seus equipamentos, por isso foram utilizadas duas colunas de destilação, uma contendo um condensador para representar a coluna inferior de alta pressão e outra contendo um refeedor para representar a coluna superior de baixa pressão. Seguindo as informações reais da planta existente, projetou-se a coluna inferior com 43 estágios, a superior com 92 estágios e a de argônio com 179 estágios. Na realidade, a superior é uma coluna de recheio, logo o cálculo de estágios foi realizada de modo teórico. A contagem dos estágios das colunas foi feita de cima para baixo, sendo assim, o topo representa o primeiro estágio e o fundo o último estágio.

Tabela 3.2– Especificações das correntes de alimentação de ar

Correntes	AGE0590A	AGP2590A
Pressão	44.35 bar	44.35 bar
Temperatura	38.56 °C	38.56 °C
Vazão	49059 Nm ³ /h	30204 Nm ³ /h
Fração molar de Nitrogênio	0.781121	0.781121
Fração molar de Argônio	0.009343	0.009343
Fração molar de Oxigênio	0.209536	0.209536

Na coluna HP, a corrente de saída do topo é a NL0300A (nitrogênio puro *shelf*) e a do fundo a KL0300A (líquido enriquecido de O₂, ou, *kettle*). A corrente NL0300A representa o nitrogênio puro que foi liquefeito no condensador principal. Tal corrente segue para a seção *superheater N₂* do MHE onde é subresfriada devido à troca de calor com as correntes de nitrogênio produto e *waste*. Por fim, segue para o T-SLF, onde parte será armazenada em tanques e parte será utilizada como refluxo da coluna superior. Vale ressaltar que na própria

tela da coluna HP existem especificações sobre o refluxo, não sendo necessário a criação de uma corrente de matéria para representá-lo.

Por outro lado, na saída do fundo da coluna HP, a corrente KL0300A é controlada pela válvula V-KET e dividida na T-KET em duas correntes, KL0300C e KL0300D. A corrente KL0300C é alimentada ao condensador de argônio onde a maioria do líquido é vaporizada em razão da condensação do vapor da coluna superestagiada. Tanto a parte líquida (KL0345A) como gasosa (KG0345A) da antiga corrente KL0300C são conduzidas à coluna LP (estágio 33 para gasosa e 34 para líquida). A corrente KL0300D é diretamente alimentada à coluna LP, no estágio 27. As especificações da coluna HP aparecem na Tabela 3.3

A variável selecionada para ser especificada na coluna HP foi: (i) refluxo do nitrogênio *shelf*.

Tabela 3.3– Configuração e especificações da coluna HP

Nº de estágios	43
Tipo de Condensador	Total
Razão de Refluxo	1,30
Pressão do topo	4,567 barg
Pressão do fundo	4,875 barg
Corrente de entrada lateral	AL0100C (39º estágio)

Tabela 3.4– Configuração e especificações da coluna LP

Nº de estágios	92
Tipo de Refervedor	Kettle
Razão de Refluxo	1,146
Fração molar de N₂ no 55º estágio	$2,7 \times 10^{-7}$
Vazão de RG0310A	18160 Nm ³ /h
Pressão do topo	0,3469 barg
Pressão do fundo	0,4767 barg
Corrente de entrada lateral 1	AL0100E (19º estágio)
Corrente de entrada lateral 2	KG0345A (33º estágio)
Corrente de entrada lateral 3	KL0345A (34º estágio)
Corrente de entrada lateral 4	KL0300D (27º estágio)
Corrente de entrada lateral 5	RL0350B (55º estágio)
Corrente de saída lateral 1	NGW0310A (9º estágio)
Corrente de saída lateral 1	RG0310A (55º estágio)

Na coluna LP, a corrente de saída do topo é o NGT0310A (GAN) e a de fundo é o XL0310A (LOX + GOX). A corrente NGT0310A, junto da corrente *waste* NGW0310A (retirada no estágio 9 da coluna HP) seguem para as três seções do MHE de modo que cheguem à temperatura ambiente. A corrente XL0310A é bombeada pela bomba LOX_Pump em direção ao divisor de correntes T-LOX, sendo dividida em duas correntes, XL0316C e XL0316B. A corrente XL0316C é destinada ao armazenamento em tanques (LOX) e a XL0316B será vaporizada nas seções *cold leg* e *warm leg* até a temperatura ambiente (GOX). As especificações da coluna LP aparecem na Tabela 3.4.

As variáveis selecionadas para serem especificadas na coluna LP foram: (i) vazão da corrente RG0310A, (ii) razão de refluxo, (iii) composição de N₂ na corrente RG0310A.

Outra corrente de saída é a RG0310A, retirada da Zona de Transição da coluna, identificada aqui pelo estágio 55, e alimentada no fundo da coluna superestagiada onde é destilada, originando três novas correntes de saída: corrente de topo NG0350A, corrente RL0350A (LAR) do estágio 4 e corrente de fundo RL0350B que é devolvida à coluna superior, no estágio 55.

As variáveis selecionadas para serem especificadas na coluna de argônio foram: (i) composição de N₂ no estágio 4, (ii) composição de O₂ no estágio 4. Lembrando que o estágio 4 é o local de saída da corrente RL0350A (LAR).

Tabela 3.5– Configuração e especificações da coluna de argônio

Nº de estágios	179
Tipo de Condensador	Refluxo total
Razão de Refluxo	1,30
Pressão do topo	0,2692 barg
Pressão do fundo	0,4105 barg
Corrente de saída lateral	RL0350A (4º estágio)
Fração molar de N₂ no 4º estágio	$1,0 \times 10^{-6}$
Fração molar de O₂ no 4º estágio	$9,956 \times 10^{-7}$

Conforme mostrado na Tabela 3.5, a coluna de argônio foi configurada com 179 estágios de separação, com pressão no topo de 0,2682 barg e pressão de fundo de 0,4105 barg. Não foi considerada perda de carga no condensador de argônio. Toda a energia necessária na

etapa de condensação é proveniente da própria corrente KL0300C, oriunda do fundo da coluna HP.

Por último, realizou-se a simulação do ciclo de refrigeração do WRT. A corrente AG0100B é comprimida pelo compressor RC (75% de eficiência adiabática) e segue como corrente AGH0590A que é dividida pelo RC-leak, simulando as perdas mássicas reais no compressor de reciclo pela corrente RCleak. A corrente I-AGH0590A é, então, resfriada pelo RCAC – um trocador de calor. Após o resfriamento, a corrente agora chamada de AG0590B é comprimida novamente no compressor WRTB (77,9% de eficiência adiabática) e dividida pelo WRTB-leak, simulando novamente as perdas mássicas reais no compressor *booster* do WRT. A corrente é resfriada pelo WRTBAC e direcionada à turbina WRT (86,4% de eficiência adiabática). Após a expansão, a corrente chamada AG0200A-1 é dividida simulando as perdas mássicas reais na turbina. Depois da divisão, a nova corrente AG0200A é direcionada à válvula WRT-DP que implica a perda de carga real até a entrada do MHE. A seguir, a corrente AG0200B entra na seção *warm leg* do MHE e sai de volta ao compressor de reciclo RC passando por uma válvula DP-RC. Por fim, a corrente MAKEUP serve para repor toda a vazão de ar que foi perdida durante o ciclo de compressão e expansão.

Para representação do MHE na simulação, utilizou-se os trocadores multicorrentes do tipo “LNG Exchanger” do UNISIM. São três trocadores chamados de MHE-WL, MHE-CL e MHE-SH.

Tabela 3.6– Configuração do trocador MHE-WL

Correntes de entrada	Correntes de saída	Perda de carga	Tipo
AGE0590A	AGE0100A	0,1103 bar	Quente
AGP2590A	A	0,2701 bar	Quente
C	NGT0100A	0,2701 bar	Fria
D	NGW0100A	0,2701 bar	Fria
E	XG0100A	0,2701 bar	Fria
AG0200B	AG0100A	0,2701 bar	Fria

Tabela 3.7– Especificações das correntes no trocador MHE-WL

Correntes	Pressão	Temperatura
AGE0100A	N/A	-87,24 °C
XG0100A	16,98 bar	N/A

Durante a configuração, conforme listado nas Tabelas 3.6 e 3.7, definiu-se quais as correntes frias e quentes, a magnitude das perdas de cargas, a pressão final da corrente XG0100A para 16,98 barg e a temperatura de saída da corrente AGE0100A. Vale relembrar que esses dados são baseados no cenário real da planta ASU existente.

Da mesma forma, definiu-se as configurações dos trocadores multicorrentes MHE-CL e MHE-SH. Como o MHE-CL encontra-se numa seção intermediária em relação aos outros dois trocadores, não foi necessário especificar dados de processo para nenhuma das correntes de entrada ou de saída do equipamento. No caso do MHE-SH, foi necessário especificar apenas a pressão da corrente NL0100A. Todos os *inputs* necessários são listados nas Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10.

Tabela 3.8– Configuração do trocador MHE-CL

Correntes de entrada	Correntes de saída	Perda de carga	Tipo
A	AL0100A	0,0 bar	Quente
Tophat1	C	0,0328 bar	Fria
Waste1	D	0,0539 bar	Fria
XL0316B	E	0,0651 bar	Fria

Tabela 3.9– Configuração do trocador MHE-SH

Correntes de entrada	Correntes de saída	Perda de carga	Tipo
NGT0310B	Tophat1	0,0 bar	Fria
NGW0310B	Waste1	0,0 bar	Fria
NL0300A	NL0100A	0,0 bar	Quente

Tabela 3.10– Especificações das correntes no trocador MHE-SH

Correntes	Pressão
NL0100A	4,567 bar

A coluna LP foi configurada de modo a não tornar fixa os valores de pureza da corrente XL0310A (produto de fundo) e da corrente NGT0310A (produto de topo), bem como suas vazões de saída da coluna. Como um dos objetivos deste trabalho é observar a sensibilidade desses parâmetros, é fundamental que esses valores não sejam especificados. De maneira análoga, como visto na Tabela 3.3, a especificação definida na coluna HP é a razão

de refluxo, possibilitando a análise futura da pureza tanto do *shelf* como do *kettle*, assim como suas vazões de saída.

3.3 ESTUDO DE CASO – DESIGN

Após a convergência da planta DESIGN em questão, realizou-se uma análise de sensibilidade paramétrica quanto à vazão de alimentação de ar, o refluxo na coluna HP e a vazão de nitrogênio *shelf* na coluna LP dentro de uma certa variação percentual, de modo a verificar a magnitude de resposta das variáveis controladas.

Em primeiro lugar, foram calculadas as variações nas vazões de ar a serem aplicadas na simulação. Em um cenário real, é importante estabelecer as perturbações máximas e mínimas que a vazão de ar pode sofrer, respeitando o potencial de compressão do compressor existente e evitar o fenômeno de surge. Por isso, a partir da curva de operação do MAC, localizada no Anexo D, definiu-se o valor máximo e mínimo para alteração da vazão de ar para uma mesma abertura das venezianas de sucção do compressor (40,0% representado pela curva com ícone de círculo). No Anexo A, o eixo das abcissas representa a vazão de ar alimentada ao compressor na unidade CFH-NTP e no das ordenadas a pressão de compressão em psia.

Tabela 3.11– Vazões totais de alimentação de ar utilizadas na análise de sensibilidade.

Δ Vazão de Ar	Vazão total da corrente (Nm ³ /h)
7,0%	84797
6,0%	84005
5,0%	83212
4,0%	82420
3,0%	81627
2,0%	80835
1,0%	80042
0,00%	79250
-1,0%	78457
-2,0%	77665
-3,0%	76872
-4,0%	76080
-5,0%	75287
-6,0%	74495
-7,0%	73702

Para uma abertura de 40,0% da IGV, o valor máximo é equivalente a **84.810 Nm³/h** e o valor mínimo igual a **73.600 Nm³/h**, ressaltando que o valor da vazão total de ar da planta existente, antes da transferência, é de **79.250 Nm³/h**. Inicialmente, a divisão feita entre as duas correntes segue a divisão real da planta existente, sendo 61,89% da vazão total para AGE0590A e 38,11% para AGP2590A, entretanto o valor acrescido ou diminuído da vazão de ar será dividido igualmente entre as duas correntes. Todas as análises de sensibilidade foram simuladas no software UNISIM e registradas no *Excel*. As vazões utilizadas estão expostas na Tabela 3.11.

Variou-se o fluxo de ar até o valor máximo próximo de 84.810 Nm³/h, resultando em sete variações com intervalos de 1,0%, com expectativa de visualizar o comportamento das correntes de produto frente às perturbações.

Em segundo lugar, o critério escolhido para definição da variação máxima de 28,8% na vazão de N₂ *shelf* na coluna LP é a vazão total produção do N₂ *shelf* na coluna HP. Conforme descrito na Seção secundária 3.2, a corrente NL0300A representa esta vazão total que pode ser dividida em duas correntes, uma corrente que alimenta a coluna LP e uma corrente de retirada para armazenamento (LIN). É quando a corrente LIN vai a zero que obtemos a variação máxima de 28,8% da vazão de N₂ *shelf*. Para a variação mínima, o critério foi ter a mesma quantidade de valores de Δ de vazão que a parte acima de 0,0%. As variações da vazão de alimentação de N₂ *shelf* na coluna LP são apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12– Vazões de N₂ *shelf* utilizadas na análise de sensibilidade.

Δ Vazão N ₂ <i>shelf</i>	Vazão da corrente (Nm ³ /h)
28,8%	23560,0
25,0%	22873,0
20,0%	21958,1
15,0%	21043,2
10,0%	20128,2
5,0%	19213,3
0,0%	18298,4
-5,0%	17383,5
-10,0%	16468,6
-15,0%	15553,6
-20,0%	14638,7
-25,0%	13723,8
-30,0%	12808,9

Em terceiro lugar, quanto a variação do parâmetro razão de refluxo da coluna HP, o objetivo é realizar oito variações positivas e negativas do parâmetro, possibilitando a análise

do comportamento das vazões e das purezas dos produtos de interesse. Como a simulação é estacionária, não se percebe limitações hidráulicas que definam um limite máximo da razão de refluxo. Os valores das variações da razão de refluxo na coluna HP foram expostos na Tabela 3.13.

Em todas as análises de variação desses três parâmetros, criou-se no *Excel* um “*spreadsheet*” da planta, com função de registrar os resultados das correntes de maior interesse para o estudo, os produtos GAN, GOX, N₂ *shelf*, LAR. Não foram analisados os resultados dos produtos LIN e LOX, pois, na simulação, suas vazões são especificadas, e suas purezas são idênticas aos produtos N₂ *shelf* e GOX, respectivamente.

Na análise da vazão de ar, foram considerados os impactos no consumo energético da planta, abrangendo o MAC, *Bridge Machine* e o WRT, bem como o consumo de água de resfriamento desses equipamentos.

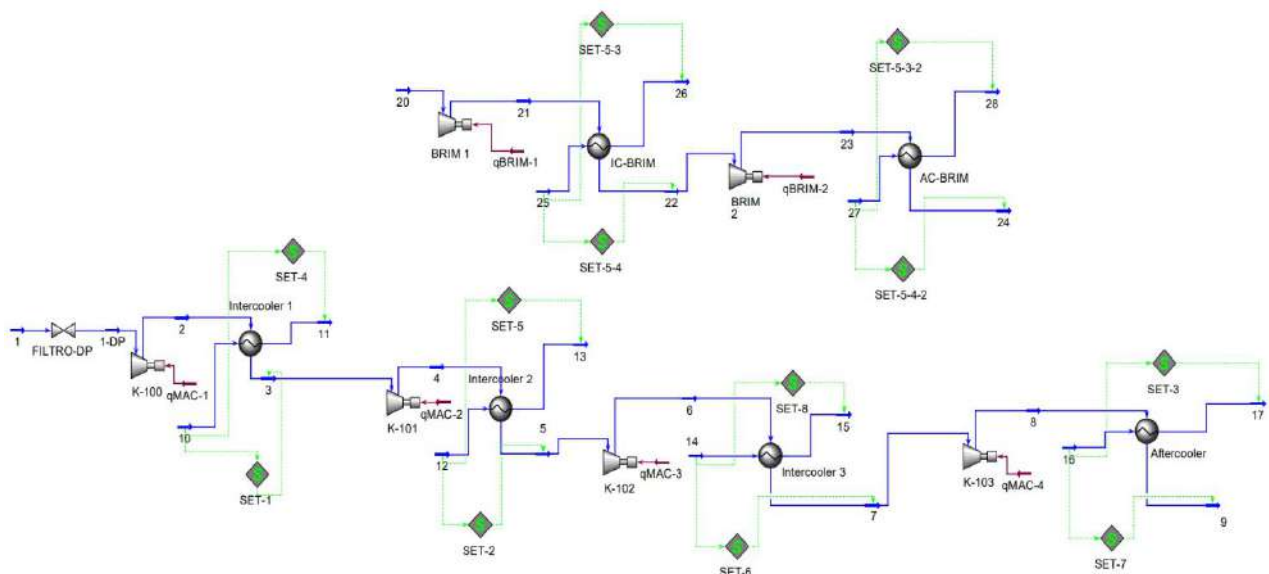
Tabela 3.13 – Razões de refluxo utilizadas na análise de sensibilidade.

Δ R.R	Razão de Refluxo
32,0%	1,716
28,0%	1,664
24,0%	1,612
20,0%	1,560
16,0%	1,508
12,0%	1,456
8,0%	1,404
4,0%	1,352
0,0%	1,300
-4,0%	1,248
-8,0%	1,196
-12,0%	1,144
-16,0%	1,092
-20,0%	1,04
-24,0%	0,988
-28,0%	0,936
-32,0%	0,884

Por fim, perturbou-se, individualmente, a vazão de alimentação de ar, o refluxo na coluna HP e a vazão de nitrogênio *shelf* na coluna LP e os resultados colecionados no *Excel* estão apresentados no Capítulo 4 para discussão. Por ora, não se reconheceu nenhuma limitação às variações dos valores de refluxo na coluna HP, por isso, nesse caso, não houve critérios para definição de valores máximos e mínimos.

Para estudo do impacto nestes consumos, uma nova simulação foi realizada exclusivamente para o MAC e o sistema da *Bridge Machine*. Nessa simulação, representado pela Figura 3.2, foi feita a subdivisão do compressor principal em quatro compressores distintos, cada um representando um estágio do MAC, juntamente com o resfriador na saída de cada estágio. Da mesma forma, a BRIM A é subdividida em 2 estágios, com a presença dos trocadores de calor na saída de cada estágio.

Figura 3.2 – Fluxograma do cenário DESIGN dos compressores no UNISIM



A corrente 1 representa a entrada de ar seco que segue em direção à válvula FILTRO-DP, representando a perda de carga oriunda da etapa de filtragem. Segue para o 1º estágio do MAC, o K-100, que é pressurizado e resfriado pelo 1º trocador de calor casco-tubo chamada de *Intercooler 1*. O mesmo repete-se no 2º, 3º e 4º estágio até a saída da linha de ar representada pela corrente 9.

Em cada um dos trocadores de calor, a entrada da água de resfriamento tem sua temperatura especificada num valor muito próximo do real, de 32°C. A vazão de água necessária foi calculada visando atingir uma temperatura de *approach* de 7 °C. Nos trocadores de calor, assumiu-se uma queda de pressão de 0,07 bar.

O modelo da BRIM A seguiu o mesmo raciocínio lógico da simulação do MAC, atentando-se, às pressões e temperaturas que são consideradas na planta existente. Nas Tabelas 3.14 e 3.15 são apresentados os dados de processo especificados nesta simulação.

Tabela 3.14– Especificações das correntes de alimentação de ar

CORRENTES	1	20
Pressão	$-1,789 \times 10^{-3}$ bar	11 barg
Temperatura	30,0 °C	38,33 °C
Vazão	79.250 Nm ³ /h	79.250 Nm ³ /h
Fração molar de N₂	0.781121	0.781121
Fração molar de Ar	0.009343	0.009343
Fração molar de O₂	0.209536	0.209536

Tabela 3.15– Especificações do MAC e da BRIM A

EQUIPAMENTO	MAC	BRIM A
Pressão de Descarga (1° ESTÁGIO)	1,31 barg	25,46 barg
Pressão de Descarga (2° ESTÁGIO)	3,068 barg	45,32 barg
Pressão de Descarga (3° ESTÁGIO)	6,964 barg	N/A
Pressão de Descarga (4° ESTÁGIO)	11,89 barg	N/A

3.4 ESTUDO DE CASO – TURNDOWN

Ao contrário do cenário DESIGN, que foi simulado para representar a realidade da planta antes da transferência, o novo cenário TURNDOWN será modelado com objetivo de atender o novo cliente e, ao mesmo tempo, de reduzir os custos da planta com novas condições operacionais.

Neste tópico, modificamos a simulação obtida anteriormente para este novo modelo. No antigo modelo, produzia-se as vazões de 10780 Nm³/h de GOX e 15555 Nm³/h de GAN de forma que a produção de LIN e de LOX fosse, ao mesmo tempo, igual e suficiente para a demanda do mercado de líquidos da região Sudeste. Entretanto, um novo cenário foi construído para atendimento não apenas dos novos requerimentos, consequência da transferência física da planta ASU para o *site* do novo cliente, como também da mudança no consumo do novo mercado de líquidos para a região Centro-Oeste.

Tabela 3.16– Requerimentos do novo cliente

Produto	Vazão	Pressão ³	Pureza (molar)
Oxigênio Gasoso	7600 Nm ³ /h	12 barg	95,0 %
Oxigênio Líquido ⁴	6,0 m ³ /h	N/A	99,5%
Nitrogênio Líquido ⁴	3,0 m ³ /h	N/A	99,95%
Argônio Líquido ⁴	0,5 m ³ /h	N/A	99,999%

Nota 3: Valores de pressão no limite de bateria da planta. Por conta da perda de carga no gasoduto, garantir uma pressão de saída do Cold Box 2 bar acima da pressão do limite de bateria.

Nota 4: As demandas dão-se pelo mercado de líquido existente na região Centro-Oeste, em 2023.

Por esta razão, é necessário analisar novas condições operacionais que, ao mesmo tempo, reduzam o consumo de energia e de água da planta, e proponham melhores condições operacionais que satisfaçam os novos requisitos de produção de líquido e gás. A seguir, são representados na Tabela 3.16 os novos requerimentos.

Agora, para esse novo cliente, o fornecimento de produto gasoso por gasoduto resume-se apenas a 7600 Nm³/h de oxigênio, não sendo mais necessário fornecer nitrogênio gasoso. Da mesma forma, a demanda do mercado de líquidos do Centro-Oeste por nitrogênio é menor do que quando comparada ao do Sudeste (7,5 m³/h). Em compensação, as demandas de oxigênio e argônio líquido mantiveram-se as mesmas.

À vista disso, o cenário TURNDOWN foi projetado para reduzir produção de GOX e, de tabela, atender à demanda de LOX, LIN e LAR, mantendo purezas acima das requeridas. A simulação deste cenário será definida por meio de modificações das condições operacionais do caso DESIGN.

Com base nos resultados das três análises de sensibilidade paramétricas do caso DESIGN, a vazão de ar foi a variável que mais influenciou a vazão de GOX. Dito isso, esse será o parâmetro principal a ser alterado para uma obtenção próxima e acima dos 7600 Nm³/h de LOX. Os parâmetros de razão de refluxo da coluna HP e a vazão de *shelf* alimentada na coluna LP serão também alterados para ajustes mais finos.

Em primeiro instante, a meta é atingir os novos requerimentos realizando estimativas grosseiras dos parâmetros supracitados, uma vez que os ajustes mais finos das condições operacionais serão feitos a partir da etapa de análise de sensibilidade paramétrica.

Como o compressor de ar (ou MAC) é o principal equipamento que define a quantidade de ar a ser descarregada nas colunas de destilação. Portanto, nessa análise, a

máxima vazão será limitada pelo valor equivalente a 100% da capacidade do MAC e a mínima vazão será definida pelo valor de Turndown igual a 32,6%, ou seja, uma vazão que representa 67,4% da capacidade do MAC. Como existem duas correntes de ar que alimentam as colunas (AGE0590A e AGP2590A), independente da variação na vazão total, a divisão feita entre elas seguiu a divisão real da planta existente, sendo 61,89% da vazão total para AGE0590A e 38,11% para AGP2590A).

É válido adicionar que nenhuma configuração física de coluna foi alterada. Como o estudo de caso trata da transferência de uma planta de separação criogênica do ar existente, o número de pratos, a quantidade e o arranjo dos passes dos trocadores de calor, o número de correntes laterais das colunas, a perda de carga dos equipamentos, tudo isso será mantido. Apenas os parâmetros operacionais foram sujeitos às alterações.

Concomitantemente ao cálculo da nova vazão de alimentação de ar nessa planta, foram realizadas as análises de sensibilidade do cenário TURNDOWN. Todas as análises de sensibilidade foram simuladas no software UNISIM e registradas no *Excel*.

4 RESULTADOS

4.1 CASO DESIGN

4.1.1 Simulação

Com a convergência da planta ASU no UNISIM, todos os dados das correntes de processo foram calculados. O primeiro passo na análise desta simulação é a verificação dos resultados com o projeto original, de modo a descobrir o quão acurado é o modelo construído. No Apêndice A, encontra-se uma tabela contendo os dados de processo das correntes resultantes da simulação do cenário DESIGN.

Através da comparação entre as vazões de produto reais e as obtidas na simulação, observa-se uma grande proximidade entre os valores obtidos e os do cenário existente. Em todos os casos, os erros relativos das vazões foram inferiores a 1%. Portanto, a planta de separação criogênica do cenário DESIGN representa de forma acurada a ASU existente antes de sua transferência de Minas Gerais para Mato Grosso do Sul, servindo como uma simulação base confiável para estudo das análises de sensibilidade paramétrica.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam a comparação das vazões e das purezas dos produtos obtidas com as informações reais da planta antes da transferência de local.

Tabela 4.1– Comparação entre as vazões dos produtos e seus erros relativos e absolutos

Produto	Corrente	Vazão (Real)	Vazão (DESIGN)	Erro relativo	Erro absoluto
GOX	XG0100A	10851 Nm ³ /h	10780 Nm ³ /h	0,65%	71
LOX	XL0316C	5250 Nm ³ /h	5262 Nm ³ /h	0,23%	12
GAN	NGT0100A	15422 Nm ³ /h	15555 Nm ³ /h	0,86%	101
LIN	NL0100B	5228 Nm ³ /h	5262 Nm ³ /h	0,65%	34
LAR	RL0350A	505,1 Nm ³ /h	509,7 Nm ³ /h	0,91%	4.6

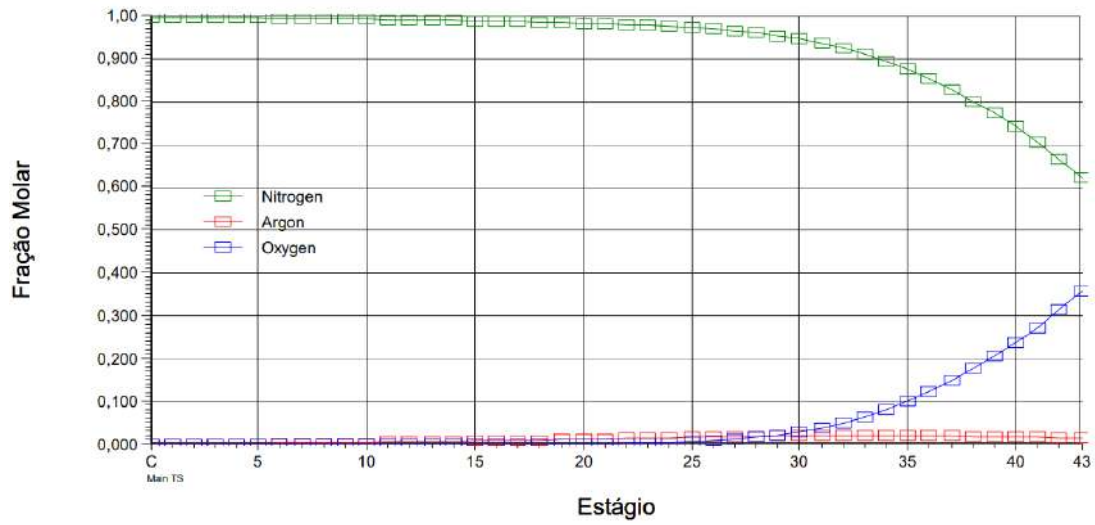
Tabela 4.2 – Comparação entre as purezas dos produtos e seus erros relativos e absolutos

Produto	Corrente	Pureza (Real)	Pureza (DESIGN)	Erro relativo
GOX	XG0100A	99,71%	99,695%	0,015%
LOX	XL0316C	99,71%	99,695%	0,015%
GAN	NGT0100A	99,97%	99,979%	0,009%
LIN	NL0100B	99,97%	99,952%	0,018%
LAR	RL0350A	99,9998%	99,9998%	0,0000%

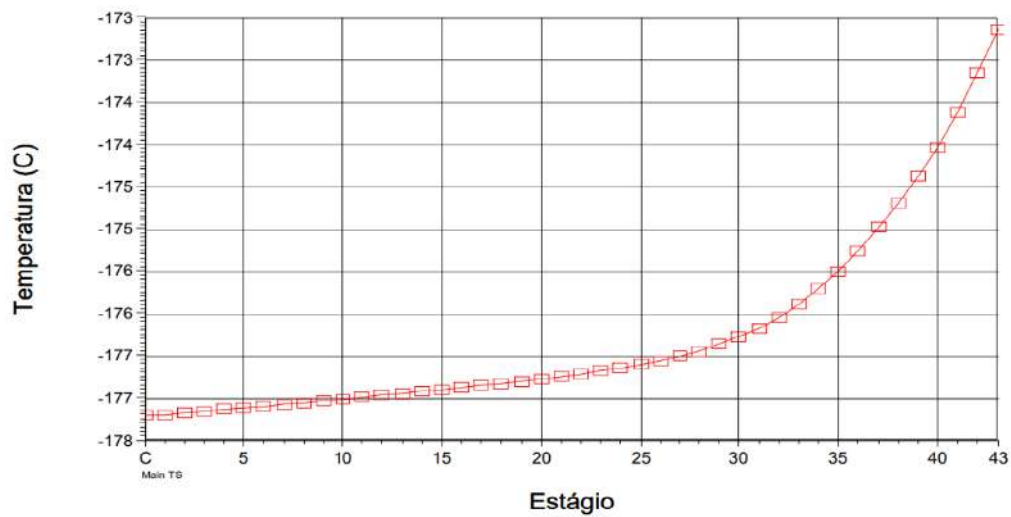
Nas Figuras de 4.1 a 4.6, são apresentados os perfis de temperatura e de composição ao longo dos estágios das três colunas após convergência da simulação. De acordo com o gráfico da Figura 4.1, nota-se que na carga destilada do topo é obtido nitrogênio gasoso (LIN) na especificação requerida, acima do valor de 99,95% do cliente, enquanto no fundo obtém-se um líquido enriquecido de oxigênio (*kettle*) com cerca de 35,894% de O₂ e 62,54% de N₂ como esperado. No Apêndice B, encontra-se os perfis de composição apenas do argônio.

Conclui-se que as especificações da torre, como o número de pratos da coluna, os estágios de alimentação, a pressão da coluna e os parâmetros das correntes de alimentação permitiram, na simulação, a obtenção de nitrogênio de uma pureza muito próxima à real.

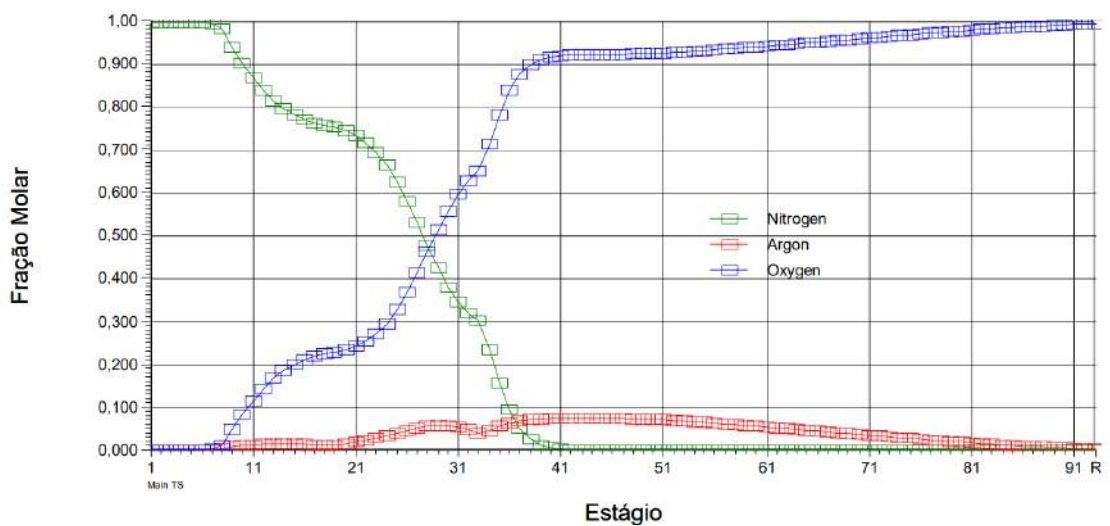
Figuras 4.1 – Composição da fase líquida *versus* N° do estágio da coluna HP



Figuras 4.2 – Temperatura *versus* N° do estágio da coluna HP



Figuras 4.3 – Composição da fase líquida *versus* N° do estágio da coluna LP



Da mesma forma, na Figura 4.3 é possível observar a obtenção tanto de nitrogênio gasoso puro (GAN) no topo da coluna LP como de oxigênio líquido puro (LOX) no fundo da coluna. Os valores de erro relativo da Tabela 4.1 mostram o quão próximo são as purezas calculadas em comparação às reais.

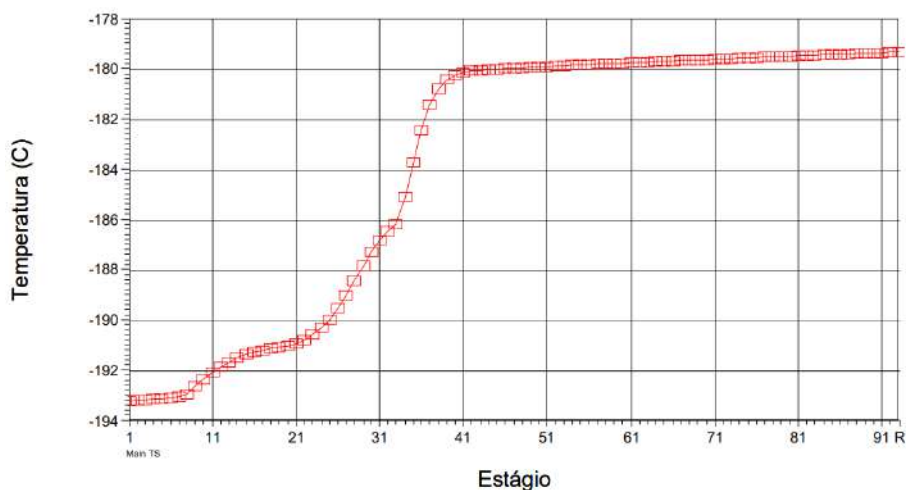
Nota-se que as especificações definidas da torre LP, levando em consideração o número de pratos da coluna, os estágios de alimentação e as características das cargas de alimentação na coluna permitiram a obtenção de LOX e GAN de alta pureza com respectivamente 99,695% e 99,979% em termos de porcentagem molar.

Comparando as Figuras 4.2 e 4.4, observa-se que o topo da coluna HP é mais quente que o fundo da coluna LP onde fica a piscina de oxigênio líquido. Na simulação, o *Main Condenser* não é representado, no entanto, é essencial que o destilado N_2 *shelf* seja quente o suficiente para ceder calor à piscina de O_2 , servindo tanto como um refeedor da coluna LP quanto como um condensador da coluna HP, idêntico ao funcionamento da planta existente. Na Tabela 4.3, mostra-se os valores de temperatura no topo da coluna HP e no fundo da coluna LP. Além disso, as temperaturas obtidas no topo (-193,2°C) e no fundo (-179,3°C) da coluna LP são essenciais não apenas para uma destilação eficiente dos componentes, mas também para resfriar, no MHE, as correntes de alimentação ar.

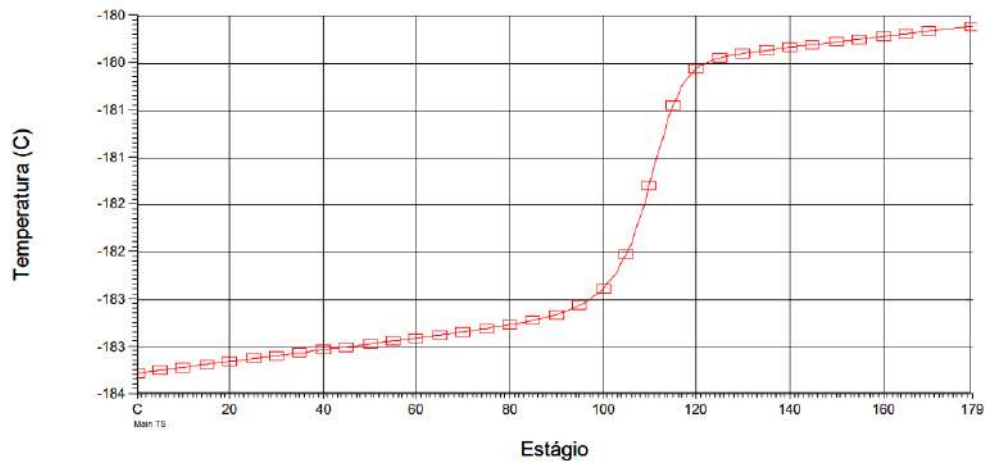
Tabela 4.3 – Temperaturas da coluna HP e da coluna LP

Coluna	Estágio	Temperatura
HP	1° Estágio	-177,7 °C
HP	43° Estágio	-173,1 °C
LP	1° Estágio	-193,2 °C
LP	92° Estágio	-179,3 °C

Figuras 4.4 – Temperatura versus N° do estágio da coluna LP

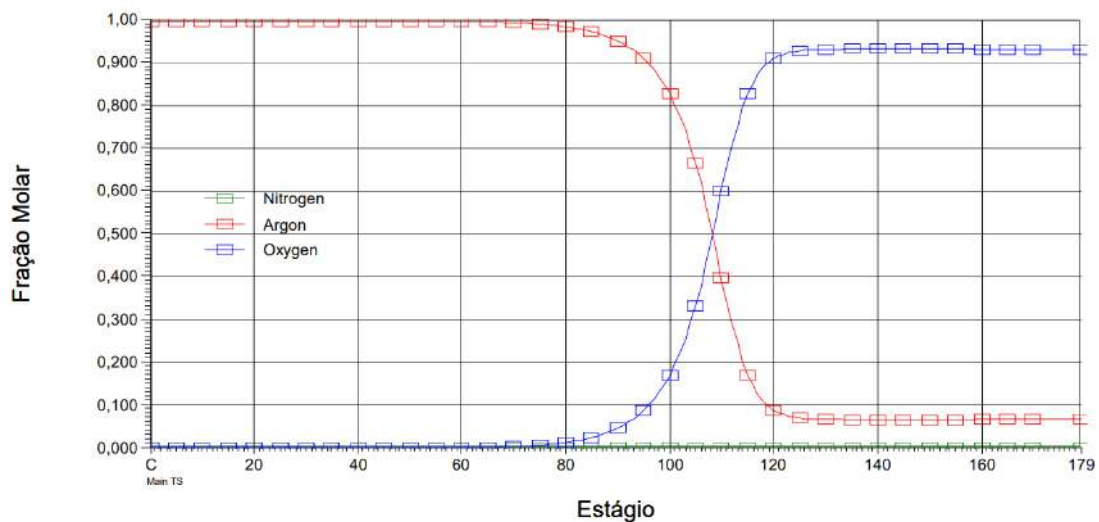


Figuras 4.5 – Temperatura versus N° do estágio da coluna de argônio



Por fim, observa-se que as especificações definidas da coluna superestagiada de argônio, levando em consideração o número de pratos da coluna, os estágios de alimentação, a pressão da coluna e as características das cargas de alimentação na coluna permitiram a obtenção de LAR com pureza de 99,9998% em termos de porcentagem molar.

Figuras 4.6 – Composição da fase líquida versus N° do estágio da coluna de argônio



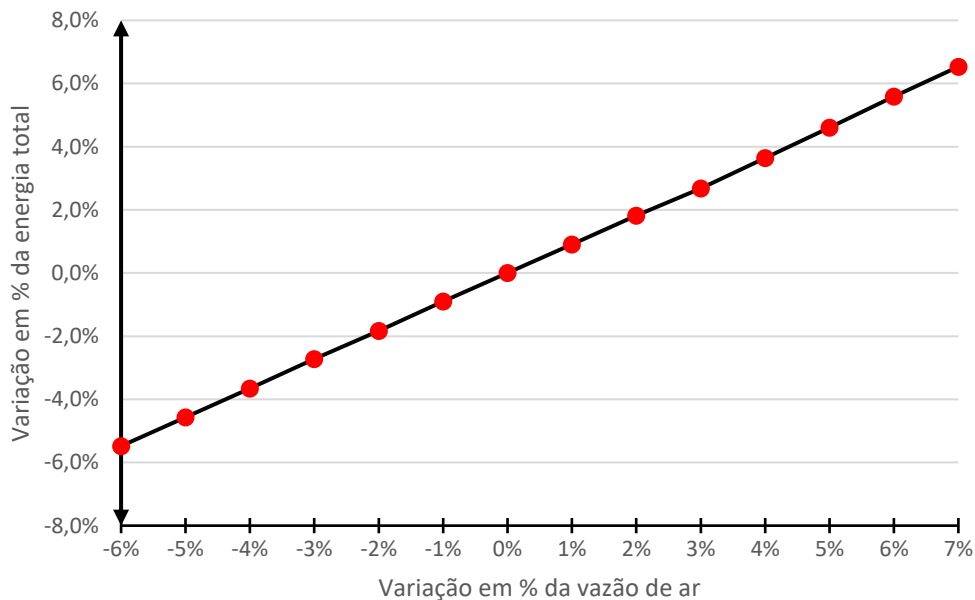
Analisando os resultados da simulação da planta existente, conclui-se que a mesma representa de forma satisfatória o processo de separação dos gases atmosféricos. Nela, foi possível não apenas observar todas as etapas da Seção Fria, como também avaliar as composições das correntes intermediárias assim como as composições do produto final, fornecendo uma ampla visão da unidade antes da transferência.

4.1.2 Análise de sensibilidade paramétrica

Com o objetivo de avaliar o efeito de alguns parâmetros operacionais e do projeto de separação criogênica de destilação, foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica a partir da variação da vazão de alimentação de ar, da razão de refluxo e da alimentação de N_2 *shelf* para a coluna LP.

Conforme esperado, quanto maior a vazão de alimentação de ar nas colunas, maior o consumo de energia da planta. Considerando-se uma variação de vazão de -6,0%, que equivale ao menor valor que o MAC pode operar sem entrar em *surge*, obteve-se uma redução de 5,29% do consumo da energia total da planta, traduzindo-se na quantidade absoluta de 1121 kW e diminuição de 5,75% do consumo total de água, isto é, de 92,2 m³/h. Na Figura 4.7 e 4.8 são visualizados os comportamentos lineares dos consumos de energia e de água de resfriamento da planta.

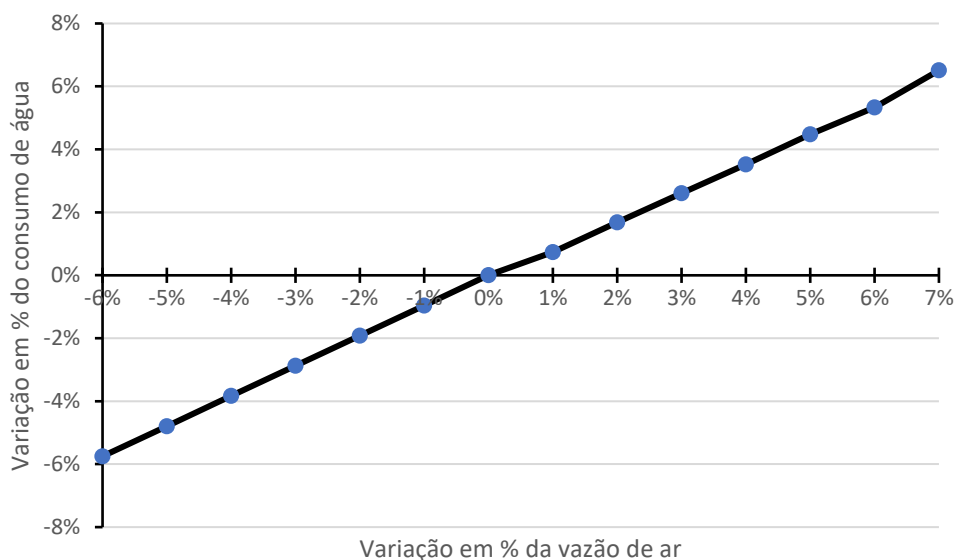
Figura 4.7 – Variação percentual de energia total consumida versus variação percentual da vazão de ar - DESIGN



É observado que a alteração na vazão de ar e a quantidade de todos os produtos são diretamente proporcionais, conforme observa-se no Apêndice C. Também, visualiza-se que em todos os casos simulados, a demanda mínima de LIN e as purezas dos produtos especificados pelo cliente são cumpridas. Entretanto, para a variação de vazão de -6,0%, o valor produzido de GOX foi de 9651 Nm³/h, não atendendo a demanda mínima do antigo

cliente. A menor variação de vazão de ar que poderia ser utilizada, respeitando a vazão contratual de 10000 Nm³/h, seria de -4,0%, o qual resulta na produção de 10054 Nm³/h.

Figura 4.8 –Variação percentual de água consumida versus variação percentual da vazão de ar - DESIGN



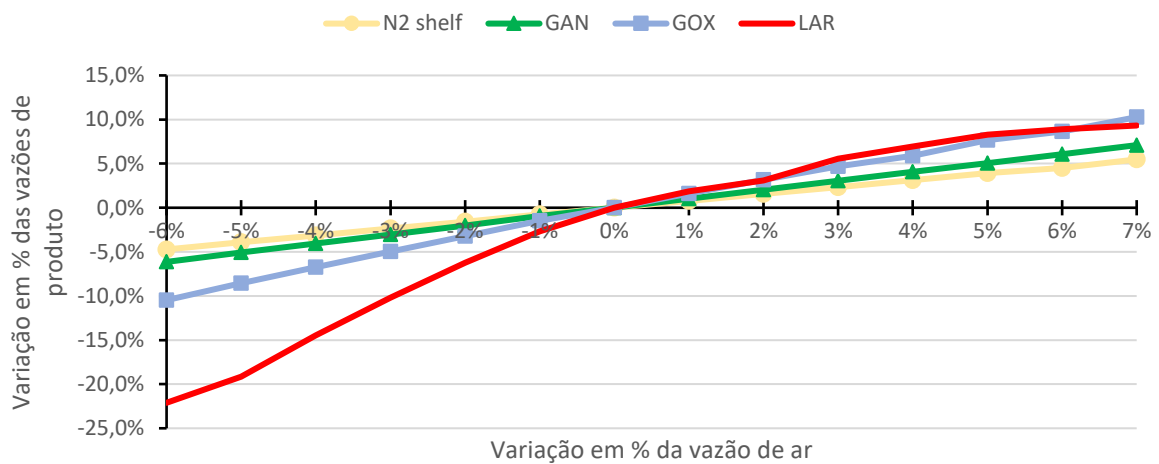
Portanto, considerando os antigos requerimentos do cliente, uma abordagem que implicaria em uma redução de -4,0% na vazão de ar garantiria tanto a produção de 14923 Nm³/h de GAN e 10054 Nm³/h de GOX como as purezas respectivas de 99,971% e de 99,824%. Além disso, o consumo de energia e de água diminuiria de 21191 kW e de 1603,9 m³/h para 20443 kW e 1542,4 m³/h, respectivamente.

No contexto de sensibilidade paramétrica, observa-se que as vazões dos produtos LAR e GOX são os mais suscetíveis às variações na vazão de ar. A diminuição na carga de ar atmosférico nas colunas HP e LP retira uma massa de oxigênio e argônio, que, embora não seja muito elevada em comparação ao nitrogênio, impede a manutenção da vazão original dos produtos. Não obstante, a diminuição de matéria-prima nas colunas também afetou as vazões de GAN e *shelf*, em menor grau.

Como evidenciado nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, não foi possível variar o fluxo volumétrico de ar abaixo dos -6%. Isso se deu pela não convergência da planta, motivada por um fluxo negativo na corrente KL0300D. Mais especificamente, uma das especificações da coluna LP é a vazão da corrente de saída lateral RG0310A, logo, depara-se com uma coluna de argônio mantendo sua vazão de alimentação apesar da queda de fluxo de ar na planta.

Conseqüentemente, o condensador do argônio ainda requer a mesma vazão da corrente KL0300C para suprir a carga térmica demandada e continuar condensando a mesma vazão de LAR. Entretanto, quando se diminui a carga de matéria-prima na planta a menos de -6%, reduz-se a carga total de *kettle* a ponto de não ser o suficiente para fornecer a carga térmica necessária do condensador de argônio. O UNISIM, respeitando as especificações, força-se a fornecer a vazão necessária na corrente KL0300C, resultando numa vazão negativa na corrente KL0300D.

Figura 4.9 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da vazão de ar – DESIGN

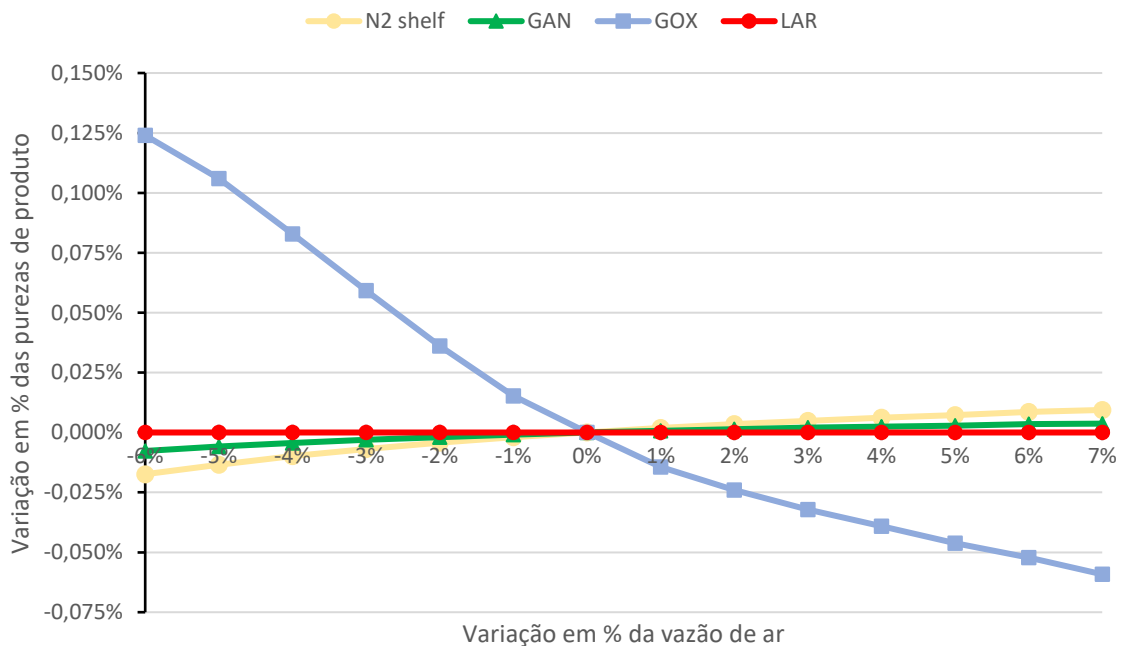


O produto GOX é o mais influenciado em relação às variações da vazão de ar. A produção de oxigênio no fundo da coluna LP é diretamente influenciada pela quantidade de refluxo (NL0100D) e de *kettle* que adentram na coluna LP. Com a queda da vazão de ar, tanto a vazão de *kettle* quanto de refluxo diminuem. A Figura 4.10 destaca que a variação da vazão de ar tem um impacto pouco significativo na pureza dos produtos, sendo a corrente de oxigênio a mais afetada.

Contrária à tendência de produção de nitrogênio e argônio, a pureza do oxigênio aumenta com a redução da vazão de ar, alcançando uma variação máxima de 0,124%, resultando em uma pureza de O₂ de 99,824%. Uma quantidade de massa de ar menor entrando nas colunas facilita o processo da destilação criogênica, uma vez que a torre foi projetada para atingir uma pureza de 99,7% mesmo trabalhando com uma vazão maior de 79250 Nm³/h, isto é, 5548 Nm³/h a mais que a vazão mínima considerada. Conforme mencionado anteriormente, a vazão da corrente NL0100D, que atua como refluxo da coluna

LP, diminui, resultando em uma redução de moléculas de nitrogênio na coluna, contribuindo para uma obtenção de oxigênio líquido mais puro (LOX e GOX).

Figura 4.10 – Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da vazão de ar - DESIGN



Em resumo, quando reduzida a vazão de ar, é possível diminuir o consumo de energia e de água de resfriamento da planta, mantendo a produção mínima de GOX, LOX, GAN e LIN. Os resultados absolutos referentes aos consumos, vazões e purezas encontram-se nos Apêndices C e D.

A razão de refluxo (RR) da coluna HP é uma das variáveis que mais impactou nas vazões de produto. Quanto às correntes de nitrogênio produto, a diminuição da RR desencadeia um efeito cascata no processo. Essa redução permite maior fluxo de nitrogênio *shelf* da coluna HP para a LP, providenciando maior quantidade de moléculas de N₂ na coluna superior, o que alavanca a produção de GAN.

No caso do GOX, sua curva na Figura 4.11 evidencia um ponto ótimo de vazão quando a variação da razão de refluxo chega a -16%. Diante de qualquer outra variação calculada de RR, a vazão de GOX decai. Neste sentido, o comportamento da curva do LAR também evidencia um ponto ótimo de vazão, mas apenas quando a variação da razão de refluxo chega a 8%. Antes e depois desse valor, a vazão de argônio diminuiu.

Conforme esperado, obteve-se uma retirada maior de subproduto *kettle* da coluna inferior à medida que a razão de refluxo da coluna HP diminuía, e vice-versa.

Figura 4.11 – Variação percentual da vazão de *kettle* e produtos versus variação percentual da razão de refluxo - DESIGN

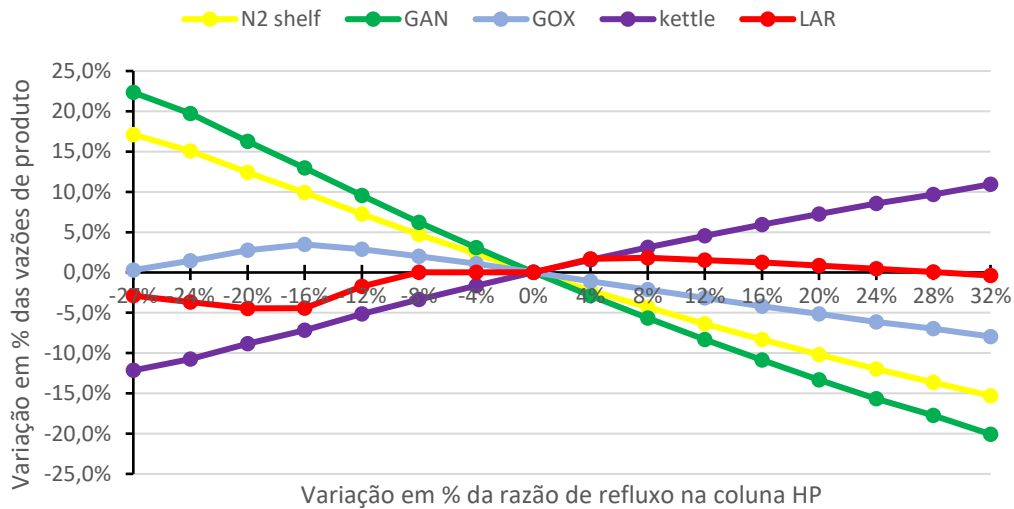
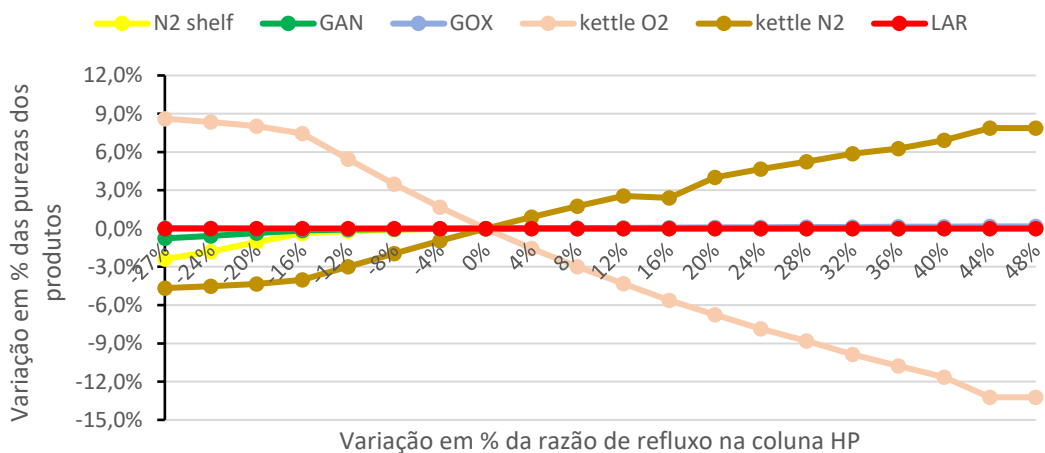


Figura 4.12 – Variação percentual da pureza de *kettle* e produtos versus variação percentual da razão de refluxo - DESIGN



Nessa análise, para a convergência da simulação, a variação mínima de RR foi limitada ao valor percentual de -27%, ou seja, um valor absoluto de 0,95. O motivo disso é o mesmo usado para justificar o limite de variação mínima na análise da vazão do ar. A manutenção das especificações quanto à vazão e pureza da corrente RG0310A em conjunto com a diminuição da produção de *kettle*, provoca um fluxo negativo na corrente KL0300D para garantir a demanda energética do condensador de argônio.

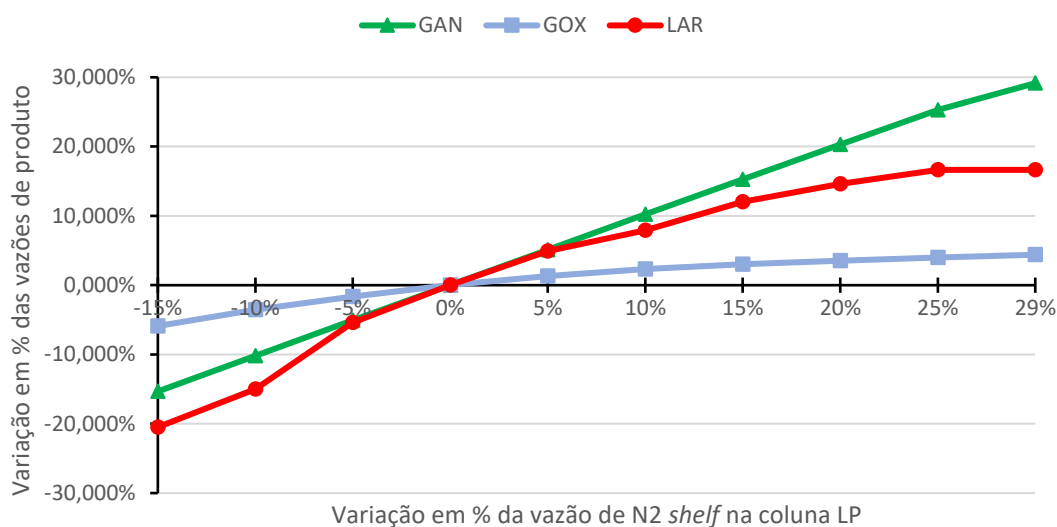
Em relação à pureza, o impacto é pequeno nas correntes N_2 shelf, GAN e GOX. Observa-se uma maior diferença apenas quando a variação é menor de -16%, ou seja, menor

que uma razão de refluxo de 1,092. O que permite inferir que elevar a RR da coluna HP a um valor maior que 1,092 não altera significativamente a pureza desses produtos.

Por outro lado, aumentar a razão de refluxo é elevar a quantidade de nitrogênio puro sendo alimentado na coluna inferior, refletindo no aumento da concentração de nitrogênio e na diminuição de oxigênio na corrente de fundo (*kettle*).

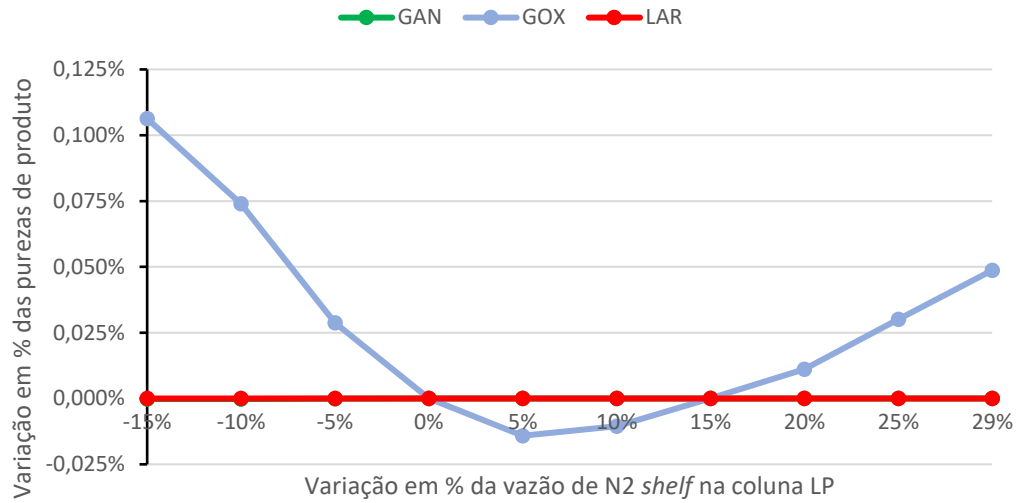
Por fim, a variação mínima que satisfaz os requerimentos do cliente é na faixa do -4%. Em relação às vazões, poder-se-ia abaixar a RR até o valor de 0,95, obtendo vazões suficientes de 19030 Nm³/h e 10814 Nm³/h de GAN e de GOX, respectivamente. Entretanto, ao considerar uma variação de -8%, a pureza do nitrogênio equivale a cerca de 99,93%, valor abaixo dos 99,95% requerido pelo cliente antigo.

Figura 4.13 – Variação percentual da vazão de produtos versus variação percentual da vazão de N₂ shelf - DESIGN



Na análise da N₂ shelf, as vazões de GAN, GOX e LAR apresentaram comportamentos diretamente proporcionais às variações da vazão de shelf. Quando a variação percentual do N₂ shelf é positiva, a vazão de GAN é a mais sensível entre os três produtos. Agora, quando a variação é negativa, o LAR é o produto que mais sofre influência diante das perturbações na vazão de nitrogênio líquido na coluna LP. Em ambos os casos, o GOX é o menos sensível às variações. Na Figura 4.13, são observados estes comportamentos.

Figura 4.14 - Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da vazão de N₂ *shelf* - DESIGN



Apesar da análise ter sido realizada com variações percentuais negativas de até -15% para fins de estudo, não é possível considerar uma vazão menor do que -5% para a simulação DESIGN. A diminuição excessiva da alimentação de N₂ *shelf* na coluna LP provoca uma redução na vazão de GAN, nitrogênio *waste* e GOX de modo que a troca de calor entre essas correntes frias e as correntes quentes (AGE0590A e AGP2590A) não obedeça a Segunda Lei da Termodinâmica. Como as temperaturas de saída das correntes quentes são especificadas, isto é, fixas, o UNISIM calcula as temperaturas de saída das correntes frias baseado na carga térmica de cada corrente, que é definida pela vazão mássica disponível. Dito isso, quando a variação da vazão de N₂ *shelf* é inferior a -5%, a temperatura de saída das correntes frias é maior que a temperatura de entrada da corrente quente, o que é impossível de ocorrer no mundo real.

Quanto à pureza dos produtos, o LAR e o GAN não sofrem influência. No caso do argônio, assim como nas outras duas análises, a composição molar de N₂ e O₂ na corrente de argônio líquido produto são especificadas na coluna superestagiada de argônio, logo não são influenciadas pelas perturbações.

Todavia, a partir do comportamento da curva de GOX, a menor pureza de oxigênio ocorre com uma variação de 5,0%, equivalente a uma vazão de 19213 Nm³/h. Acima ou abaixo dessa variação, a pureza de GOX começa a elevar.

Diante dos antigos requisitos do cliente a respeito da vazão de fornecimento de GAN e LIN, isto é, 8000 Nm³/h e 4839 Nm³/h, respectivamente, é possível realizar todas as variações

positivas e negativas analisadas na corrente de alimentação de N₂ *shelf* (NL0100D) garantindo a produção e as purezas necessárias para o antigo cliente.

4.2 CASO TURNDOWN

4.2.1 Simulação

Com base na simulação anterior do caso DESIGN, fez-se as mudanças necessárias para atender os novos requisitos após a transferência da planta. A Tabela 4.4 mostra quais foram os parâmetros modificados no cenário TURNDOWN. Se alguma das variáveis não estiver listada, é porque ela não foi alterada.

Tabela 4.4 – Especificações particulares do cenário TURNDOWN

Vazão de ar total	61000 Nm ³ /h
Temperatura da AGE0100A	-77,0 °C
Temperatura da AL0100A	-180,0 °C
Vazão da AL0100D	2000 Nm ³ /h
Vazão de NL0100B	1936 Nm ³ /h
Pressão do topo na coluna HP	0,2471 barg
Pressão do fundo na coluna HP	0,3512 barg
Vazão de saída da RG0310A	10000 Nm ³ /h
Vazão da AG0100B (WRT)	4000 Nm ³ /h
Vazão de XL0316C	4781 Nm ³ /h

O primeiro passo foi a redução na vazão de ar. Essa escolha da vazão de ar de alimentação como primeiro parâmetro a ser alterado se deu pelo impacto que possui no consumo de energia total da planta. Conforme visto no caso anterior, o consumo de energia e de água de resfriamento são diretamente proporcionais à vazão de ar, portanto o objetivo é minimizar o quanto possível a carga de alimentação das colunas. Essa redução na alimentação

também implica na redução da vazão do produto oxigênio gasoso que é uma das nossas metas. Da vazão anterior de 79250 Nm³/h alterou-se para 61000 Nm³/h.

Com uma carga de ar reduzida, ocorre cruzamento de temperatura entre as correntes frias e quentes do MHE. As temperaturas especificadas na saída das correntes de ar demandam uma troca térmica na seção MHE-WL, a qual as correntes frias não conseguem exercer sem que a temperatura de saída das correntes frias seja superior à das correntes quentes, violando assim a Segunda Lei da Termodinâmica. Por este motivo, as temperaturas das correntes AL0100A e AGE0100A foram alteradas.

Redirecionou-se a maior parte da corrente de ar líquido para a coluna HP, isto é, reduziu a vazão da corrente AL0100D para 2000 Nm³/h. Veremos adiante que a redução dessa corrente diminui a quantidade e eleva a pureza de oxigênio líquido produzido.

A pressão da coluna LP foi diminuída para tornar as correntes de topo e de fundo mais frias, auxiliando na troca térmica do MHE e prevenindo cruzamento de temperatura entre as correntes frias e quentes.

Também, foi necessário elevar a vazão da corrente RG0310A, acarretando na elevação da pureza e na diminuição da vazão de oxigênio líquido da coluna LP. As vazões dos produtos LOX e LIN foram especificadas com os valores exatos exigidos pelo novo mercado de líquidos da região. Finalizadas essas alterações, construiu-se a Tabela 4.5 com as vazões e as purezas dos produtos GOX, LOX, LIN e LAR do cenário TURNDOWN.

Tabela 4.5 – Resultados do cenário TURNDOWN

Produto	Vazão (Cliente)	Vazão (TURNDOWN)	Pureza (Cliente)	Pureza (TURNDOWN)
GOX	7600 Nm ³ /h	7636 Nm³/h	95,0 %	99,76 %
LOX	6,0 m ³ /h	6,0 m³/h	99,5%	99,76%
LIN	3,0 m ³ /h	3,0 m³/h	99,95%	99,971%
LAR	0,5 m ³ /h	0,5 m³/h	99,999%	99,9991%

Com a nova menor carga térmica requerida pelas correntes quentes do MHE, possibilitou um descarregamento dos compressores no sistema de refrigeração do WRT. Passou-se a comprimir apenas 4000 Nm³/h de ar, ao invés de 12480 Nm³/h. Além disso, a pressão de trabalho antes de chegar à turbina é de 8,889 barg, enquanto no caso DESIGN a

pressão chegava a 38,46 barg. Por isso, visualiza-se como a diminuição da vazão de ar impactou também no consumo elétrico do sistema WRT.

Não obstante, vemos o impacto da vazão de ar no consumo de energia elétrica do MAC, da BRIM A e do WRT. A redução da vazão de ar para 61000 Nm³/h representou uma economia de **4057 kW** em toda a planta existente.

Tabela 4.6 – Consumo de energia DESIGN versus TURNDOWN

Cenário	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
DESIGN	8894 kW	4800 kW	1324 kW	15018 kW
TURNDOWN	6846 kW	3694 kW	421 kW	10961 kW

Do mesmo modo, a redução da vazão também influenciou o consumo de água de resfriamento por parte dos trocadores de calor inter-resfriadores dos sistemas de compressão. Obteve-se uma economia de **426,16 m³/h** de água.

Tabela 4.7 – Consumo de água de resfriamento DESIGN versus TURNDOWN

Cenário	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
DESIGN	941,1 m ³ /h	551,2 m ³ /h	120,5 m ³ /h	1612,8 m³/h
TURNDOWN	724,3 m ³ /h	422,2 m ³ /h	40,1 m ³ /h	1186,6 m³/h

Diante das alterações mencionadas, conclui-se que foi possível a simulação da planta existente em um cenário distinto sem nenhuma alteração física do projeto, apenas ajustando condições operacionais para atender a todos os requisitos do novo cliente. Além disso, obteve-se economia significativa no consumo de energia e de utilidades. No Apêndice I, encontra-se uma tabela contendo os dados de processo das correntes resultantes da simulação do cenário TURNDOWN.

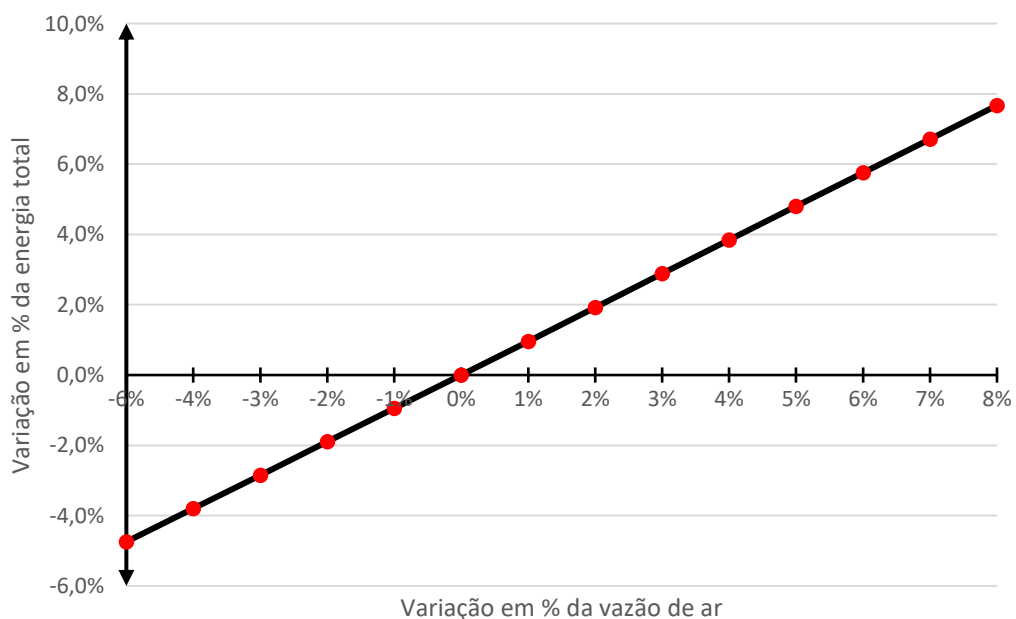
4.2.2 Análise de sensibilidade paramétrica

Após a convergência da planta TURNDOWN, realizou-se uma análise de sensibilidade paramétrica quanto à vazão de alimentação de ar, o refluxo na coluna HP e a vazão de nitrogênio *shelf* na coluna LP dentro de uma certa variação percentual, de modo a verificar a magnitude de resposta das variáveis controladas.

As variáveis controladas de interesse, no cenário TURNDOWN, serão as vazões de GOX e de LAR, e as purezas de GOX, LIN e de LAR. Como o nitrogênio gasoso não é mais demandado pelo novo cliente, não se achou necessária sua análise nem quanto à vazão, nem quanto à pureza do produto GAN.

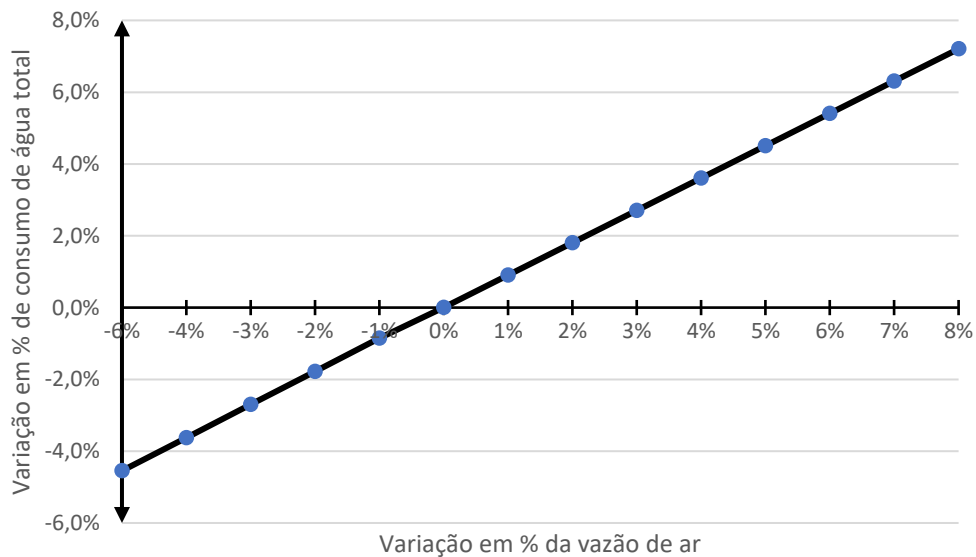
Conforme esperado, quanto menor a vazão de alimentação de ar nas colunas, menor o consumo de energia da planta. Considerando-se uma variação de vazão de -5,61%, que equivale ao menor valor que o MAC pode operar com 100% de eficiência sem entrar em *surge*, obteve-se uma redução de 4,744% do consumo da energia total da planta, traduzindo-se na quantidade absoluta de 520 kW. Da mesma forma, conseguiu-se uma diminuição de 4,55% do consumo total de água, isto é, de 57,6 m³/h. Na Figura 4.15 e 4.16 são visualizados os comportamentos lineares dos consumos de energia e de água de resfriamento da planta que repetem o mesmo comportamento quando comparados ao cenário DESIGN.

Figura 4.15 – Variação percentual de energia total consumida versus variação percentual da vazão de ar - TURNDOWN



É observado que a alteração na vazão de ar e a quantidade de todos os produtos são diretamente proporcionais, conforme observa-se no Apêndice I. Visualiza-se que, em todos os casos de variações negativas, a vazão mínima de GOX e de LAR não é atingida. Por outro lado, a pureza de GOX é mais alta do que a requisitada pelo cliente (99,5%) em todas as variações calculadas. Dado que o objetivo é simultaneamente atender aos requisitos do cliente e minimizar o consumo de energia e água, a vazão de 61.000 Nm³/h representa uma excelente escolha como condição operacional para a planta transferida.

Figura 4.16– Variação percentual de água consumida *versus* variação percentual da vazão de ar - TURNDOWN



No contexto de sensibilidade paramétrica, observa-se que as vazões dos produtos LAR e GOX são os mais suscetíveis às variações na vazão de ar. A diminuição na carga de ar atmosférico nas colunas HP e LP retira uma massa de oxigênio e argônio, que, embora não seja muito elevada em comparação ao nitrogênio, impede a manutenção da vazão original dos produtos. Não obstante, a diminuição da matéria-prima nas colunas também afetou a vazão de N₂ *shelf*, apesar de em menor grau. Na Figura 4.17 é mostrado um gráfico com as respostas das vazões dos produtos frente às variações mássicas de ar.

Em todas as variações calculadas do intervalo de -5,61% a 8% obtiveram-se a convergência da planta no UNISIM. Logo, se não fosse necessário atender os requisitos do novo cliente, seria possível simular outras condições operacionais para a planta e obter resultados válidos.

O produto GOX é o mais influenciado em relação às variações da vazão de ar. A produção de oxigênio no fundo da coluna LP é também diretamente influenciada pela quantidade de refluxo (NL0100D) e de *kettle* que adentram na coluna LP. Com a queda da vazão de ar, tanto a vazão de *kettle* quanto de refluxo diminuem.

Figura 4.17 - Variação percentual da vazão de produtos versus variação percentual da vazão de ar - TURNDOWN

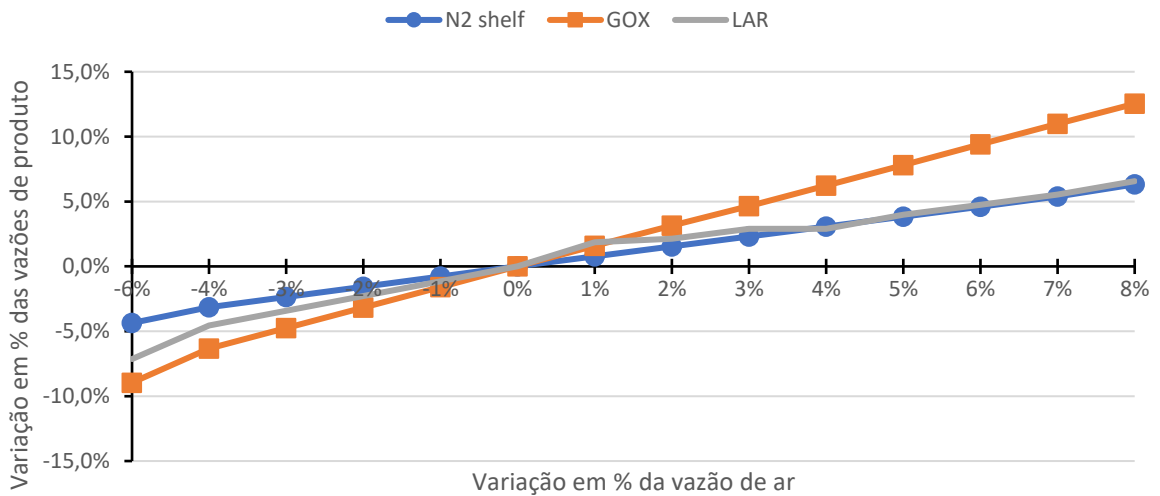
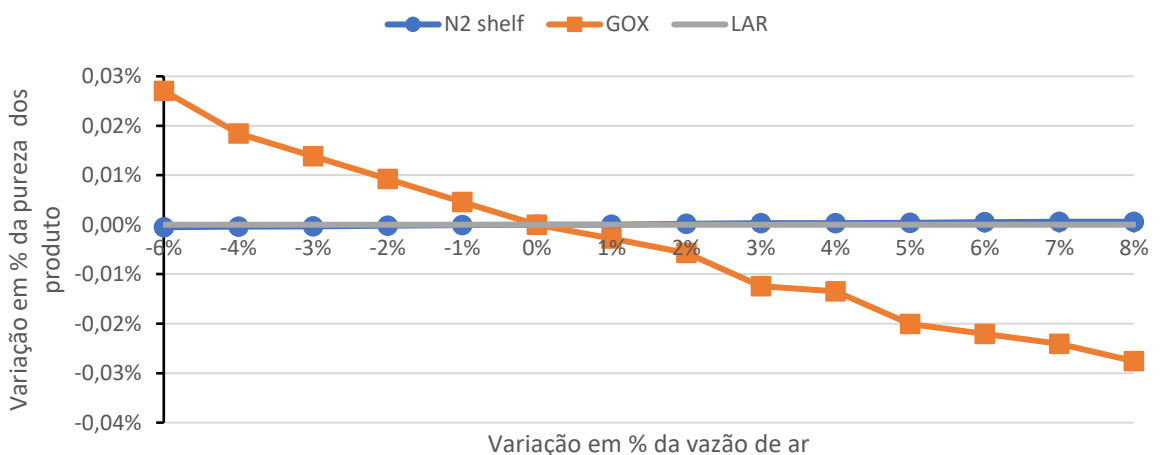


Figura 4.18 –Variação percentual da pureza de produtos versus variação percentual da vazão de ar – TURNDOWN



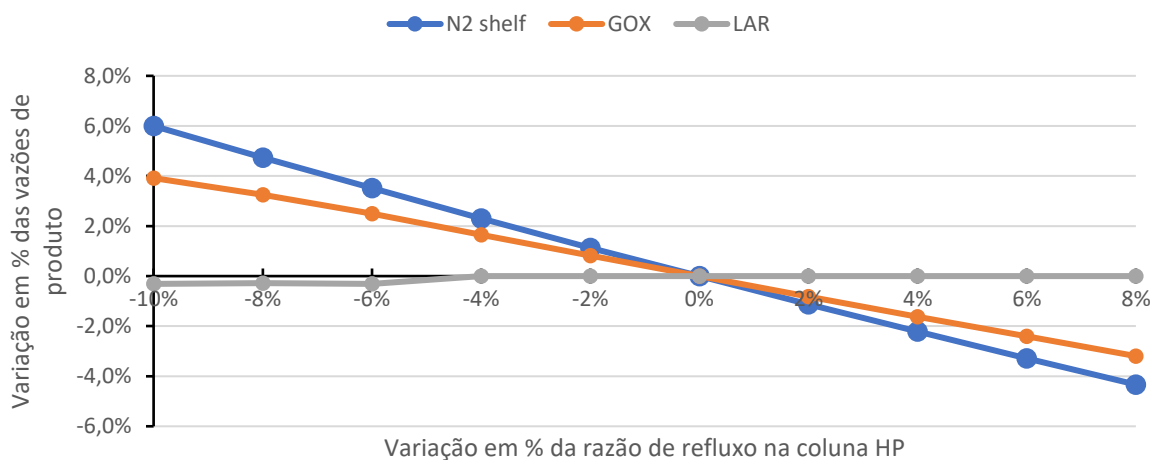
A Figura 4.18 destaca que a variação da vazão de ar tem um impacto pouco significativo na pureza dos produtos, sendo a corrente de oxigênio a mais afetada. A pureza do oxigênio aumenta com a redução da vazão de ar, alcançando uma variação máxima de 0,271%,

resultando em uma pureza de O₂ de 99,787%. Uma quantidade de massa de ar menor entrando nas colunas facilita o processo da destilação criogênica, uma vez que a torre LP, no cenário TURNDOWN, opera para atingir uma pureza de 99,76% mesmo trabalhando com uma vazão maior de 61000 Nm³/h, isto é, 3421 Nm³/h a mais que a vazão mínima considerada. Ainda, conforme mencionado anteriormente, a vazão de N₂ *shelf*, que atua em parte como refluxo da coluna LP, diminui, resultando em uma redução de moléculas de nitrogênio na coluna, contribuindo para uma obtenção de oxigênio líquido mais puro (LOX e GOX).

Em resumo, quando reduzida a vazão de ar, é possível diminuir o consumo de energia e de água de resfriamento da planta, entretanto, não se atinge a produção mínima de GOX e de LAR. Os resultados absolutos referentes aos consumos, vazões e purezas encontram-se nos Apêndices J e K.

Na análise da razão de refluxo da coluna HP, os intervalos de variação definidos foram de -10% a +8%. Diferente da primeira análise realizada no caso DESIGN, o cenário TURNDOWN não possui tanta flexibilidade operacional em relação a RR. Acima de 8%, deparou-se com cruzamento de temperaturas no MHE-WL devido a retirada de moléculas de nitrogênio da coluna LP. As temperaturas de saída especificadas das correntes quentes requerem trocar uma carga térmica muito maior que as correntes frias suportam diante de uma razão de refluxo tão grande.

Figura 4.19 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da razão de refluxo - TURNDOWN



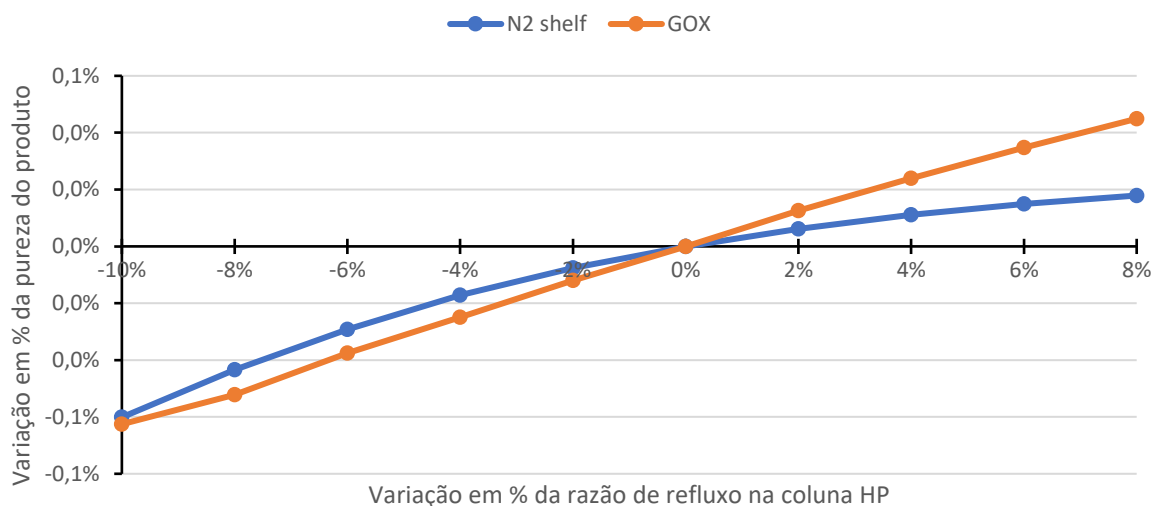
Abaixo de -4%, a vazão de LAR não cumpre o requisito mínimo do cliente. Da mesma forma, quando a variação da RR chega a 2%, a vazão contratual de GOX não é atingida.

Conclui-se que, no cenário TURNDOWN, a variação da razão de refluxo deve ser feita entre 0% a -2%, não oferecendo uma boa flexibilidade operacional.

A Figura 4.19 evidencia o aumento da vazão tanto de GOX como de N_2 *shelf* conforme a razão de refluxo decai. Numa variação positiva, a vazão de LAR mantém-se igual, enquanto que numa variação negativa, abaixo de -8%, a vazão de LAR diminui.

Em relação a pureza, o impacto é sentido nas correntes N_2 *shelf* e GOX. Conforme o aumento na razão de refluxo, maior a pureza adquirida pelos dois produtos. Observa-se que abaixo de -4% de variação na RR, a pureza de LIN cai abaixo da mínima necessária de fornecimento ao mercado de líquidos.

Figura 4.20 – Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da razão de refluxo - TURNDOWN



Na análise da N_2 *shelf*, as vazões de GOX e LAR apresentaram comportamentos diretamente proporcionais às variações da vazão de *shelf*. Apesar da análise ter sido realizada com variações percentuais negativas de até -8% para fins de estudo, não é possível considerar uma vazão menor do que -2% para a simulação TURNDOWN. A diminuição excessiva da alimentação de N_2 *shelf* na coluna LP provoca uma redução na vazão de GAN, nitrogênio *waste* e GOX de modo que a troca de calor entre essas correntes frias e as correntes quentes (AGE0590A e AGP2590A) não obedeça a Segunda Lei da Termodinâmica. Dito isso, quando a variação da vazão de N_2 *shelf* é inferior a -2%, a temperatura de saída das correntes frias é maior que a temperatura de entrada da corrente quente, o que é impossível de ocorrer no mundo real.

Figura 4.21 – Variação percentual da vazão de produtos *versus* variação percentual da vazão de N₂ *shelf* - TURNDOWN

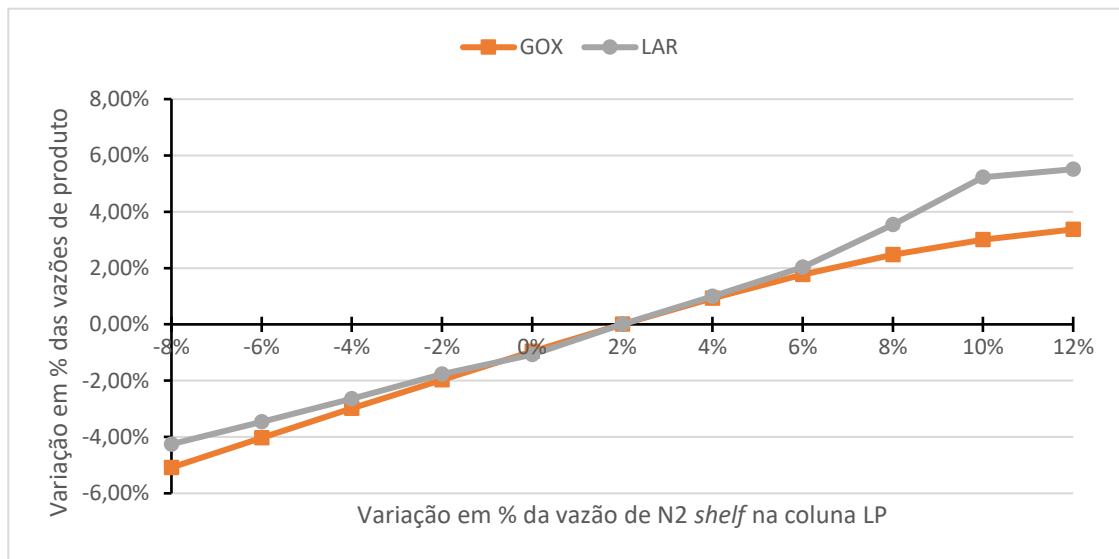
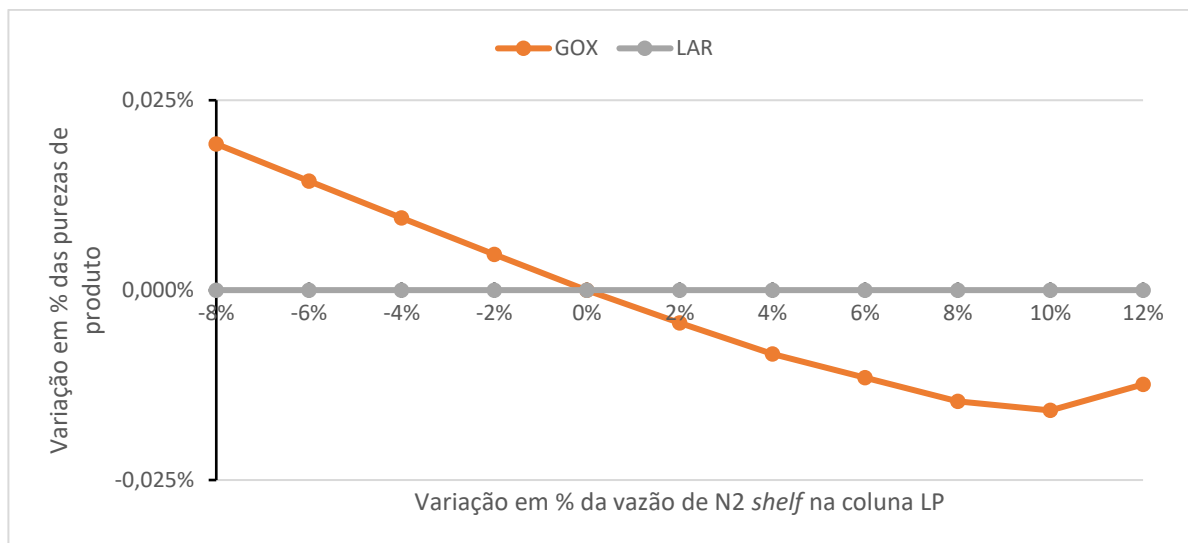


Figura 4.22 - Variação percentual da pureza de produtos *versus* variação percentual da vazão de N₂ *shelf*



Quanto à pureza dos produtos, o LAR não sofre influência. Assim como nas outras duas análises, a composição molar de N₂ e O₂ na corrente de argônio líquido produto são especificadas na coluna superestagiada de argônio, logo não se influenciam por tais perturbações.

Todavia, a partir do comportamento da curva de GOX, a menor pureza de oxigênio ocorre com uma variação de 10,0%, equivalente a uma vazão de 18480 Nm³/h de N₂ *shelf*. Acima ou abaixo dessa variação, a pureza de GOX começa a elevar.

Diante dos novos requisitos do cliente a respeito da vazão de fornecimento de GOX e LIN, isto é, 7600 Nm³/h e 3 m³/h, respectivamente, não foi possível realizar todas as variações positivas e negativas na corrente de alimentação de N₂ *shelf* (NL0100D). Abaixo do valor de -2,0%, a vazão calculada de GOX não atinge a demanda mínima necessária do novo cliente. Em relação ao LAR, pode dizer-se que também não é atingida a vazão necessária de 0,5 m³/h quando a variação de N₂ *shelf* é menor que -2,0%. No entanto, é possível reduzir a corrente de N₂ *shelf* de alimentação da coluna LP para elevar a pureza do oxigênio líquido produto.

Independente dos novos requerimentos contratuais, quando a variação passa de -2,0%, possuímos o mesmo problema enfrentado nas outras análises de sensibilidade, o cruzamento de temperaturas no MHE, especialmente na seção MHE-WL.

Nessas três análises, percebeu-se uma dificuldade em comum de flexibilidade operacional provocada, majoritariamente, pelo risco de cruzamento de temperaturas na seção MHE-WL. Isso se dá por conta do descarregamento dos compressores do sistema WRT para 4000 Nm³/h. Agora, esse sistema que fornece ao MHE uma corrente fria de ar, não consegue ajudar a suprir a carga térmica que é envolvida nesse trocador de calor entre as correntes de alimentação (quentes) e as de produto/subproduto (frias).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou resultados satisfatórios em relação à proposta de simular uma planta de separação criogênica do ar existente em dois cenários distintos de operação, um antes da transferência e um depois. Todos os dados de processo e de equipamentos foram extraídos e inseridos na simulação de forma a tornar o estudo o mais próximo da realidade possível.

O cenário DESIGN, apesar das simplificações realizadas na simulação, a sua representação não foi prejudicada, uma vez que os dados de processo gerados apresentaram uma boa concordância com as vazões e purezas reais dos produtos finais (LOX, GOX, LIN, GAN e LAR). A capacidade de resposta do modelo frente à variação de alguns parâmetros, como vazão de alimentação de ar e razão de refluxo da coluna HP, foi avaliada.

Em resumo, a vazão de ar possui uma relação diretamente proporcional com as vazões de todos os produtos de interesse, apesar de que o GOX é o único produto que tem sua pureza elevada quanto diminuída a vazão de ar total. Ainda, foram obtidas as curvas de tendência linear do consumo de energia elétrica e de consumo de água frente às variações de fluxo de ar na planta.

Excluindo a corrente de *kettle*, as variações da razão de refluxo da coluna HP são inversamente proporcionais às vazões dos produtos GAN, LAR, GOX e LIN. As purezas, por outro lado, não são significativamente impactadas, a ponto de perceber mudanças na pureza do N₂ *shelf* e do GAN somente na variação de -16%. As correntes de *kettle*, apesar de serem subprodutos da planta, são importantes no estudo da concentração de O₂ do líquido enriquecido que entra na coluna LP.

As variáveis manipuladas neste trabalho mostraram não apenas o impacto nas variáveis controladas, mas também como a simulação elaborada possui diversas especificações que dificultam variações mais abrangentes desses três parâmetros manipulados. No fim, descobriu-se que é possível diminuir em -4,0% apenas a vazão total de ar que entra na planta e garantir uma economia de 549 kW de energia elétrica e de 61,5 m³/h de água de resfriamento.

O cenário TURNDOWN foi obtido a partir de alterações nas condições operacionais do caso DESIGN. A nova vazão de ar de 61000 Nm³/h acarretou numa economia na planta existente de 4057 kW de energia elétrica e de 426,16 m³/h de água de resfriamento quando comparada ao modo operacional anterior à transferência. Tudo isso cumprindo os requerimentos mínimos do novo cliente para vazão e pureza do LOX, LAR, LIN e do GOX.

Da mesma forma, foram realizadas três análises de sensibilidade do cenário TURNDOWN. As respostas das vazões de N_2 *shelf*, GOX e LAR frente às variações dos três parâmetros foram registradas e ilustradas. O Turndown do Principal Compressor de Ar como do sistema do WRT foram os fatores predominantes na intransigência operacional dessa planta. Em ambos os cenários, as elaborações das simulações foram obtidas com sucesso a partir do software UNISIM, de modo que produzissem as mínimas vazões e purezas demandadas contratualmente pelo antigo e novo cliente.

A partir dos resultados dessa última simulação, quando bem factíveis, permite-se ao operador e/ou usuário um melhor entendimento e acompanhamento do processo, de forma a atuar sobre suas variáveis de uma maneira muito mais consciente, podendo avaliar previamente os seus efeitos e impactos.

6 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, E.; ALVES, A. M. **Engenharia de Processos de Separação**. 2ª. ed. [S.l.]: Lisboa: IST Press, 2013.

BARALDI, A. **Análise, modelagem e otimização do ciclo de refrigeração de uma unidade de processamento de gás natural**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

BERNSTEIN, J. T. MODERN AIR SEPARATION PLANT TECHNOLOGY CONFERENCE. **Cryogenic argon production**, 1999. Disponível em: <<https://www.cryogenic-consulting.com/argon.pdf>>. Acesso em: 2024 jan. 3.

BOLES, M.; CENGEL, Y. In: _____ **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 5ª. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2006. Cap. 7, p. 366-370.

EBRAHIMI, A.; ZIABASHARHAGH, M. Optimal design and integrations of a cryogenic ASU with Liquefied Natural Gas (LNG) as heat sink, thermodynamic and economic analyses. **Energy**, Tehran, v. 126, p. 868-885, Maio 2017.

EPIEPANG, F. E. et al. Low pressure performance evaluation of CO₂, H₂O and CH₄ on Li-LSX as a superior adsorbent for air prepurification. **Chemical Engineering Science**, 147, 2016. 100-108. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.03.022>>. Acesso em: 2 Janeiro 2024.

FREY, H.; PATIL, S. Identification and review of sensitivity analysis methods. **Risk Anal**, 22 Junho 2002. 553-578.

FURMAN, K. C.; SAHINIDIS, N. V. A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 41, n. 10, p. 2335-2370, Abril 2002.

GASPAR, A. **Física**. 1ª. ed. São Paulo: Ática, v. II, 2001.

HOWARD, H. E.; NOWOBILSKI, J. J.; PRAXAIR TECHNOLOGY, I. **Air prepurification for cryogenic air separation**. 7632337, 2006.

HOWARD, H. E.; PRAXAIR TECHNOLOGY, I. **Cryogenic air separation with warm turbine recycle**. 5758515, 1997.

IVANOVA, S.; LEWIS, R. Air Products. **AIChE**, Junho 2012. Disponível em: <https://microsites.airproducts.com/uk/ggg/pdf/nitrogenviapsa_cep_article.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2023.

JÚNIOR, C. C. F. **Integração Energética da Etapa de Extração de Óleo de Soja, utilizando o Método Pinch**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, p. 94. 2009. (-).

LINDE. **LINDE**, 2013. Disponível em: <https://www.linde-engineering.com/en/images/Air-separation-plants-history-and-technological-progress-2019_tcm19-457349.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2023.

LINDE GROUP. Linde-Engineering. **Air separation plants/ History and technological progress in the course of time**, Pullach, p. 28, 2019. Disponível em: <https://www.linde-engineering.com/en/images/Air-separation-plants-history-and-technological-progress-2019_tcm19-457349.pdf>. Acesso em: 19 Agosto 2023.

LINDE, E. Cryogenic air separation: History and technological progress, 2017. Disponível em: <http://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/AS.B1EN%201113%20-%20%26AA_History_.layout19_4353.pdf?v=6.0>. Acesso em: 20 nov. 2023.

MISRA, S.; KAPADI, M.; GUDI, R.; SRIHARI, R. Production Scheduling of an Air Separation Plant. **IFAC-PapersOnLine**, 49, n. 7, 2016. 675-680.

NOVAZZI, L. F. **Dinâmica e Controle de Redes de Trocadores de Calor**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 127. 2007.

PEREIRA, C. E. M.; ASSAFIN, J. F. M. **Estruturas e Modelos de Negócios no Mercado de Gases Industriais**. Rio de Janeiro - Projeto de Final de Curso : Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014. 74 p.

PERLINGEIRO, C. A. **Engenharia de Processos: Análise, Simulação, Otimização e Síntese de Processos Químicos**. Rio de Janeiro: Blucher, 2005.

PRATA, D. M. **Modelagem e Simulação de Processos Químicos**. Niterói: UFF, 2013.

RAMIREZ, W. F. **Computation Methods for Process Simulation**. 2ª. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

SINNOT, R.; GAVIN, T. Chemical Engineering Design. 148: Elsevier, 2008. Cap. 3, p. 130-140.

SMITH, R. **Chemical Process Design and Integration**. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

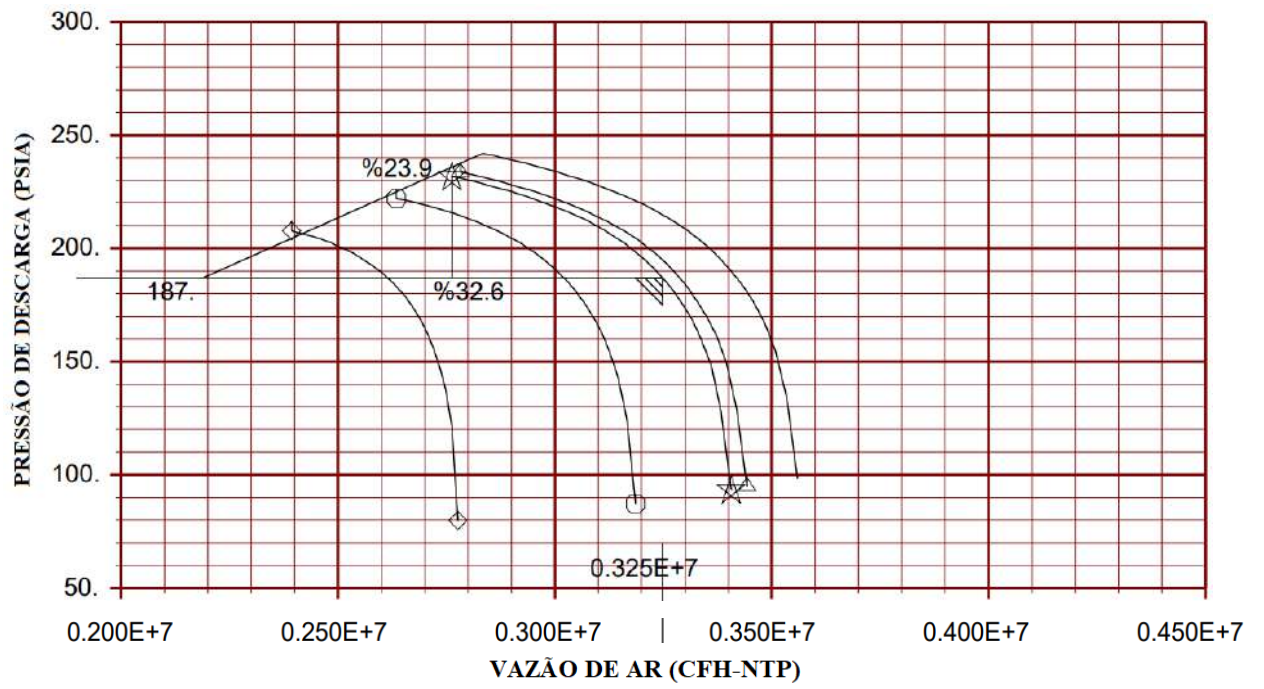
TEIXEIRA, V. B.; PASSOS, I. O. **Avaliação da separação dos gases do ar através do processo híbrido com destilação criogênica e PSA**. Rio de Janeiro - Projeto de Final de Curso: Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

VALÉRIO, G. F. **Análise termodinâmica do ciclo Brayton operando com gases oriundos de um biodigestor**. Trabalho de Conclusão de Curso - Pato Branco: UFTPR, 2019.

WHITE MARTINS. Gases Industriais, 2013. Disponível em: <<https://www.whitemartins.com.br/gases>>. Acesso em: 19 Agosto 2023.

XU, J.; HOPKINS, A. J. **Process to produce oxygen and argon using divided argon column**. US5768914A, 1997.

ANEXO A – Curva do Compressor MAC

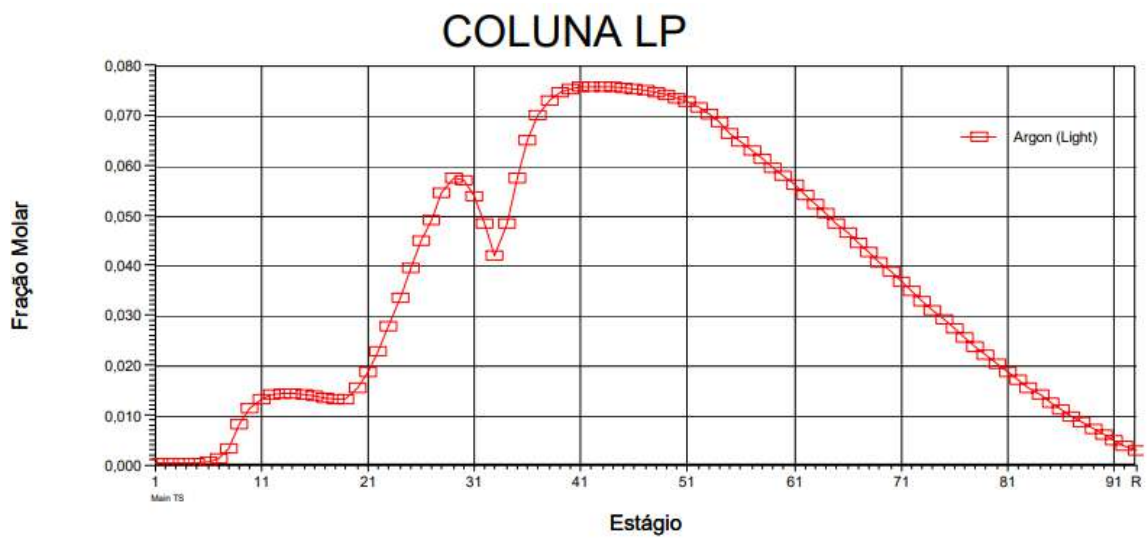
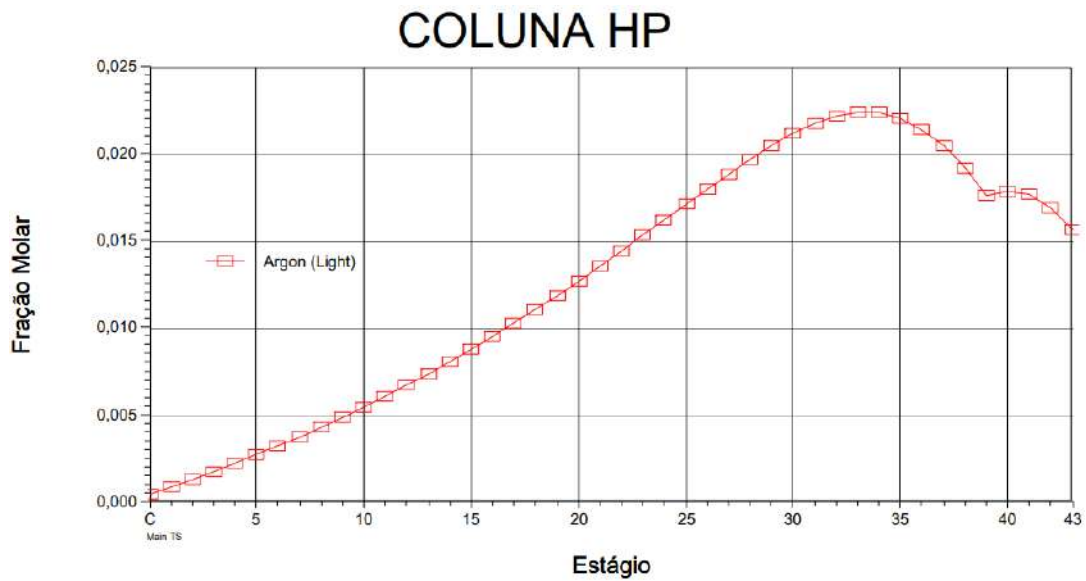


APÊNDICE A – Dados de processo das correntes obtidas na simulação do cenário DESIGN.

NOME	AG0200A	AG0200A-1	AG0220A	AGE0100A	AGE0590A
Fração de Vapor	1	1	1	1	1
Temperatura (°C)	-89.39	-89.39	-166.3	-87.24	38.56
Pressão (bar)	3.879	3.879	4.912	44.24	44.35
Vazão Molar (Nm ³ /h)	12293	11323	49059	49059	49059
Vazão Mássica (kg/h)	15881	15920	63380	63380	63380
Fração Molar – Comp. N ₂	0.781100	0.781100	0.781121	0.781121	0.781121
Fração Molar – Comp. AR	0.009300	0.009300	0.009343	0.009343	0.009343
Fração Molar – Comp. O ₂	0.209600	0.209600	0.209536	0.209536	0.209536
NOME	AGP2590A	AL0100A	AL0100B	AL0100C	AL0100D
Fração de Vapor	1	0	0	0	0
Temperatura (°C)	38.56	-180.0	-180.0	-179.3	-180.0
Pressão (bar)	44.35	44.08	44.08	4.852	44.08
Vazão Molar (Nm ³ /h)	30204	30204	7549	7549	22655
Vazão Mássica (kg/h)	39011	39011	9753	9753	29268
Fração Molar – Comp. N ₂	0.781121	0.781121	0.781121	0.781121	0.781121
Fração Molar – Comp. AR	0.009343	0.009343	0.009343	0.009343	0.009343
Fração Molar – Comp. O ₂	0.209536	0.209536	0.209536	0.209536	0.209536
NOME	AL0100E	KG0345A	KL0300A	KL0300B	KL0300C
Fração de Vapor	0.1252	1	0	0.1653	0.1653
Temperatura (°C)	-191.5	-186.9	-173.1	-189.2	-189.2
Pressão (bar)	0.3388	0.4013	4.875	0.4358	0.4358
Vazão Molar (Nm ³ /h)	22655	25150	32854	32854	29558
Vazão Mássica (kg/h)	29268	33051	43437	43437	39090
Fração Molar – Comp. N ₂	0.781121	0.669885	0.623230	0.623230	0.623230
Fração Molar – Comp. AR	0.009343	0.014958	0.015680	0.015680	0.015680
Fração Molar – Comp. O ₂	0.209536	0.315157	0.361091	0.361091	0.361091
NOME	KL0300D	KL0345A	NG0350A	NGT0100A	NGT0310A
Fração de Vapor	0.1653	0	1	1	1
Temperatura (°C)	-189.3	-186.9	-183.8	37.11	-193.2
Pressão (bar)	0.4358	0.4013	0.2692	0.2643	0.3469
Vazão Molar (Nm ³ /h)	3288	4404	10.72	15555	15555
Vazão Mássica (kg/h)	4348	6039	19.10	19430	19430
Fração Molar – Comp. N ₂	0.623230	0.356754	0.000288	0.999747	0.999747
Fração Molar – Comp. AR	0.015680	0.019806	0.999711	0.000252	0.000252
Fração Molar – Comp. O ₂	0.361091	0.623441	0.000000	0.000001	0.000001

NOME	NGT0310B	NGW0100A	NGW0310 A	NGW0310B	NL0100A
Fração de Vapor	1	1	1	1	0
Temperatura (°C)	-193.2	37.11	-192.7	-192.7	-190.8
Pressão (bar)	0.3463	0.213	0.3478	0.3478	4.567
Vazão Molar (Nm ³ /h)	15555	41865	41865	41865	23564
Vazão Mássica (kg/h)	19430	52510	52510	52510	29452
Fração Molar – Comp. N ₂	0.999747	0.981952	0.981952	0.981952	0.999517
Fração Molar – Comp. AR	0.000252	0.004177	0.004177	0.004177	0.000482
Fração Molar – Comp. O ₂	0.000001	0.013931	0.013931	0.013931	0.000002
NOME	NL0100B	NL0100C	NL0100D	NL0300A	RG0310A
Fração de Vapor	0	0	0.0254	0	1
Temperatura (°C)	-190.8	-190.8	-193.2	-177.7	-179.8
Pressão (bar)	4.567	4.567	0.3469	4.567	0.4519
Vazão Molar (Nm ³ /h)	5262	18302	18302	23564	18251
Vazão Mássica (kg/h)	6578	23126	23126	29452	26640
Fração Molar – Comp. N ₂	0.999517	0.999517	0.999517	0.999517	0.000000
Fração Molar – Comp. AR	0.000482	0.000482	0.000482	0.000482	0.089734
Fração Molar – Comp. O ₂	0.000002	0.000002	0.000002	0.000002	0.910266

NOME	RL0350A	RL0350B	XG0100A	XL0310A	XL0310B
Fração de Vapor	0	0	1	0	0
Temperatura (°C)	-183.8	-180.1	37.11	-179.3	-179.3
Pressão (bar)	0.2716	0.4105	16.98	0.4767	1.649
Vazão Molar (Nm ³ /h)	509,7	17750	10780	16046	16046
Vazão Mássica (kg/h)	895.2	25743	15464	22983	22983
Fração Molar – Comp. N ₂	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Fração Molar – Comp. AR	0.999998	0.063306	0.003000	0.003000	0.003000
Fração Molar – Comp. O ₂	0.000001	0.936694	0.997000	0.997000	0.997000
NOME	XL0316A	XL0316C	r- NGT0310A		
Fração de Vapor	0	0	1		
Temperatura (°C)	-177.7	-177.7	-193.2		
Pressão (bar)	18.26	17.23	0.3469		
Vazão Molar (Nm ³ /h)	16046	5262	15555		
Vazão Mássica (kg/h)	22980	7518	19430		
Fração Molar – Comp. N ₂	0.000000	0.000000	0.999747		
Fração Molar – Comp. AR	0.003000	0.003000	0.000252		
Fração Molar – Comp. O ₂	0.997000	0.997000	0.000001		

APÊNDICE B – Perfis de composição de argônio da coluna HP e da coluna LP.

APÊNDICE C – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário DESIGN pela variação da vazão de alimentação de ar da planta, em valores absolutos.

Δ Vazão de ar	Vazão (Nm ³ /h)			
	N2 <i>shelf</i>	GAN	GOX	LAR
9,0%	25222	16971	12245	574
8,0%	25031	16817	12040	562
7,0%	24855	16659	11887	557
6,0%	24629	16501	11712	555
5,0%	24486	16343	11607	552
4,0%	24302	16186	11414	545
3,0%	24110	16029	11284	538
2,0%	23934	15872	11120	526
1,0%	23742	15714	10953	519
0,0%	23564	15555	10780	510
-1,0%	23384	15407	10621	496
-2,0%	23193	15243	10431	478
-3,0%	23009	15083	10245	458
-4,0%	22825	14923	10054	436
-5,0%	22643	14768	9859	412
-6,0%	22450	14600	9651	397

Δ Vazão de ar	Pureza (%)			
	N2 <i>shelf</i>	GAN	GOX	LAR
9,0%	99,963	99,983	99,639	99,9998
8,0%	99,962	99,983	99,635	99,9998
7,0%	99,961	99,983	99,641	99,9998
6,0%	99,960	99,983	99,648	99,9998
5,0%	99,959	99,982	99,654	99,9998
4,0%	99,958	99,982	99,661	99,9998
3,0%	99,957	99,981	99,668	99,9998
2,0%	99,955	99,980	99,676	99,9998
1,0%	99,954	99,980	99,686	99,9998
0,0%	99,952	99,979	99,700	99,9998
-1,0%	99,950	99,978	99,715	99,9998
-2,0%	99,947	99,977	99,736	99,9998
-3,0%	99,945	99,976	99,759	99,9998
-4,0%	99,942	99,975	99,783	99,9998
-5,0%	99,938	99,973	99,806	99,9998
-6,0%	99,934	99,971	99,824	99,9998

Δ Vazão de ar	Consumo de energia (kW)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
9,0%	9693	5276	1324	16293
8,0%	9605	5219	1324	16148
7,0%	9513	5162	1324	15999
6,0%	9428	5105	1324	15857
5,0%	9337	5049	1324	15710
4,0%	9249	4992	1324	15565
3,0%	9161	4935	1324	15420
2,0%	9072	4895	1324	15291
1,0%	8983	4847	1324	15154
0,0%	8894	4800	1324	15018
-1,0%	8808	4752	1324	14884
-2,0%	8716	4703	1324	14743
-3,0%	8630	4655	1324	14609
-4,0%	8538	4607	1324	14469
-5,0%	8449	4559	1324	14332
-6,0%	8360	4511	1324	14195

Δ Vazão de ar	Consumo de água de resfriamento (m ³ /h)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
9,0%	1024,2	599,2	120,5	1743,9
8,0%	1016,4	592,3	120,5	1729,2
7,0%	1009,3	587,4	120,5	1717,2
6,0%	997,0	580,8	120,5	1698,3
5,0%	988,0	576,1	120,5	1684,6
4,0%	978,0	570,8	120,5	1669,3
3,0%	969,2	564,9	120,5	1654,6
2,0%	959,9	559,4	120,5	1639,8
1,0%	950,3	553,9	120,5	1624,7
0,0%	941,1	551,2	120,5	1612,8
-1,0%	931,7	545,3	120,5	1597,4
-2,0%	922,3	539,3	120,5	1582,1
-3,0%	912,9	533,4	120,5	1566,7
-4,0%	903,4	527,4	120,5	1551,3
-5,0%	894,0	521,5	120,5	1536,0
-6,0%	884,6	515,5	120,5	1520,6

APÊNDICE D – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário DESIGN pela variação da vazão de alimentação de ar da planta, em variação percentual.

Δ Vazão de ar	Vazão (Nm ³ /h)			
	N2 <i>shelf</i>	GAN	GOX	LAR
9,0%	7,0362%	9,1032%	13,5900%	12,6153%
8,0%	6,2256%	8,1131%	11,6883%	10,2609%
7,0%	5,4787%	7,0974%	10,2690%	9,3192%
6,0%	4,5196%	6,0816%	8,6456%	8,8876%
5,0%	3,9127%	5,0659%	7,6716%	8,2990%
4,0%	3,1319%	4,0566%	5,8813%	6,9256%
3,0%	2,3171%	3,0473%	4,6753%	5,5719%
2,0%	1,5702%	2,0379%	3,1540%	3,0999%
1,0%	0,7554%	1,0222%	1,6048%	1,8442%
0,0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1,0%	-0,7639%	-0,9515%	-1,4750%	-2,6879%
-2,0%	-1,5744%	-2,0058%	-3,2375%	-6,2193%
-3,0%	-2,3553%	-3,0344%	-4,9629%	-10,1825%
-4,0%	-3,1361%	-4,0630%	-6,7347%	-14,4791%
-5,0%	-3,9085%	-5,0595%	-8,5436%	-19,1681%
-6,0%	-4,7276%	-6,1395%	-10,4731%	-22,1110%

Δ Vazão de ar	Pureza (%)			
	N2 <i>shelf</i>	GAN	GOX	LAR
9,0%	0,0112%	0,0044%	-0,0612%	0,0000%
8,0%	0,0104%	0,0040%	-0,0652%	0,0000%
7,0%	0,0094%	0,0037%	-0,0592%	0,0000%
6,0%	0,0086%	0,0035%	-0,0522%	0,0000%
5,0%	0,0073%	0,0029%	-0,0461%	0,0000%
4,0%	0,0062%	0,0025%	-0,0391%	0,0000%
3,0%	0,0049%	0,0020%	-0,0321%	0,0000%
2,0%	0,0035%	0,0014%	-0,0241%	0,0000%
1,0%	0,0019%	0,0007%	-0,0144%	0,0000%
0,0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1,0%	-0,0020%	-0,0009%	0,0152%	0,0000%
-2,0%	-0,0043%	-0,0020%	0,0361%	0,0000%
-3,0%	-0,0069%	-0,0031%	0,0593%	0,0000%
-4,0%	-0,0099%	-0,0044%	0,0828%	0,0000%
-5,0%	-0,0134%	-0,0059%	0,1059%	0,0000%
-6,0%	-0,0174%	-0,0077%	0,1240%	0,0000%

Δ Vazão de ar	Consumo de energia (kW)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
9,0%	8,9836%	9,9125%	0,0000%	8,4885%
8,0%	7,9942%	8,7292%	0,0000%	7,5243%
7,0%	6,9597%	7,5458%	0,0000%	6,5335%
6,0%	6,0040%	6,3625%	0,0000%	5,5893%
5,0%	4,9809%	5,1792%	0,0000%	4,6051%
4,0%	3,9915%	3,9958%	0,0000%	3,6410%
3,0%	3,0020%	2,8125%	0,0000%	2,6768%
2,0%	2,0013%	1,9792%	0,0000%	1,8178%
1,0%	1,0007%	0,9792%	0,0000%	0,9056%
0,0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1,0%	-0,9669%	-1,0104%	0,0000%	-0,8956%
-2,0%	-2,0013%	-2,0125%	0,0000%	-1,8285%
-3,0%	-2,9683%	-3,0146%	0,0000%	-2,7214%
-4,0%	-4,0027%	-4,0167%	0,0000%	-3,6543%
-5,0%	-5,0034%	-5,0187%	0,0000%	-4,5672%
-6,0%	-6,0040%	-6,0208%	0,0000%	-5,4801%

Δ Vazão de ar	Consumo de água de resfriamento (m ³ /h)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
9,0%	8,8301%	8,7083%	0,0000%	8,1287%
8,0%	8,0013%	7,4565%	0,0000%	7,2173%
7,0%	7,2468%	6,5675%	0,0000%	6,4732%
6,0%	5,9399%	5,3701%	0,0000%	5,3013%
5,0%	4,9835%	4,5174%	0,0000%	4,4519%
4,0%	3,9209%	3,5559%	0,0000%	3,5032%
3,0%	2,9859%	2,4855%	0,0000%	2,5918%
2,0%	1,9977%	1,4877%	0,0000%	1,6741%
1,0%	0,9776%	0,4898%	0,0000%	0,7378%
0,0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1,0%	-1,0006%	-1,0795%	0,0000%	-0,9528%
-2,0%	-2,0012%	-2,1589%	0,0000%	-1,9056%
-3,0%	-3,0018%	-3,2384%	0,0000%	-2,8584%
-4,0%	-4,0024%	-4,3179%	0,0000%	-3,8112%
-5,0%	-5,0030%	-5,3973%	0,0000%	-4,7640%
-6,0%	-6,0036%	-6,4768%	0,0000%	-5,7168%

APÊNDICE E – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário DESIGN pela variação da razão de refluxo na coluna HP, em valores absolutos.

Δ R.R	Vazão (Nm ³ /h)				
	<i>N2 shelf</i>	GAN	GOX	<i>Kettle</i>	LAR
32,0%	19958	12432	9923	36658	507,7
28,0%	20346	12795	10028	36237	510
24,0%	20743	13118	10120	35862	512
20,0%	21165	13483	10224	35440	514
16,0%	21604	13863	10330	34999	516
12,0%	22061	14263	10440	34542	517,5
8,0%	22545	14672	10550	34064	519
4,0%	23039	15106	10663	33564	518,2
0,0%	23564	15555	10780	33040	509,7
-4,0%	24108	16031	10897	32498	509,7
-8,0%	24671	16523	10995	31930	509,7
-12,0%	25270	17040	11092	31346	500,9
-16,0%	25899	17572	11155	30664	487,1
-20,0%	26492	18088	11077	30120	487
-24,0%	27116	18624	10938	29490	491
-26,9%	27598	19030	10814	29024	495

Δ R.R	Pureza (%)				
	<i>N2 shelf</i>	GAN	GOX	<i>Kettle O₂</i>	<i>Kettle N₂</i>
32,0%	99,9992	99,9996	99,8261	32,3538	66,204
28,0%	99,9988	99,9994	99,8122	32,7299	65,8114
24,0%	99,9981	99,9987	99,799	33,0723	65,4542
20,0%	99,9969	99,9983	99,784	33,466	65,043
16,0%	99,9949	99,9975	99,7676	33,874	64,047
12,0%	99,9914	99,9961	99,745	34,342	64,133
8,0%	99,985	99,9933	99,73	34,818	63,640
4,0%	99,9732	99,9883	99,7127	35,336	63,106
0,0%	99,9516	99,979	99,7	35,894	62,54
-4,0%	99,9126	99,9621	99,68	36,495	61,942
-8,0%	99,8464	99,9335	99,666	37,144	61,318
-12,0%	99,7458	99,8903	99,662	37,847	60,667
-16,0%	99,5782	99,8245	99,6694	38,566	60,022
-20,0%	98,903	99,619	99,69	38,773	59,829
-24,0%	98,1352	99,386	99,715	38,895	59,710
-26,9%	97,565	99,2116	99,7346	38,984	59,620

APÊNDICE F – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário DESIGN pela variação da razão de refluxo na coluna HP, em percentagem.

Δ Razão de Refluxo	Vazão (Nm ³ /h)				
	N2 <i>shelf</i>	GAN	GOX	<i>kettle</i>	LAR
32,0%	-15,30%	-20,08%	-7,95%	10,95%	-0,39%
28,0%	-13,66%	-17,74%	-6,98%	9,68%	0,06%
24,0%	-11,97%	-15,67%	-6,12%	8,54%	0,45%
20,0%	-10,18%	-13,32%	-5,16%	7,26%	0,84%
16,0%	-8,32%	-10,88%	-4,17%	5,93%	1,24%
12,0%	-6,38%	-8,31%	-3,15%	4,55%	1,53%
8,0%	-4,32%	-5,68%	-2,13%	3,10%	1,82%
4,0%	-2,23%	-2,89%	-1,09%	1,59%	1,67%
0,0%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-4,0%	2,31%	3,06%	1,09%	-1,64%	0,00%
-8,0%	4,70%	6,22%	1,99%	-3,36%	0,00%
-12,0%	7,24%	9,55%	2,89%	-5,13%	-1,73%
-16,0%	9,91%	12,97%	3,48%	-7,19%	-4,43%
-20,0%	12,43%	16,28%	2,76%	-8,84%	-4,45%
-24,0%	15,07%	19,73%	1,47%	-10,74%	-3,67%
-26,9%	17,12%	22,34%	0,32%	-12,15%	-2,88%

Δ Razão de Refluxo	Pureza (%)					
	N2 <i>shelf</i>	GAN	GOX	<i>Kettle</i> O ₂	<i>Kettle</i> N ₂	LAR
32,0%	0,05%	0,02%	0,13%	-9,86%	5,86%	0,00%
28,0%	0,05%	0,02%	0,11%	-8,82%	5,23%	0,00%
24,0%	0,05%	0,02%	0,10%	-7,86%	4,66%	0,00%
20,0%	0,05%	0,02%	0,08%	-6,76%	4,00%	0,00%
16,0%	0,04%	0,02%	0,07%	-5,63%	2,41%	0,00%
12,0%	0,04%	0,02%	0,05%	-4,32%	2,55%	0,00%
8,0%	0,03%	0,01%	0,03%	-3,00%	1,76%	0,00%
4,0%	0,02%	0,01%	0,01%	-1,55%	0,91%	0,00%
0,0%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
-4,0%	-0,04%	-0,02%	-0,02%	1,67%	-0,96%	0,00%
-8,0%	-0,11%	-0,05%	-0,03%	3,48%	-1,95%	0,00%
-12,0%	-0,21%	-0,09%	-0,04%	5,44%	-2,99%	0,00%
-16,0%	-0,37%	-0,15%	-0,03%	7,44%	-4,03%	0,00%
-20,0%	-1,05%	-0,36%	-0,01%	8,02%	-4,34%	0,00%
-24,0%	-1,82%	-0,59%	0,02%	8,36%	-4,53%	0,00%
-26,9%	-2,39%	-0,77%	0,03%	8,61%	-4,67%	0,00%

APÊNDICE G – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário DESIGN pela variação da vazão de N_2 *shelf* na coluna LP, em valores absolutos.

ΔN_2 <i>Shelf</i>	Vazão (Nm ³ /h)		
	GAN	GOX	LAR
28,8%	20089	11254	594,5
25%	19491	11210	594,5
20%	18711	11163	584,1
15%	17926	11106	571
10%	17144	11032	550
5%	16350	10920	534,7
0%	15555	10780	509,7
-5%	14768	10603	482,2
-10%	13972	10398	433,3
-15%	13170	10145	405,3

ΔN_2 <i>Shelf</i>	Pureza (%)		
	GAN	GOX	LAR
28,8%	99,979	99,7485	99,9998
25%	99,979	99,73	99,9998
20%	99,979	99,7111	99,9998
15%	99,979	99,7	99,9998
10%	99,979	99,6895	99,9998
5%	99,979	99,6859	99,9998
0%	99,979	99,7	99,9998
-5%	99,789	99,7286	99,9998
-10%	99,9788	99,7737	99,9998
-15%	99,9788	99,806	99,9998

APÊNDICE H – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário DESIGN pela variação da vazão de N₂ *shelf* na coluna LP, em valores percentuais.

ΔN_2 <i>Shelf</i>	Vazão (Nm ³ /h)		
	GAN	GOX	LAR
28,8%	29,15%	4,40%	16,64%
25%	25,30%	3,99%	16,64%
20%	20,29%	3,55%	14,60%
15%	15,24%	3,02%	12,03%
10%	10,22%	2,34%	7,91%
5%	5,11%	1,30%	4,90%
0%	0,00%	0,00%	0,00%
-5%	-5,06%	-1,64%	-5,40%
-10%	-10,18%	-3,54%	-14,99%
-15%	-15,33%	-5,89%	-20,48%

ΔN_2 <i>Shelf</i>	Pureza (%)		
	GAN	GOX	LAR
28,8%	0,00%	0,05%	0,00%
25%	0,00%	0,03%	0,00%
20%	0,00%	0,01%	0,00%
15%	0,00%	0,00%	0,00%
10%	0,00%	-0,01%	0,00%
5%	0,00%	-0,01%	0,00%
0%	0,00%	0,00%	0,00%
-5%	-0,19%	0,03%	0,00%
-10%	0,00%	0,07%	0,00%
-15%	0,00%	0,11%	0,00%

APÊNDICE I – Dados de processo das correntes obtidas na simulação do cenário TURNDOWN.

NOME	AG0200A	AG0200A-1	AG0220A	AGE0100A	AGE0590A
Fração de Vapor	1	1	1	1	1
Temperatura (°C)	-81.56	-81.56	-159.3	-77.00	38.56
Pressão (bar)	0,3822	0,3822	4,912	44,28	44,35
Vazão Molar (Nm ³ /h)	3940	3950	37750	37750	37750
Vazão Mássica (kg/h)	5091	5104	48780	48780	48780
Fração Molar – Comp. N ₂	0,781100	0,781100	0,781121	0,781121	0,781121
Fração Molar – Comp. AR	0,009300	0,009300	0,009343	0,009343	0,009343
Fração Molar – Comp. O ₂	0,209600	0,209600	0,209536	0,209536	0,209536
NOME	AGP2590A	AL0100A	AL0100B	AL0100C	AL0100D
Fração de Vapor	1	0	0	0	0
Temperatura (°C)	38.56	-180.0	-180.0	-179.3	-180.0
Pressão (bar)	44.35	44.19	44.19	4.820	44.08
Vazão Molar (Nm ³ /h)	23247	23247	21247	21247	2000
Vazão Mássica (kg/h)	30044	30044	27450	27450	2584
Fração Molar – Comp. N ₂	0,781121	0,781121	0,781121	0,781121	0,781121
Fração Molar – Comp. AR	0,009343	0,009343	0,009343	0,009343	0,009343
Fração Molar – Comp. O ₂	0,209536	0,209536	0,209536	0,209536	0,209536
NOME	AL0100E	KG0345A	KL0300A	KL0300B	KL0300C
Fração de Vapor	0,1254	1	0	0,1734	0,1653
Temperatura (°C)	-191,5	-188,5	-173,7	-190,6	-190,6
Pressão (bar)	0,3388	0,2825	4,875	0,317	0,317
Vazão Molar (Nm ³ /h)	2000	2947	40261	40261	19795
Vazão Mássica (kg/h)	2584	4009	52814	52814	25969
Fração Molar – Comp. N ₂	0,781121	0,669885	0,679363	0,679363	0,679363
Fração Molar – Comp. AR	0,009343	0,014958	0,013559	0,013559	0,013559
Fração Molar – Comp. O ₂	0,209536	0,315157	0,307078	0,307078	0,307078
NOME	KL0300D	KL0345A	NG0350A	NGT0100A	NGT0310A
Fração de Vapor	0,1734	0	1	1	1
Temperatura (°C)	-189,3	-188,5	-183,8	37,98	-193,9
Pressão (bar)	0,317	0,2825	0,2692	0,1562	0,2471
Vazão Molar (Nm ³ /h)	20470	2947	0	14910	14910
Vazão Mássica (kg/h)	26843	4009	0	18648	18648
Fração Molar – Comp. N ₂	0,679363	0,415417	0	0,999876	0,999876
Fração Molar – Comp. AR	0,013559	0,018285	0	0,000124	0,000124
Fração Molar – Comp. O ₂	0,307078	0,566297	0	0,000000	0,000000

NOME	NGT0310B	NGW0100A	NGW0310A	NGW0310B	NL0100A
Fração de Vapor	1	1	1	1	0
Temperatura (°C)	-193.9	37.98	-193.4	-193.4	-191.6
Pressão (bar)	0.2471	0.1303	0.2622	0.2622	4.567
Vazão Molar (Nm ³ /h)	14910	31352	31352	31352	18741
Vazão Mássica (kg/h)	18648	39342	39342	39342	23433
Fração Molar – Comp. N ₂	0.999876	0.982579	0.982579	0.982579	0.999712
Fração Molar – Comp. AR	0.000124	0.004922	0.004922	0.004922	0.000287
Fração Molar – Comp. O ₂	0.000000	0.012499	0.012499	0.012499	0.000001
NOME	NL0100B	NL0100C	NL0100D	NL0300A	RG0310A
Fração de Vapor	0	0	0.0242	0	1
Temperatura (°C)	-191.6	-190.8	-193.9	-177.7	-180.7
Pressão (bar)	4.567	4.567	0.2471	4.567	0.3324
Vazão Molar (Nm ³ /h)	1936	16810	16810	18741	12000
Vazão Mássica (kg/h)	2420	21101	21101	23433	17562
Fração Molar – Comp. N ₂	0.999712	0.999712	0.999712	0.999712	0.000000
Fração Molar – Comp. AR	0.000287	0.000287	0.000287	0.000287	0.101296
Fração Molar – Comp. O ₂	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.898704

NOME	RL0350A	RL0350B	XG0100A	XL0310A	XL0310B
Fração de Vapor	0	0	1	0	0
Temperatura (°C)	-183.8	-181.0	37.98	-180.2	-180.2
Pressão (bar)	0.2696	0.2900	14.0	0.3512	1.523
Vazão Molar (Nm ³ /h)	386.8	11616	7636	12423	12423
Vazão Mássica (kg/h)	689.3	16889	10915	17745	17745
Fração Molar – Comp. N ₂	0.000006	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Fração Molar – Comp. AR	0.999985	0.071656	0.002400	0.002400	0.002400
Fração Molar – Comp. O ₂	0.000009	0.928344	0.997600	0.997600	0.997600
NOME	XL0316A	XL0316C	r-NGT0310A		
Fração de Vapor	0	0	1		
Temperatura (°C)	-178.9	-178.9	-193.9		
Pressão (bar)	15.22	14.19	0.2471		
Vazão Molar (Nm ³ /h)	12423	4781	14910		
Vazão Mássica (kg/h)	17745	6830	18648		
Fração Molar – Comp. N ₂	0.000000	0.000000	0.999876		
Fração Molar – Comp. AR	0.002400	0.002400	0.000124		
Fração Molar – Comp. O ₂	0.997600	0.997600	0.000000		

APÊNDICE J – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário TURNDOWN pela variação da vazão de alimentação de ar da planta, em valores absolutos.

Δ Vazão de Ar	Vazão (Nm ³ /h)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	19926	8593	412
7%	19749	8475	408
6%	19605	8354	405
5%	19461	8233	402
4%	19317	8112	397,8
3%	19173	7991	397,8
2%	19029	7877	394,8
1%	18885	7758	393,8
0%	18741	7636	387
-1%	18593,7	7515	382
-2%	18446,4	7394	378
-3%	18299,1	7273	373
-4%	18151,8	7152	369
-5%	17924	6952	359

Δ Vazão de Ar	Pureza (%)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	99,9718	99,7325	99,9985
7%	99,9718	99,7360	99,9985
6%	99,9717	99,7380	99,9985
5%	99,9716	99,7400	99,9985
4%	99,9715	99,7466	99,9985
3%	99,9715	99,7476	99,9985
2%	99,9714	99,7543	99,9985
1%	99,9712	99,7572	99,9985
0%	99,9712	99,7600	99,9985
-1%	99,9711	99,7646	99,9985
-2%	99,9710	99,7692	99,9985
-3%	99,9709	99,7738	99,9985
-4%	99,9708	99,7784	99,9985
-5%	99,9707	99,7870	99,9985

Δ Vazão de ar	Consumo de energia (kW)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
8%	7390	3991	421	11802
7%	7322	3954	421	11697
6%	7254	3917	421	11592
5%	7186	3880	421	11487
4%	7118	3843	421	11382
3%	7050	3806	421	11277
2%	6982	3769	421	11172
1%	6914	3731	421	11066
0%	6846	3694	421	10961
-1%	6778	3658	421	10857
-2%	6710	3622	421	10753
-3%	6642	3586	421	10649
-4%	6574	3550	421	10545
-5%	6506	3514	421	10441

Δ Vazão de ar	Consumo de água de resfriamento (m ³ /h)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
8%	782	455,8	120,5	1358,3
7%	774,8	451,6	120,5	1346,9
6%	767,6	447,4	120,5	1335,5
5%	760,4	443,2	120,5	1324,1
4%	753,2	439	120,5	1312,7
3%	746	434,8	120,5	1301,3
2%	738,8	430,6	120,5	1289,9
1%	731,5	426,4	120,5	1278,4
0%	724,3	422,2	120,5	1267,0
-1%	717,7	418,0	120,5	1256,2
-2%	710,2	413,8	120,5	1244,5
-3%	702,7	409,6	120,5	1232,8
-4%	695,2	405,4	120,5	1221,1
-5%	687,7	401,2	120,5	1209,4

APÊNDICE K – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário TURNDOWN pela variação da vazão de alimentação de ar da planta, em variação percentual.

Δ Vazão de Ar	Vazão (Nm ³ /h)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	6,3230%	12,5327%	6,5701%
7%	5,3786%	10,9874%	5,5354%
6%	4,6102%	9,4028%	4,7594%
5%	3,8418%	7,8182%	3,9834%
4%	3,0735%	6,2336%	2,8971%
3%	2,3051%	4,6490%	2,8971%
2%	1,5367%	3,1561%	2,1211%
1%	0,7684%	1,5977%	1,8624%
0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1%	-0,7860%	-1,5846%	-1,1381%
-2%	-1,5720%	-3,1692%	-2,2763%
-3%	-2,3579%	-4,7538%	-3,4144%
-4%	-3,1439%	-6,3384%	-4,5525%
-5%	-4,3594%	-8,9576%	-7,1392%

Δ Vazão de Ar	Pureza (%)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	0,0006%	-0,0276%	0,0000%
7%	0,0006%	-0,0241%	0,0000%
6%	0,0005%	-0,0221%	0,0000%
5%	0,0004%	-0,0200%	0,0000%
4%	0,0003%	-0,0134%	0,0000%
3%	0,0003%	-0,0124%	0,0000%
2%	0,0002%	-0,0057%	0,0000%
1%	0,0000%	-0,0028%	0,0000%
0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1%	-0,0001%	0,0046%	0,0000%
-2%	-0,0002%	0,0092%	0,0000%
-3%	-0,0003%	0,0138%	0,0000%
-4%	-0,0004%	0,0184%	0,0000%
-5%	-0,0005%	0,0271%	0,0000%

Δ Vazão de ar	Consumo de energia (kW)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
8%	7,9462%	8,0401%	0,0000%	7,6727%
7%	6,9530%	7,0384%	0,0000%	6,7147%
6%	5,9597%	6,0368%	0,0000%	5,7568%
5%	4,9664%	5,0352%	0,0000%	4,7988%
4%	3,9731%	4,0336%	0,0000%	3,8409%
3%	2,9798%	3,0319%	0,0000%	2,8829%
2%	1,9866%	2,0303%	0,0000%	1,9250%
1%	0,9933%	1,0016%	0,0000%	0,9579%
0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1%	-0,9933%	-0,9746%	0,0000%	-0,9488%
-2%	-1,9866%	-1,9491%	0,0000%	-1,8976%
-3%	-2,9798%	-2,9237%	0,0000%	-2,8465%
-4%	-3,9731%	-3,8982%	0,0000%	-3,7953%
-5%	-4,9664%	-4,8728%	0,0000%	-4,7441%

Δ Vazão de ar	Consumo de água de resfriamento (m ³ /h)			
	MAC	BRIM	WRT	TOTAL
8%	7,9663%	7,9583%	0,0000%	7,2060%
7%	6,9722%	6,9635%	0,0000%	6,3062%
6%	5,9782%	5,9687%	0,0000%	5,4065%
5%	4,9841%	4,9739%	0,0000%	4,5067%
4%	3,9901%	3,9792%	0,0000%	3,6069%
3%	2,9960%	2,9844%	0,0000%	2,7072%
2%	2,0019%	1,9896%	0,0000%	1,8074%
1%	0,9941%	0,9948%	0,0000%	0,8998%
0%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
-1%	-0,9112%	-0,9948%	0,0000%	-0,8524%
-2%	-1,9467%	-1,9896%	0,0000%	-1,7758%
-3%	-2,9822%	-2,9844%	0,0000%	-2,6993%
-4%	-4,0177%	-3,9792%	0,0000%	-3,6227%
-5%	-5,0532%	-4,9739%	0,0000%	-4,5462%

APÊNDICE L – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário TURNDOWN pela variação da razão de refluxo na coluna HP, em variação absoluta.

Δ Razão de Refluxo	Vazão (Nm ³ /h)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	17929	7392	386
6%	18125	7452	386
4%	18326	7512	386
2%	18531	7574	386
0%	18741	7636	386
-2%	18952	7699	386
-4%	19172	7762	386
-6%	19400	7826	384,8
-8%	19629	7884	384,9
-10%	19865	7935	384,8

Δ Razão de Refluxo	Pureza (%)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	99,9891	99,8048	99,9985
6%	99,9861	99,7947	99,9985
4%	99,9823	99,7839	99,9985
2%	99,9774	99,7725	99,9985
0%	99,9712	99,7600	99,9985
-2%	99,9636	99,7481	99,9985
-4%	99,954	99,7351	99,9985
-6%	99,942	99,7225	99,9985
-8%	99,9278	99,7079	99,9985
-10%	99,9111	99,6976	99,9985

APÊNDICE M – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário TURNDOWN pela variação da razão de refluxo na coluna HP, em variação percentual.

Δ Razão de Refluxo	Vazão (Nm ³ /h)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	-4,33%	-3,20%	0,00%
6%	-3,29%	-2,41%	0,00%
4%	-2,21%	-1,62%	0,00%
2%	-1,12%	-0,81%	0,00%
0%	0,00%	0,00%	0,00%
-2%	1,13%	0,83%	0,00%
-4%	2,30%	1,65%	0,00%
-6%	3,52%	2,49%	-0,31%
-8%	4,74%	3,25%	-0,28%
-10%	6,00%	3,92%	-0,31%

Δ Razão de Refluxo	Pureza (%)		
	N ₂ shelf	GOX	LAR
8%	0,02%	0,04%	0,00%
6%	0,01%	0,03%	0,00%
4%	0,01%	0,02%	0,00%
2%	0,01%	0,01%	0,00%
0%	0,00%	0,00%	0,00%
-2%	-0,01%	-0,01%	0,00%
-4%	-0,02%	-0,02%	0,00%
-6%	-0,03%	-0,04%	0,00%
-8%	-0,04%	-0,05%	0,00%
-10%	-0,06%	-0,06%	0,00%

APÊNDICE N– Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário TURNDOWN pela variação de alimentação de N_2 *shelf* na coluna LP, em variação absoluta.

ΔN_2 <i>shelf</i>	Vazão (Nm ³ /h)	
	GOX	LAR
11,55%	7970,0	411,7
10,0%	7942,0	410,6
8,0%	7901,0	404,0
6,0%	7846,0	398,1
4,0%	7781,0	394,1
2,0%	7710,0	390,2
0,0%	7636	386
-2,0%	7558,0	383,3
-4,0%	7480,0	379,9
-6,0%	7399,0	376,7
-8,0%	7318,0	373,6

ΔN_2 <i>shelf</i>	Pureza (%)	
	GOX	LAR
11,55%	99,748	99,9985
10,0%	99,744	99,9985
8,0%	99,745	99,9985
6,0%	99,749	99,9985
4,0%	99,752	99,9985
2,0%	99,976	99,9985
0,0%	99,7600	99,9985
-2,0%	99,765	99,9985
-4,0%	99,770	99,9985
-6,0%	99,774	99,9985
-8,0%	99,779	99,9985

APÊNDICE O – Respostas da análise de sensibilidade paramétrica do cenário TURNDOWN pela variação de alimentação de N_2 *shelf* na coluna LP, em variação percentual.

ΔN_2 <i>shelf</i>	Vazão (Nm ³ /h)	
	GOX	LAR
11,55%	3,37%	5,51%
10,0%	3,01%	5,23%
8,0%	2,48%	3,54%
6,0%	1,76%	2,02%
4,0%	0,92%	1,00%
2,0%	0,00%	0,00%
0,0%	-0,96%	-1,08%
-2,0%	-1,97%	-1,77%
-4,0%	-2,98%	-2,64%
-6,0%	-4,03%	-3,46%
-8,0%	-5,08%	-4,25%

ΔN_2 <i>shelf</i>	Pureza (%)	
	GOX	LAR
11,55%	-0,228%	0,00%
10,0%	-0,231%	0,00%
8,0%	-0,230%	0,00%
6,0%	-0,227%	0,00%
4,0%	-0,224%	0,00%
2,0%	0,000%	0,00%
0,0%	-0,216%	0,00%
-2,0%	-0,211%	0,00%
-4,0%	-0,206%	0,00%
-6,0%	-0,201%	0,00%
-8,0%	-0,196%	0,00%