



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Proposta de Índice de Eficiência Energética Baseado na Exergia para UPGN

Autor: Elis Cristina Domeneghini

Orientador: Pedro R. Fernandes

Porto Alegre, julho de 15

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	x
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 <i>Fundamentos da Análise Energética de Processos</i>	2
2.1.1 Eficiência Energética Baseada na Primeira Lei da Termodinâmica	2
2.1.2 Disponibilidade e Eficiência Energética com Base nos Princípios da Segunda Lei da Termodinâmica	2
2.2 Análise Exergética	5
2.2.1 Classificações e decomposições da propriedade exergia	5
2.2.2 Eficiência exergética	6
2.2.3 Eficiência exergética em UPGNs	7
2.3 Tecnologia da indústria do gás natural	8
2.3.1 Conceitos Fundamentais e Composição do Gás Natural	9
2.3.2 Processamento do gás natural	10
2.3.3 Tipos de Processo	11
3 Estudo de caso	14
3.1 Descrição do processo	14
3.1.1 Sistema de resfriamento de gás natural	15
3.1.2 Turbo-expansor (T.E.)	17
3.1.3 Sistema de desetanização	18
3.1.4 Sistema de desbutanização	18
3.1.5 Sistema de despropanização	18
4 Metodologia	20
4.1 Definição do volume de controle	20
4.2 Obtenção de dados	21
4.2.1 Exergia química	21
4.2.2 Exergia termomecânica	22
4.2.3 Exergia associada aos fluxos de trabalho recebidos pelo V.C.	22
4.3 Cálculo das eficiências	23
4.3.1 Eficiência input-output	23
4.3.2 Eficiência consumed-produced segundo Rian e Ertesvåg (2012)	24
4.4 Análises de sensibilidade no processo	24
5 Resultados	26
5.1 Cenário de operação em condições normais da UPGN	26

5.1.1	Eficiência input-output	26
5.1.2	Eficiência consumed-produced segundo Rian e Ertesvåg (2012)	26
5.2	Análises de sensibilidade	27
5.2.1	Variação na carga térmica da torre T-01	27
5.2.2	Variação na vazão de produto de fundo da torre T-03	29
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	32
7	Referências	33

Agradecimentos

Agradeço, inicialmente, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelas oportunidades de crescimento e desenvolvimento, tanto pessoal quanto profissional. Agradeço, especialmente, pela oportunidade de realizar uma experiência acadêmico-profissional em outro país.

Aos mestres, pelos exemplos, histórias e ensinamentos repassados e pela dedicação em compartilhar conosco todos os seus conhecimentos. Em especial, ao professor Pedro R. Bolognese Fernandes, que durante esta etapa de confecção do trabalho, me orientou com dedicação e incentivo, sempre de forma leve e inspiradora.

Às amigas construídas durante os seis anos e meio de graduação, que comigo compartilharam as diversas vivências deste período, desde as experiências proporcionadas pelo meio acadêmico às atividades de lazer. Sem dúvida isto enriqueceu e tornou esta experiência de UFRGS mais prazerosa e proveitosa.

A minha amiga e companheira, Bruna de Souza Fiorentin, que me acompanha desde a infância, e, que, durante o período de graduação esteve ao meu lado compartilhando o dia-a-dia, as vivências e o crescimento.

Dedico estes agradecimentos, também, aos meus padrinhos Égide e Gervásio, tias Idene e Terezinha e primas Giovana e Gabriele, pelo acolhimento e por toda ajuda em Porto Alegre, desde os primórdios da graduação.

E por fim, agradeço a meus pais, João Carlos e Idene, e ao meu irmão, Lucas. Muito obrigada, família, pela educação a mim oferecida, pelos valores a mim repassados, pelos sonhos que comigo compartilharam, pela paciência comigo praticada, pela confiança em mim depositada, pelas vidas que a mim dedicaram, e, sobretudo, pelo amor por mim cultivado.

Resumo

A análise de eficiência energética de unidades industriais é comumente empregada sob o ponto de vista da primeira Lei da Termodinâmica, a qual não considera os efeitos irreversíveis ocorridos devido à geração de entropia no sistema. Com base nisto, foi proposta uma análise sob o ponto de vista da segunda Lei da Termodinâmica, que introduz o conceito da *disponibilidade*, também conhecida como *exergia*.

No entanto, o conceito de eficiência é demasiado genérico, o que pode levar a diversas interpretações para a caracterização da performance de processos. É possível se encontrar, na literatura, diferentes métricas baseadas na análise da exergia para avaliar o desempenho de processos, gerando diferentes resultados.

Este trabalho realiza uma análise de performance para uma unidade de processamento de gás natural (UPGN), e propõe um índice de eficiência energética baseado na variação da exergia do sistema durante o processo, através de uma simulação em estado estacionário implementada no software AspenPlus®.

Foram propostas duas expressões, adaptadas da literatura, para o cálculo da eficiência da UPGN. Uma delas apresentou valores próximos à unidade (91 a 98%), enquanto que a outra apresentou valores na faixa de 60 a 68%. Observou-se, também, que ambas sofreram alterações com a variação dos parâmetros de carga térmica cedida aos *reboilers* da torre T-01 e de vazão da corrente de fundo da T-03.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Fluxograma de um processo em estado estacionário no qual calor é recebido e trabalho produzido.	2
Figura 2.2: Produtos obtidos após o processamento do gás natural.....	11
Figura 3.1: Fluxograma simplificado do processo utilizado na UPGN.....	14
Figura 3.2: Fluxograma do sistema de resfriamento da UPGN.	16
Figura 3.3: Fluxograma do processo de turbo-expansão e do sistema de desetanização.	17
Figura 3.4: Fluxograma das etapas de desbutanização e despropanização.	19
Figura 4.1: Fluxos de matéria e energia associados à variação de exergia, para o volume de controle escolhido.	20
Figura 5.1: Eficiência <i>input-output</i> em função da carga térmica da torre T-01.	28
Figura 5.2: Eficiência <i>consumed-produced</i> segundo Rian e Ertesvåg (2012) em função da carga térmica da torre T-01.	29
Figura 5.3: Eficiência <i>input-output</i> em função da vazão de fundo da torre T-03.	30

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Contaminantes (não-hidrocarbonetos) presentes na mistura do gás natural. (Fonte: Vaz, Maia e Santos, 2008).....	9
Tabela 2.2: Composição típica de gás natural no Brasil. (Fonte: Vaz, Maia e Santos, 2008).	10
Tabela 3.1: Composição do gás natural carga da UPGN.	15
Tabela 3.2: Composição dos produtos obtidos na simulação do processamento do gás natural.....	15
Tabela 3.3: Temperatura e pressão de algumas das correntes da etapa de resfriamento do gás natural.	16
Tabela 3.4: Temperatura e pressão de algumas das correntes das etapas de turbo-expansão e desetanização.	17
Tabela 3.5: Temperaturas e pressões de algumas das correntes das etapas de desbutanização e despropanização.....	19
Tabela 4.1: Fluxos de exergia de interesse para a análise energética.....	20
Tabela 4.2: Exergia química específica dos componentes envolvidos no cálculo da exergia química das correntes do processo ($T = 298,15\text{K}$ e $P = 1\text{atm}$).....	21
Tabela 4.3: Energia livre de Gibbs de formação das espécies envolvidas no cálculo da exergia do isobutano e do isopentano.	22
Tabela 4.4: Taxas de exergia química e termomecânica das correntes de interesse do estudo.	22
Tabela 4.5: Taxas de exergia adicionadas ao V.C. devido ao consumo de trabalho.....	23
Tabela 4.6: Taxas de exergias de separação das correntes de produtos.....	24
Tabela 4.7: Intervalos de variação dos parâmetros nas análises de sensibilidade.....	25
Tabela 5.1: Taxas de exergias de entrada e de saída do volume de controle.	26
Tabela 5.2: Taxas de exergias consumidas e produzidas no volume de controle.	27
Tabela 5.3: Taxa de exergia das correntes de produtos e do gás combustível utilizado na geração de energia térmica, para diferentes valores da carga térmica da torre T-01.	28
Tabela 5.4: Taxa de exergia de separação das correntes de produtos, para diferentes valores da carga térmica da torre T-01.	29
Tabela 5.5: Taxa de exergia das correntes de produtos e do gás combustível utilizado na geração de energia térmica, para diferentes valores de vazão de fundo da torre T-03.....	30
Tabela 5.6: Taxa de exergia de separação das correntes de produtos, para diferentes valores de vazão de fundo da torre T-03.....	31

Lista de Símbolos

h – entalpia específica

s – entropia específica

q – calor

w – trabalho

T_H – temperatura da fonte quente

\dot{m} – vazão mássica

\dot{S} – taxa de variação de entropia líquida do sistema

s_{ger} – geração de entropia específica no sistema

q_o^{rev} – calor trocado reversivelmente com o ambiente

w^{rev} – trabalho realizado reversivelmente

T_o – temperatura ambiente

$\dot{I}_{v.c.}$ – taxa de geração de irreversibilidade no volume de controle

T_j – temperatura da corrente j

$\dot{Q}_{v.c.,j}$ – taxa de calor trocado pelo V.C. com o reservatório térmico j

$\dot{W}_{v.c.}$ – taxa de trabalho realizado pelo V.C.

$\eta_{2^a\ lei}$ – eficiência pela 2ª Lei da termodinâmica

e – exergia específica

E – exergia

e^{TM} – exergia específica termomecânica

e^{CH} – exergia específica química

E^{TM} – exergia termomecânica

E^{CH} – exergia química

ΔE^{CH} – exergia química de separação

g – energia livre de gibbs

R – constante universal dos gases perfeitos

ε – eficiência *consumed-produced*

Lista de Abreviaturas e Siglas

COP – Coeficiente de Performance

GC – Gás Combustível

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GN – Gás Natural

LGN – Líquido de Gás Natural

MEG – Monoetilenoglicol

T.E. – Turbo-Expansor

UPGN – Unidade de Processamento de Gás Natural

V.C. – Volume de Controle

1 Introdução

O gás natural é um combustível de origem fóssil que se destaca em relação às fontes de energia concorrentes (derivados do petróleo e carvão) por emitir menores quantidades de gases de efeito estufa na sua queima, sendo um combustível de utilização crescente na matriz energética brasileira e de utilização já consolidada em outros países.

É fato que a demanda tanto industrial quanto doméstica por energia vem crescendo consideravelmente na última década, e neste contexto, as unidades de processamento de gás natural são muito importantes para o suprimento das necessidades energéticas mundiais. Visto isso, é de interesse analisar a eficiência com a qual estas unidades operam, visando aprimorar as suas etapas do ponto de vista energético.

Este estudo objetiva analisar a eficiência energética de uma unidade de processamento de gás natural através da proposta de um índice de eficiência baseado na propriedade exergia das correntes de processo, utilizando uma simulação estacionária. A fim de verificar a influência da variação das condições de processo sobre a eficiência da unidade, dois parâmetros foram variados dentro de intervalos pré-definidos.

O presente trabalho é dividido da seguinte forma: no segundo capítulo é apresentada uma fundamentação teórica da propriedade exergia, uma revisão bibliográfica de análises energéticas com foco na exergia e uma revisão bibliográfica de processamento de gás natural. O terceiro capítulo apresenta a descrição do processo utilizado na UPGN analisada, salientando as etapas do processo. O capítulo quatro apresenta a metodologia adotada durante a realização do trabalho, englobando desde a obtenção de dados até o cálculo das eficiências. O capítulo cinco traz os resultados e discussões dos índices obtidos e, por fim, no capítulo seis são feitas as conclusões quanto aos resultados observados e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

2 Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta conceitos termodinâmicos aplicáveis à análise de eficiência energética de uma unidade de processamento de gás natural. A análise de processos do ponto de vista energético (1ª Lei) é amplamente difundida na avaliação de operações unitárias e unidades como um todo, sendo menos empregada na Engenharia de Processos a análise baseada na 2ª Lei.

2.1 Fundamentos da Análise Energética de Processos

2.1.1 Eficiência Energética Baseada na Primeira Lei da Termodinâmica

Na Termodinâmica, o conceito de eficiência energética é bastante utilizado, porém, por se tratar de um conceito abrangente, existem diversas definições dependendo do processo analisado. Para uma máquina térmica, por exemplo, a primeira lei define o rendimento térmico como sendo a razão entre o que é produzido (energia em forma de trabalho) e o que é consumido para que esta produção ocorra (energia em forma de calor) (Sonntag, Borgnakke e Van Wylen, 2003).

A segunda lei da termodinâmica, por sua vez, introduz a ideia do processo reversível e do Ciclo de Carnot, ciclo que apresenta a maior eficiência possível operando entre dois reservatórios térmicos dados, sendo, portanto, a referência de desempenho energético. Com base nesse conceito, pode-se, então, definir a eficiência como a relação entre o desempenho de uma máquina real, sob dadas condições, e o desempenho que a máquina de Carnot teria nas mesmas condições.

2.1.2 Disponibilidade e Eficiência Energética com Base nos Princípios da Segunda Lei da Termodinâmica

A análise da disponibilidade (capacidade de realizar trabalho) da energia, trabalho reversível e irreversibilidade conduz a uma terceira definição de eficiência. Considerando um processo em regime estacionário, no qual um fluido é admitido no volume de controle (V.C.) no estado i e deixa o mesmo no estado f (Figura 2.1), no qual a troca de calor com um reservatório térmico à temperatura T_H é dada por q , a primeira lei da Termodinâmica determina que

$$q + h_i + \frac{v_i^2}{2} + gz_i = h_f + \frac{v_f^2}{2} + gz_f + w \quad (2.1)$$

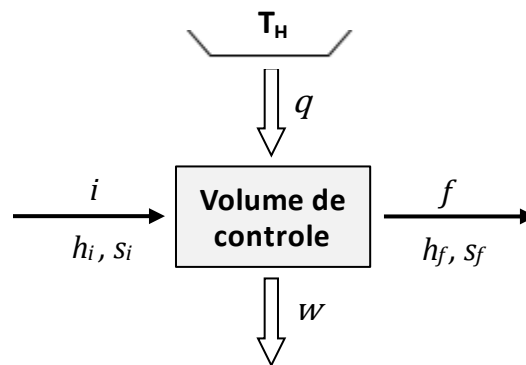


Figura 2.1: Fluxograma de um processo em estado estacionário no qual calor é recebido e trabalho produzido.

Para um sistema no qual não ocorrem variações de energia cinética e potencial, o trabalho realizado pelo sistema é, então, dado por

$$w = q - (h_f - h_i) \quad (2.2)$$

Uma análise da segunda lei da Termodinâmica para esse processo mostra que, se o sistema recebe calor, a variação de entropia no sistema é positiva ($\Delta S > 0$) (Sonntag, Borgnakke e Van Wylen, 2003), assim, um balanço de entropia para o sistema trará que

$$\frac{1}{\dot{m}} \frac{dS_{liq}}{dt} \equiv \dot{s}_{liq} = (s_f - s_i) - \frac{q}{T_H} = s_{ger} > 0 \quad (2.3)$$

onde \dot{s}_{liq} é variação de entropia líquida no sistema e s_{ger} é a geração de entropia no sistema devido às irreversibilidades internas ao V.C..

A fim de considerar-se o processo reversível correspondente, é necessário compensarem-se as fontes de geração de entropia, de modo a anular a taxa de geração de entropia. A única fonte de irreversibilidade para o processo em questão é a troca de calor realizada com o ambiente, sendo, então, necessária a introdução de um termo negativo de calor dividido pela temperatura ambiente na Eq. 2.3, relativo a essa troca (Sonntag, Borgnakke e Van Wylen, 2003). A aplicação da segunda lei para o processo reversível se torna então

$$\frac{1}{\dot{m}} \frac{dS_{liq}}{dt} = (s_f - s_i) - \frac{q}{T_H} - \frac{q_o^{rev}}{T_o} = 0 \quad (2.4)$$

Aplicando-se a primeira lei para o processo reversível descrito, obtém-se uma expressão para w^{rev} :

$$w^{rev} = q + q_o^{rev} - (h_f - h_i) \quad (2.5)$$

Reescrevendo-se então a Eq. 2.4, pode-se obter uma expressão para q_o^{rev} , e, aplicando-se na Eq. 2.5, virá

$$w^{rev} = T_o(s_f - s_i) - (h_f - h_i) + q \left(1 - \frac{T_o}{T_H}\right) \quad (2.6)$$

Esta expressão estabelece o limite teórico superior para o trabalho que pode ser executado por um processo como o descrito anteriormente. Além disso, tal trabalho será máximo quando as condições de saída forem iguais às do ambiente, ou seja, quando o sistema estiver em equilíbrio com o mesmo (Sonntag, Borgnakke e Van Wylen, 2003).

Sob essa condição, é definida a *disponibilidade*, ou *exergia*, simbolizada por e , que representa o máximo trabalho que um dado sistema pode realizar ao ser colocado em equilíbrio com o ambiente a partir de um dado estado inicial. Para situações nas quais a variação de energia cinética e potencial são nulas, ou quando esses termos são negligenciáveis, a disponibilidade, e , é dada por:

$$e = (h - T_o s) - (h_o - T_o s_o) \quad (2.7)$$

onde h e s são a entalpia e a entropia das correntes nas condições de processo, respectivamente, enquanto o subscrito o denota propriedades avaliadas nas condições ambientes.

Além da disponibilidade, outro fator importante é a taxa de geração de irreversibilidade dentro do volume de controle, que está associada à perda de energia útil. A taxa de geração de irreversibilidade pode ser relacionada com a variação de disponibilidade do sistema devido a escoamentos, trocas de calor e trabalho realizado, e é representada através do seguinte balanço:

$$I_{v.c.} = (\Sigma \dot{m}_i e_i - \Sigma \dot{m}_f e_f) + \Sigma \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_{v.c.,j} + \dot{W}_{v.c.} \quad (2.8)$$

onde e_i e e_f são as exergias das correntes de entrada e saída do V.C., respectivamente; T_j é a temperatura do reservatório térmico j ; $\dot{Q}_{v.c.,j}$ é a taxa de calor trocado pelo V.C. com o reservatório térmico j e $\dot{W}_{v.c.}$ é a taxa de trabalho realizado pelo V.C.

A importância deste conceito se deve ao fato de que, quanto menor for a irreversibilidade associada a uma mudança de estado, mais trabalho poderá ser realizado ou, equivalentemente menos trabalho será necessário para a transformação inversa (Sonntag, Borgnakke e Van Wylen, 2003). Este fato é importante não só do ponto de vista da análise termodinâmica de processos, mas também do ponto de vista econômico, uma vez que, utilizando-se de forma mais proveitosa a energia disponível nas correntes de processos e dos recursos naturais, melhor também será o desempenho financeiro dos mesmos.

A partir da análise da disponibilidade foi desenvolvido o conceito de eficiência de um processo baseado na segunda lei da Termodinâmica. Esse conceito compara a produção desejada num processo com a variação da disponibilidade termodinâmica no processo (Sonntag, Borgnakke e Van Wylen, 2003). Assim, por exemplo, para uma turbina que gera uma quantidade de trabalho w_{real} e opera entre os estados de entrada i e de saída f , a eficiência pela segunda lei pode ser definida como

$$\eta_{2^a \text{ lei}} = \frac{w_{real}}{e_i - e_f} \quad (2.9)$$

Já para um dispositivo que não produz ou consome trabalho, como um trocador de calor, por exemplo, a eficiência conforme a segunda lei pode ser definida como a razão entre a variação de disponibilidade no processo desejado (corrente fria) e a variação de disponibilidade dos insumos do processo (corrente quente).

Em geral pode-se representar a eficiência baseada na segunda lei através de uma expressão geral, com a seguinte forma (Sonntag, Borgnakke e Van Wylen, 2003):

$$\eta_{2^a \text{ lei}} = \frac{\dot{E}_{produzida}}{\dot{E}_{fonte}} = \frac{\dot{E}_{fonte} - \dot{I}_{v.c.}}{\dot{E}_{fonte}} \quad (2.10)$$

onde \dot{E}_{fonte} é a taxa total de disponibilidade fornecida ao V.C., o que pode ocorrer através de diversas fontes (escoamentos, transferência de calor e trabalho), e $\dot{E}_{produzido}$ é a taxa de disponibilidade utilizada pelo V.C..

2.2 Análise Exergética

2.2.1 Classificações e decomposições da propriedade exergia

Diversos autores propuseram classificações e decomposições para a exergia em termos de suas parcelas constituintes (Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012; Rian e Ertesvåg, 2012). Dentre essas classificações, destaca-se o critério de origem da exergia da corrente analisada, que associa esta à composição, pressão, temperatura, velocidade, posição, etc. da mesma. Para sistemas em repouso, nos quais energias nuclear e elétrica não estão envolvidas, a decomposição da exergia em uma fração química e outra termomecânica é bastante utilizada:

$$E = \dot{m}(e^{TM} + e^{CH}) \quad (2.11)$$

A exergia química está relacionada com a composição da corrente, enquanto que a fração termomecânica está relacionada com a pressão e a temperatura da mesma.

Exergia termomecânica

A exergia termomecânica, e^{TM} , é dada pela Equação. 2.7:

$$e^{TM} = [h(T, P) - h(T_o, P_o)] - T_o[s(T, P) - s(T_o, P_o)] \quad (2.12)$$

Ainda se pode decompor a exergia termomecânica em duas parcelas: uma referente à temperatura e outra à pressão (Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012), o que pode ser útil para identificar a origem das transformações que ocorrem num processo. As componentes da temperatura e da pressão são definidas pelas Eq. 2.13 e 2.14, respectivamente.

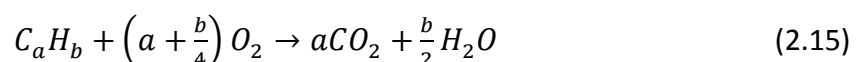
$$e^T = [h(T, P) - h(T_o, P)] - T_o[s(T, P) - s(T_o, P)] \quad (2.13)$$

$$e^P = [h(T_o, P) - h(T_o, P_o)] - T_o[s(T_o, P) - s(T_o, P_o)] \quad (2.14)$$

A soma das duas últimas equações resulta na Eq. 2.12.

Exergia química

Por definição, a exergia química é o máximo trabalho que poderia ser obtido idealmente através da reação de uma substância com oxigênio, em condições ambientes, para gerar os componentes dióxido de carbono e água, também nas condições ambientes (Moran e Shapiro, 2006). Esta definição é bastante conveniente para combustíveis, particularmente hidrocarbonetos, segundo a seguinte reação genérica:



onde a é o número de átomos de carbono e b o número de átomos de hidrogênio do combustível. Segundo Moran e Shapiro (2006), pode-se utilizar a seguinte relação para o cálculo da exergia química dos hidrocarbonetos:

$$\begin{aligned} \bar{e}_F^{CH} = & [\bar{g}_F + \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(l)}](T_o, P_o) \\ & + a \bar{e}_{CO_2}^{CH} + \frac{b}{2} \bar{e}_{H_2O(l)}^{CH} - \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{e}_{O_2}^{CH} \end{aligned} \quad (2.16)$$

onde $\bar{g}_F, \bar{g}_{O_2}, \bar{g}_{CO_2}, \bar{g}_{H_2O}$ são as energias de Gibbs específicas do combustível, O_2 , CO_2 e água líquida, respectivamente, e $\bar{e}_{CO_2}^{CH}, \bar{e}_{H_2O(l)}^{CH}, \bar{e}_{O_2}^{CH}$ as exergias químicas padrão do CO_2 , água líquida e O_2 , respectivamente. Uma definição similar pode ser empregada para outras classes de compostos que não hidrocarbonetos.

Para substâncias que não são combustíveis, a definição de exergia química pode ser estendida para uma transformação, sem reação química, na qual o componente encontra-se inicialmente em seu estado puro, e ao final, no seu estado encontrado no ambiente. Pode-se expressar a exergia química de componentes não combustíveis, como O_2 e CO_2 , conforme a equação abaixo (Moran e Shapiro, 2006):

$$\bar{e}^{CH} = \bar{R}T_o \ln\left(\frac{1}{y^e}\right) \quad (2.17)$$

onde y^e é a fração molar do componente no ambiente e \bar{R} é a constante universal dos gases perfeitos.

Da mesma forma que a energia de Gibbs, a exergia química está relacionada com a composição da corrente, e, para misturas, é utilizada a exergia química de mistura, que pode ser calculada da seguinte forma:

$$\bar{e}_k^{CH} = \sum_j x_{j,k} \bar{e}_j^{CH} + \bar{R}T_o \sum_j x_{j,k} \ln x_{j,k} \quad (2.18)$$

na qual $x_{j,k}$ é a fração molar do componente j na corrente k e \bar{e}_j^{CH} é a exergia química padrão do componente j .

Assim como as propriedades entalpia, entropia etc., cada elemento ou composto possui a sua exergia de referência (exergia padrão). Morris e Szargut (1985) calcularam e tabelaram a exergia química padrão de diversos compostos da natureza à temperatura de 298,15 K e pressão de 1 atm.

2.2.2 Eficiência exergética

O conceito de eficiência energética/exergética é bastante genérico, o que pode levar a diversas interpretações para a caracterização da performance de processos. Na literatura é possível se encontrar diferentes métricas baseadas na análise da exergia para avaliar o desempenho de processos semelhantes, gerando diferentes resultados e, conseqüentemente, ambigüidades nas conclusões destes estudos.

Marmolejo-Correa e Gundersen (2012) analisaram trabalhos apresentados anteriormente na literatura e classificaram as eficiências encontradas em duas categorias: do tipo entrada-saída (*input-output*) e do tipo consumido-produzido (*consumed-produced*). O primeiro tipo envolve a razão entre todos os fluxos de exergia que saem e que entram no sistema, e pode ser apresentado como segue:

$$\eta = \frac{\sum \text{Exergia de saída}}{\sum \text{Exergia de entrada}} \quad (2.19)$$

Já o segundo tipo considera somente a mudança de exergia de correntes específicas (úteis) do processo, e dos fluxos de exergia que acompanham as entradas e saídas de energia (Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012). Podem ser encontradas diferentes expressões dentro desta abordagem, conforme mostram as seguintes expressões encontradas na literatura:

Grassmann (1950, apud Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012):

$$\varepsilon_1 = \frac{\text{Exergia útil de saída}}{\text{Exergia útil de entrada}} \quad (2.20)$$

Szargut *et al.* (1988, apud Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012):

$$\varepsilon_2 = \frac{\text{Exergia dos produtos úteis}}{\text{Exergia da corrente de alimentação}} \quad (2.21)$$

Baehr, Kotas (1968; 1995, apud Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012):

$$\varepsilon_3 = \frac{\text{Output desejado}}{\text{Input requerido}} \quad (2.22)$$

Tsatsaronis, Bejan *et al.* (1993; 1996, apud Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012):

$$\varepsilon_4 = \frac{\text{Exergia dos produtos}}{\text{Exergia do combustível}} \quad (2.23)$$

Brodyansky *et al.* (1994, apud Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012):

$$\varepsilon_5 = \frac{\text{Exergia de saída} - \text{Exergia de trânsito}}{\text{Exergia de entrada} - \text{Exergia de trânsito}} \quad (2.24)$$

Nesta última expressão, o termo *Exergia de trânsito* representa uma exergia que simplesmente é transportada durante o processo, não sofrendo transformações ao longo do mesmo (Brodyansky *et al.*, 1994, apud Rian e Ertesvåg, 2012).

Esses métodos podem ser empregados no cálculo da eficiência de diferentes dispositivos de um processo, existindo definições específicas de eficiência para diversos dispositivos comuns, tais como compressores, trocadores de calor, etc. (Marmolejo-Correa e Gundersen, 2012).

2.2.3 Eficiência exérgica em UPGNs

Marmolejo-Correa e Gundersen (2012) calcularam a eficiência exérgica para um processo de liquefação de gás natural à temperatura menor que a ambiente utilizando as duas classes de eficiências citadas anteriormente. Empregaram, também, definições de eficiência que levam em conta a decomposição da exergia termomecânica, além de analisarem o efeito da temperatura do processo.

As conclusões deste estudo salientam a importância de se decompor a exergia em suas componentes de temperatura e pressão, de modo que a expressão desenvolvida para a eficiência avalie propriamente a qualidade termodinâmica dos diferentes processos. Outro ponto observado é que o método *consumed-produced* representa com

maior verossimilhança a transferência de exergia que ocorre no processo, gerando índices de eficiência mais representativos do que o método *input-output*.

Marmolejo-Correa e Gundersen (2012) observaram também que a manutenção da contribuição da exergia química, que é invariável num processo sem reações químicas ou separações físicas, no cálculo da eficiência, conduz a valores altos para a mesma. Esta conclusão é suportada, também, por Rian e Ertesvåg (2012), ao definirem a eficiência global de uma unidade de processamento de gás natural na Noruega. Segundo os autores, em processos envolvendo hidrocarbonetos, a exergia química é a parcela de maior magnitude. Quando esta permanece constante no processo, a razão entre fluxos de entrada e saída pode ser próxima da unidade, o que pode indicar erroneamente uma performance muito boa do processo. Altos fluxos de exergia química, nesses casos, reduzem o impacto de melhorias efetuadas no processo sobre os índices de eficiência. Esta exergia química que simplesmente é transportada sem transformações ao longo do processo é a mesma *Exergia de trânsito* definida por Brodyansky *et al.* (1994, apud Rian e Ertesvåg, 2012), conforme apresentado anteriormente.

Visando eliminar a influência da exergia química no cálculo da eficiência, Rian e Ertesvåg (2012) propuseram uma expressão do tipo *produced-consumed*, na qual um termo de variação da exergia química, devido à separação dos componentes no processo, é introduzido. Desta forma, as exergias de trânsito são eliminadas. Esta expressão é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\sum_k E_k^{tm} + \sum_k \Delta E_k^{ch}}{E_{feed}^{tm} + \sum_j n_{fuel} (x_{j,fuel} \bar{e}_j^{ch} + \bar{R}T_o x_j \ln x_{j,fuel})} \quad (2.25)$$

na qual E_k^{tm} é a exergia termomecânica da corrente k , E_{feed}^{tm} é a exergia termomecânica da corrente de entrada, n_{fuel} é a vazão molar de combustível utilizado na geração de energia para o processo, $x_{j,fuel}$ é a fração molar do componente j nesta corrente de combustível e \bar{e}_j^{ch} é a exergia química do componente j .

O termo ΔE_k^{ch} é a variação na exergia química da corrente k em relação à corrente de entrada, e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\Delta E_k^{ch} = \bar{R}T_o n_k \sum x_{j,k} (\ln x_{j,k} - \ln x_{j,entrada}) \quad (2.26)$$

Além desses termos, para sistemas recebendo ou fornecendo trabalho e/ou calor, as taxas de exergia associadas devem ser adicionadas ao denominador e numerador, respectivamente.

2.3 Tecnologia da indústria do gás natural

O gás natural, mesmo que de origem fóssil, se destaca em relação às fontes de energia concorrentes (derivados do petróleo e carvão) por emitir menores quantidades de gases de efeito estufa na sua queima, sendo um combustível de utilização crescente na matriz energética brasileira. Além desta utilização como combustível, seja industrial, comercial ou residencial, outras aplicações também se destacam, como a cogeração de energia (produção simultânea de calor e eletricidade a partir do mesmo combustível), assim como sua utilização como matéria-prima para a indústria química e de fertilizantes

(Vaz, Maia e Santos, 2008). Em nível mundial, os setores industriais e de geração de energia elétrica são as principais áreas de utilização do gás natural.

2.3.1 Conceitos Fundamentais e Composição do Gás Natural

O gás natural pode ser conceituado como “a mistura de hidrocarbonetos que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições de reservatório, e que permanece no estado gasoso nas condições atmosféricas de pressão e temperatura” (Vaz, Maia e Santos, 2008).

Diferentemente do petróleo, essa mistura é composta predominantemente por hidrocarbonetos parafínicos, com cadeias variando de 1 a 12 átomos de carbono. Os hidrocarbonetos do gás natural apresentam características comuns, como o fato de serem incolores, inodoros e inflamáveis.

Além dos hidrocarbonetos, o gás natural possui componentes contaminantes, que podem ser orgânicos e inorgânicos. A Tabela 2.1 apresenta os principais componentes não hidrocarbonetos do gás natural.

Tabela 2.1: Contaminantes (não-hidrocarbonetos) presentes na mistura do gás natural. (Fonte: Vaz, Maia e Santos, 2008).

N ₂	Nitrogênio
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Água
H ₂ S	Gás sulfídrico
COS	Sulfeto de carbonila
CS ₂	Dissulfeto de carbono
R-SH	Mercaptanas
Hg	Mercúrio
He	Hélio
Ar	Argônio
O ₂	Oxigênio
H ₂	Hidrogênio

A composição do gás natural varia conforme a sua origem, e a Tabela 2.2 mostra algumas composições típicas do gás natural encontrado no Brasil.

Tabela 2.2: Composição típica de gás natural no Brasil. (Fonte: Vaz, Maia e Santos, 2008(Vaz, Maia e Santos, 2008)(Vaz, Maia e Santos, 2008)).

Composição (%vol.)	Ceará/Rio Grande do Norte	Sergipe/Alagoas	Bahia	Espirito Santo	Rio de Janeiro	São Paulo	Amazonas
C1	74,53	81,32	81,14	88,16	79,69	87,88	68,88
C2	10,40	8,94	11,15	4,80	9,89	6,27	12,20
C3	5,43	3,26	3,06	2,75	5,90	2,86	5,19
C4	2,81	1,84	1,39	1,55	2,13	1,16	1,80
C5	1,30	0,74	0,72	0,44	0,77	0,27	0,43
C6 ⁺	1,40	0,42	0,30	0,44	0,44	0,07	0,18
N ₂	1,39	1,51	1,43	1,62	0,80	1,16	11,12
CO ₂	2,74	1,97	0,81	0,24	0,50	0,23	0,20
H ₂ S (mg/m ³)	1,50	7,50	7,60	7,50	6,70	Traços	---

2.3.2 Processamento do gás natural

O gás natural é processado em unidades denominadas UPGNs (Unidade de Processamento de Gás Natural), nas quais ocorre a remoção dos contaminantes da corrente de gás natural bruto, o resfriamento e posterior fracionamento das correntes de interesse. Basicamente, o processamento do gás natural tem como objetivo a separação dos seus componentes em produtos especificados de maior valor agregado (Fig. 2.2), para que possam ser utilizados em suas aplicações específicas finais.

Dentre esses produtos estão: o gás combustível, que por sua vez pode ser denominado como gás seco, gás industrial, gás residual, etc, utilizado em equipamentos térmicos industriais; uma corrente composta apenas de etano ou propano petroquímicos, que são matérias-primas para a fabricação de polietilenos e polipropilenos; o gás liquefeito de petróleo (GLP), utilizado no âmbito domiciliar; e uma corrente mais pesada (fração C5+), que é denominada gasolina natural e que por não possuir especificação definida, é encaminhada para correntes de petróleo de unidades de fracionamento de petróleo.

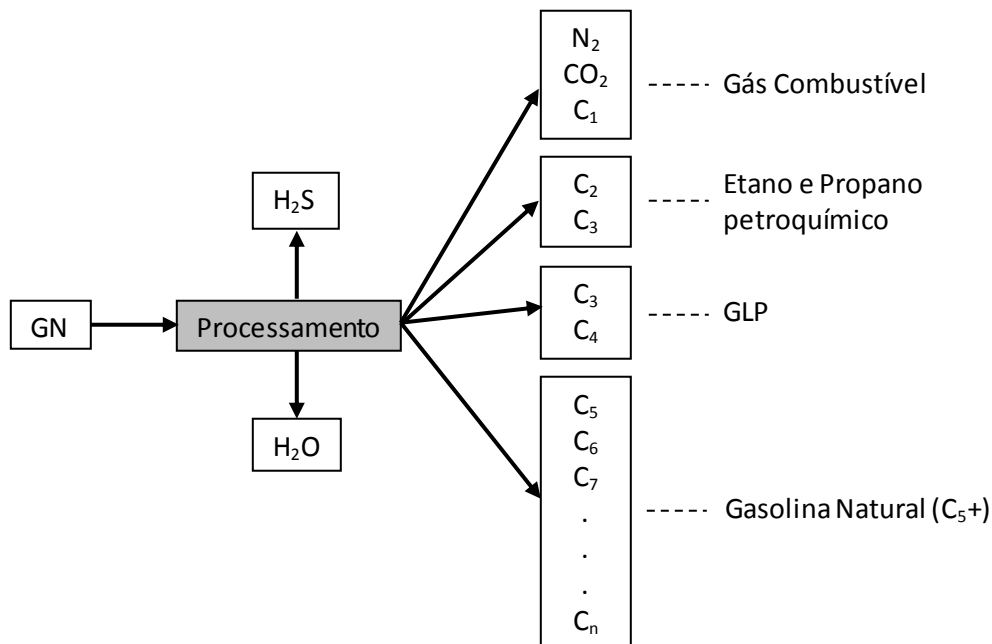


Figura 2.2: Produtos obtidos após o processamento do gás natural.

Uma UPGN pode ser dividida em duas áreas principais, denominadas área fria e área quente. Na primeira ocorre a liquefação dos componentes mais pesados da corrente do gás natural, onde é gerada uma fração líquida de alto valor agregado. Essa área opera com baixas temperaturas, como sugere o nome, e altas pressões. Na segunda, ocorre o fracionamento da corrente obtida na área fria, gerando os produtos finais com especificação bem definida. Opera, em geral, com temperaturas mais altas e pressões mais baixas do que a área fria.

Além das áreas quente e fria, uma UPGN conta com sistemas de tratamento de carga e produtos e sistemas auxiliares. O sistema de tratamento de carga e produtos é responsável por garantir a qualidade dos produtos obtidos e também pela especificação da carga de gás natural bruto que entra na unidade. Os chamados sistemas auxiliares são sistemas de aquecimento a óleo térmico, de refrigeração por compressão de propano, de desidratação de gás natural, entre outros. Em geral, são responsáveis pela geração das condições necessárias para a operação das áreas principais.

2.3.3 Tipos de Processo

O processo termodinâmico adotado em uma UPGN é o que define as características da unidade. Ele é o responsável pela geração de criogenia (baixas temperaturas), ponto mais importante de uma unidade de processamento de gás natural. A escolha do processo termodinâmico depende tanto de fatores técnicos como econômicos. São analisados pontos como composição do gás, pressão disponível, recuperação desejada, além da distância dos centros consumidores, da disponibilidade de equipamentos e custos operacionais. De uma forma geral, quanto mais rigorosas as especificações dos produtos requeridos, maior será o investimento necessário, pois será preciso utilizar-se de tecnologias mais refinadas, com sistemas de controle mais complexos e equipamentos mais eficientes.

Atualmente os processos utilizados no mundo em projetos de UPGNs são o processo Joule – Thomson, o Processo de Refrigeração Simples, o Processo de Absorção

Refrigerada e o Processo de Turbo – Expansão (Vaz, Maia e Santos, 2008)(Vaz, Maia e Santos, 2008)(Vaz, Maia e Santos, 2008)).

Processo Joule – Thomson

Consiste na redução de temperatura na corrente de gás natural através de uma expansão isentálpica em uma válvula de controle de pressão, acarretando a liquefação dos componentes mais pesados da corrente de entrada. É o mais simples e barato dos processos e também o mais restrito, devido às suas limitações técnicas. Ele é normalmente utilizado em processos onde a composição do gás natural já está bem próxima da especificação e necessita apenas de um ajuste do ponto de orvalho do gás. Tem como características a baixa eficiência de performance e o baixo nível de recuperação de propano, tendo em contrapartida um baixo custo de instalação e manutenção.

Processo Refrigeração Simples

Neste processo ocorre a liquefação das frações mais pesadas do gás natural devido à troca térmica com um fluido refrigerante. Em geral esse fluido é o propano, que é produzido na própria unidade através do gás natural. Devido às baixas temperaturas atingidas, o gás natural deve ser desidratado antes de entrar nos trocadores de calor para evitar a formação de hidratos, que podem gerar obstruções nas linhas. Isso se faz através da injeção de monoetilenoglicol (MEG), que funciona como agente desidratante em um ciclo fechado, pois o MEG é regenerado em um sistema auxiliar. É um processo simples e que exige investimento intermediário em relação aos demais tipos. Unidades que utilizam este processo normalmente têm como objetivo principal apenas a especificação do gás combustível.

Processo Absorção Refrigerada

O processo se dá através da combinação de etapas de refrigeração e de absorção. Neste processo ocorre a remoção das frações mais pesadas por liquefação devido à troca de calor com um ciclo de propano, e em parte devido à absorção provocada pela passagem em contracorrente do gás natural com um solvente adequado. Assim como na refrigeração simples, o gás natural precisa ser desidratado antes de ser resfriado. É um processo de alto rendimento na recuperação de propano, capaz de garantir a especificação das correntes mais leves, porém, pelo seu maior nível de complexidade, necessita de investimentos mais altos que os processos apresentados anteriormente.

Processo Turbo – Expansão

O processo de Turbo–Expansão é o mais eficiente dos processos termodinâmicos utilizados em UPGNs atualmente. Possui excelente recuperação de propano e é o único processo capaz de separar etano petroquímico com alta pureza, de forma que o gás combustível gerado é composto basicamente por metano. Por estas características, possui um alto custo e exige altas vazões (igual ou acima de 2,5 Mm³/d) para que se tenha retorno adequado de investimento.

O processo ocorre pela liquefação dos componentes mais pesados do gás natural através da expansão em uma turbina, a qual libera energia (trabalho) que é aproveitada para acionar um compressor auxiliar do sistema de compressão do gás combustível.

Devido à redução de temperatura proporcionada pela expansão isentrópica, o processo consegue atingir temperaturas abaixo de -95°C , permanecendo apenas o metano na fase gasosa. A corrente bifásica é encaminhada para uma torre desmetanizadora na qual ocorrerá a separação, no topo, do gás combustível constituído praticamente de metano apenas, e uma corrente de fundo composta pela fração C_2+ , que segue para fracionamento.

No caso de correntes ricas em componentes pesados (acima de 8% em volume), a unidade recebe auxílio de um ciclo de refrigeração a propano a fim de propiciar a liquefação das frações pesadas, de modo a não comprometer o desempenho da etapa de expansão no turbo-expansor.

3 Estudo de caso

As análises e os dados apresentados neste trabalho são baseados na simulação estacionária de uma UPGN, implementada no software Aspen Plus V7.2 (Aspentech Technology), anteriormente desenvolvida pelo grupo GIMSCOP do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Na implementação da simulação, optou-se por utilizar o modelo de propriedades termodinâmicas Peng-Robinson, por ser um modelo que representa satisfatoriamente o comportamento misturas de hidrocarbonetos.

A unidade de processamento de gás natural representada na simulação é baseada em unidade industrial real que emprega o processo de turbo-expansão. Além da turbo-expansão, os processos de resfriamento e de separação da carga são abordados pela simulação e, apesar de não constar na mesma, o processo paralelo de refrigeração por compressão de propano também é abordado na análise, devido a sua contribuição na obtenção das condições necessárias à separação dos produtos.

3.1 Descrição do processo

O objetivo principal desta unidade é o processamento do gás natural, previamente tratado pelo sistema auxiliar de pré-tratamento de carga, e a consequente separação nos produtos de interesse, sendo estes o gás combustível, o GLP, a gasolina natural e uma corrente de propano que será utilizada no ciclo de refrigeração da planta.

O processo é constituído por uma etapa de resfriamento, composta por uma série de trocadores de calor, por uma etapa de turbo-expansão e, por fim, pelas etapas de separação. Um esquema simplificado do processo pode ser observado na Figura 3.1.

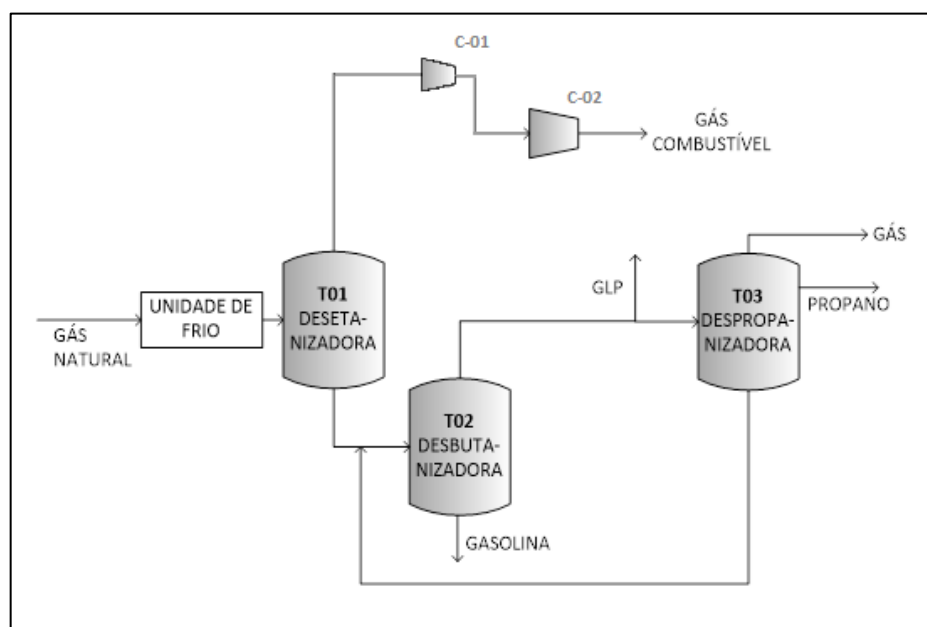


Figura 3.1: Fluxograma simplificado do processo utilizado na UPGN.

O gás natural entra no sistema com pressão de 68,1 bar e temperatura de 55 °C, e a sua composição é dada pela Tabela 3.1. As composições, pressões e temperaturas dos produtos obtidos podem ser encontradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1: Composição do gás natural carga da UPGN.

Componente	Composição (% molar)
Nitrogênio	1,9
Dióxido de Carbono	1,1
Metano	76,5
Etano	11,0
Propano	5,1
i-Butano	1,1
Butano	1,6
i-Pentano	0,4
Pentano	0,6
Hexanos	0,5
Heptanos	0,2
Octanos	0,03
Nonanos	0,01

Tabela 3.2: Composição, pressão e temperatura das correntes obtidas na simulação do processamento do gás natural.

Composição (% molar)	Gás Combustível	GLP	Propano	Gasolina Natural
P (bar)	68,6	24,7	21,5	13,6
T (°C)	127,4	46,6	59,8	49,1
Nitrogênio	2,1	-	-	-
Dióxido de Carbono	1,2	-	-	-
Metano	85,1	-	-	-
Etano	11,6	6,7	1,4	-
Propano	-	58,4	98,6	-
i-Butano	-	14,0	-	-
Butano	-	20,7	-	0,4
i-Pentano	-	0,1	-	23,6
Pentano	-	0,1	-	35,0
Hexanos	-	-	-	27,7
Heptanos	-	-	-	11,0
Octanos	-	-	-	1,7
Nonanos	-	-	-	0,6

3.1.1 Sistema de resfriamento de gás natural

O sistema de resfriamento de gás natural consiste em uma série de trocadores de calor nos quais se objetiva a refrigeração até a liquefação parcial do gás natural, de forma que ele possa chegar ao turbo-expansor com a menor temperatura possível, bem como realizar o aproveitamento da energia térmica de algumas correntes, otimizando assim o consumo de energia. O fluxograma do sistema de resfriamento é apresentado na Figura 3.2 e as temperaturas e pressões de algumas correntes presentes neste processo podem ser encontradas na Tabela 3.3.

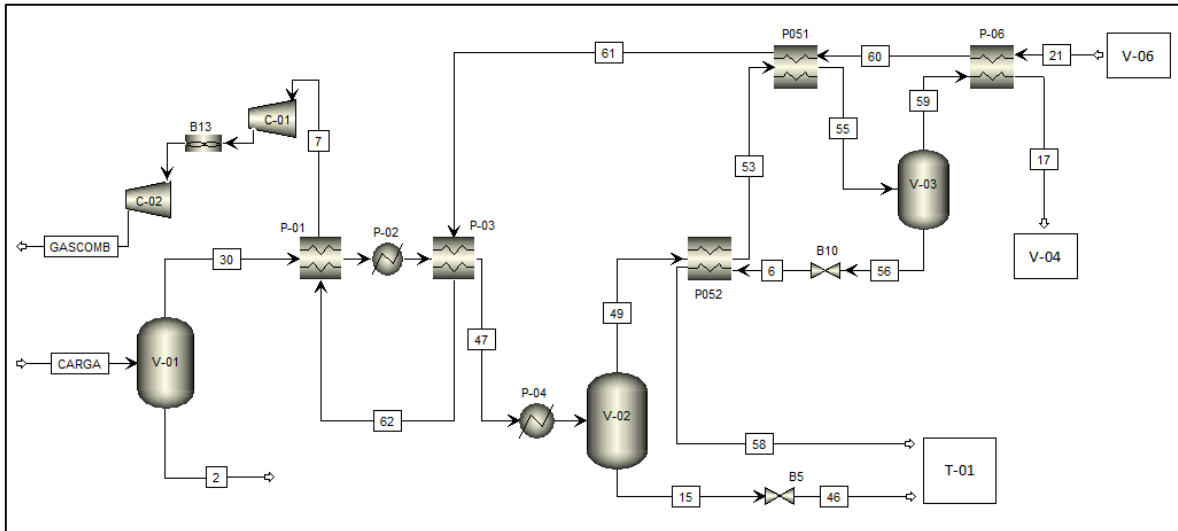


Figura 3.2: Fluxograma do sistema de resfriamento da UPGN.

Tabela 3.3: Temperatura e pressão de algumas das correntes da etapa de resfriamento do gás natural.

Corrente	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
CARGA	55,0	68,1
7	46,8	25,6
17	-42,0	67,1
21	-66,8	25,6
46	-35,5	26,2
58	-19,8	26,0
GASCOMB	127,6	68,6

O gás natural, efluente da unidade de pré-tratamento, passa por uma sequência de quatro resfriadores: P-01, P-02, P-03, e P-04. O primeiro e o terceiro são trocadores do tipo gás-gás, no qual o fluido de troca térmica é o gás combustível obtido no topo da torre de desetanização (T-01), enquanto que o segundo e o quarto são trocadores nos quais o propano proveniente do ciclo de refrigeração atua como fluido refrigerante.

Após a passagem pelo quarto permutador, a corrente de gás natural parcialmente liquefeita flui para o vaso V-02 (1º separador de gás natural) onde ocorre a separação das fases líquida e gasosa. A corrente de fundo deste vaso (46), após expansão e vaporização parcial, alimenta lateralmente a torre desetanizadora (T-01).

A corrente gasosa proveniente do V-02 é então resfriada e onde flui para o V-03 (2º separador de gás natural). A corrente de gás natural do topo do V-03 sofre novo resfriamento, seguindo, então, para o vaso separador de gás para o turbo-expansor (V-04). A corrente líquida do V-03, após expansão (6), é aquecida no P-052 e enviada para a T-01.

3.1.2 Turbo-expansor (T.E.)

O turbo-expansor consiste em um equipamento mecânico contendo um rotor no qual o gás natural movido por um elevado diferencial de pressão (aproximadamente 40 bar) incide diretamente sobre as palhetas do rotor, à alta velocidade, gerando movimento de rotação. A expansão que ocorre no equipamento provoca uma queda brusca de temperatura do próprio gás natural, de forma que as frações mais pesadas são liquefeitas, originando a partir daí o líquido de gás de natural (LGN) e o gás combustível. Na Figura 3.3 pode-se observar o fluxograma do sistema de resfriamento no qual a etapa de turbo-expansão (TE -01) está inserida, e na Tabela 3.4 encontram-se as temperaturas e pressões de algumas das correntes envolvidas no processo.

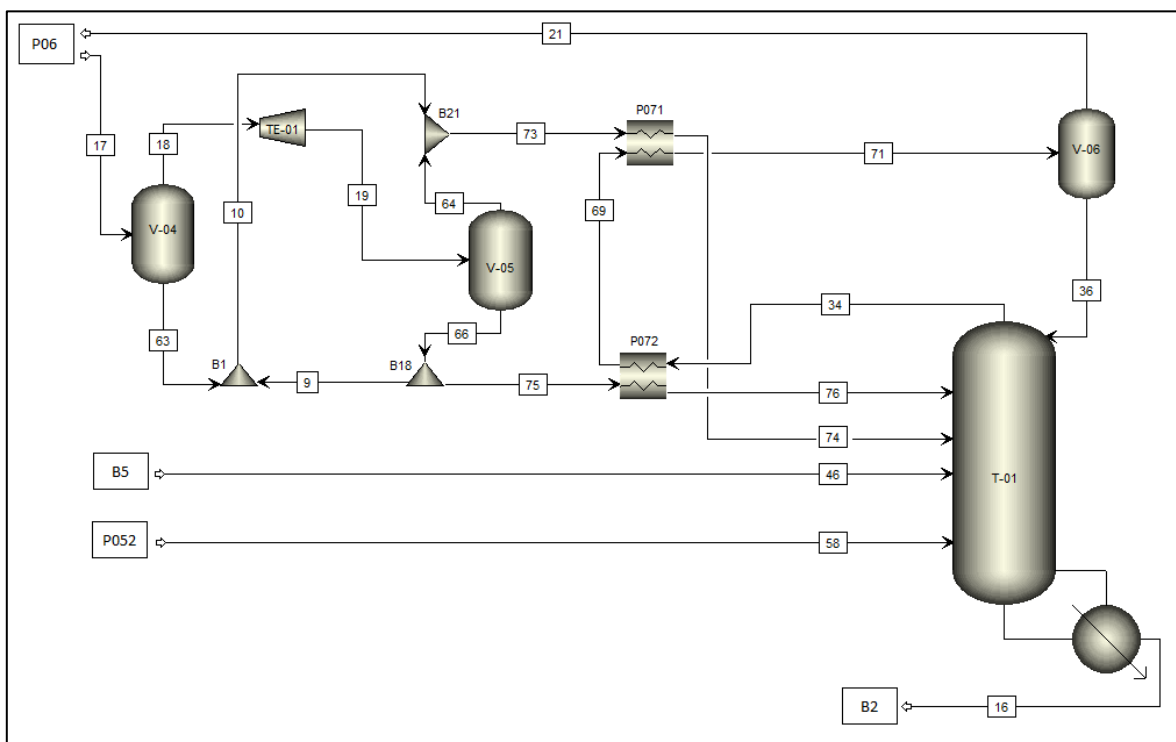


Figura 3.3: Fluxograma do processo de turbo-expansão e do sistema de desetanização.

Tabela 3.4: Temperatura e pressão de algumas das correntes das etapas de turbo-expansão e desetanização.

Corrente	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
16	89,9	25,5
17	-42,0	67,1
18	-42,2	66,8
19	-77,7	26,1
21	-66,8	25,6
34	-60,0	25,5
36	-66,8	25,6
46	-35,5	26,2
58	-19,8	26,0
74	-66,8	26,6
76	-62,4	26,6

Para aproveitar a energia gerada pelo T.E., o mesmo é acoplado ao eixo do primeiro compressor de gás combustível (C-01). As correntes resultantes, após fracionamento nos vasos separadores, V-04 e V-05, são alimentadas em diferentes pratos T-01.

3.1.3 Sistema de desetanização

O sistema de desetanização tem como objetivo realizar a destilação das frações mais leves do LGN, de tal forma que a contaminação deste pelo etano fique em níveis que possibilite o seu processamento na torre desbutanizadora e, conseqüentemente, do GLP na torre despropanizadora. A torre de destilação desetanizadora (T-01) possui 44 pratos e opera a uma pressão de aproximadamente 25,8 bar, e a carga térmica necessária ao processo de destilação é fornecida pela troca de calor com óleo térmico. O fluxograma desta etapa do processo pode ser observado na Figura 3.3, enquanto que as especificações das correntes podem ser encontradas na Tabela 3.4.

O fluxo de topo da T-01 (gás combustível) é enviado a uma sucessão de permutadores dispostos em contra-corrente com o gás de carga e, posteriormente, é encaminhada aos compressores C-01 e C-02, nos quais ocorre a recuperação de pressão do gás para comercialização. Parte do gás comprimido é utilizado como combustível na geração de energia para aquecer o óleo térmico que cede calor às torres de destilação da UPGN através dos *reboilers*. A corrente de fundo da T-01 alimenta o sistema de desbutanização.

3.1.4 Sistema de desbutanização

O sistema de desbutanização tem como objetivo o fracionamento do LGN em duas correntes: GLP (fase gás) e corte C₅₊ (gasolina natural). Além desta função, o sistema visa otimizar o corte de GLP, de forma que ele incorpore o máximo de etano e frações pesadas sem, no entanto, sair das especificações. A torre desbutanizadora (T-02) possui 29 pratos e opera a uma pressão de 14,8 bar, com alimentação no prato 11. A carga térmica necessária ao processo de destilação é fornecida pelo *reboiler* através da troca de calor com óleo térmico. Na Figura 3.4, pode-se observar o fluxograma dos sistemas de desbutanização e despropanização, enquanto que, na Tabela 3.5, as temperatura e pressões de algumas das principais correntes desta etapa são dadas. O fluido quente do permutador P-09 é o produto de fundo da T-02.

A gasolina natural, produto de fundo da T-02, passa por resfriamento para posterior envio para estocagem. O GLP, efluente do topo da coluna, é misturado com a corrente 11 (fundo da torre despropanizadora), é condensado no *air cooler* P-10 e na sequência, acumulado no vaso V-07, de onde é dividido em três novas correntes: refluxo para a T-02, carga da torre despropanizadora (43) e produto final para estocagem. Além destas três correntes, existe a possibilidade de alinhar GLP para a carga da UPGN.

3.1.5 Sistema de despropanização

O objetivo do sistema de reposição de propano é produzir propano refrigerante especificado, utilizado como fluido refrigerante na UPGN, a partir do GLP produzido na torre desbutanizadora (T-02). A torre despropanizadora (T-03) possui 30 pratos e opera a uma pressão de 21,8 bar. A carga térmica necessária ao processo de destilação é fornecida pelo *reboiler* através da troca de calor com óleo térmico. O fluxograma desta etapa e as temperaturas e pressões de algumas das correntes que compõem o sistema de despropanização podem ser observados na Figura 3.4 e na Tabela 3.5, respectivamente.

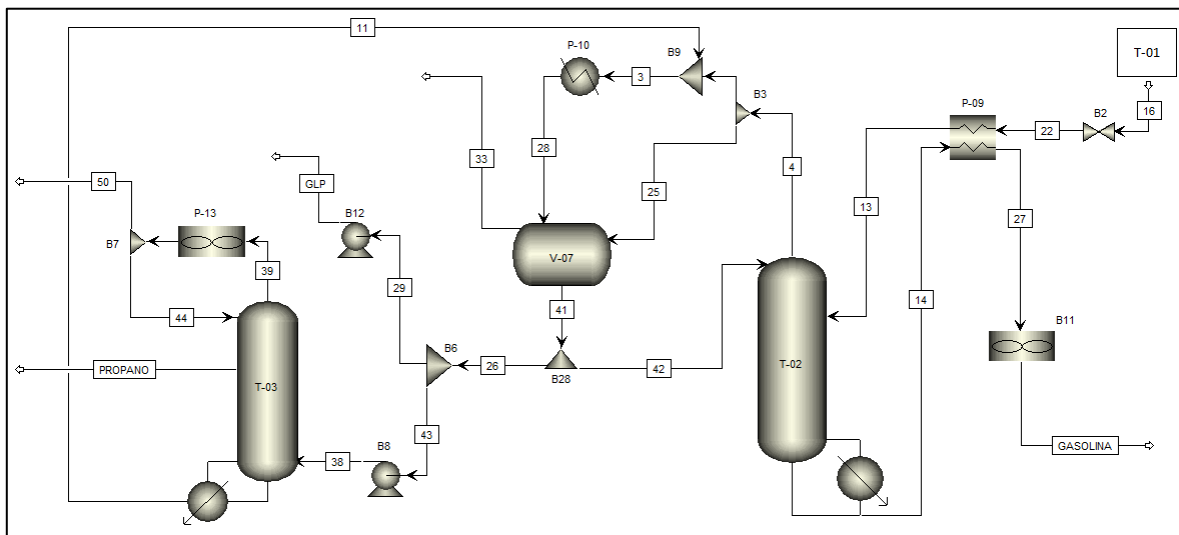


Figura 3.4: Fluxograma das etapas de desbutanização e despropanização.

Tabela 3.5: Temperaturas e pressões de algumas das correntes das etapas de desbutanização e despropanização.

Corrente	Temperatura (°C)	Pressão (bar)
4	63,5	14,6
11	85,3	21,5
13	73,9	15,2
14	161,6	14,6
38	47,7	25,2
39	48,1	21,5
44	45,6	21,5
PROPANO	60,0	21,5
GLP	46,8	24,7
GASOLINA	45,1	13,6

O destilado da T-03, composto por propano e etano, sai pelo topo da coluna, e após ser resfriado, a corrente pode retornar integralmente à coluna ou recompor a carga da UPGN, conforme as condições do processo. O produto de fundo da T-03 retorna ao processamento do GLP (torre desbutanizadora). A retirada do propano especificado ocorre lateralmente, pelo prato número 10.

4 Metodologia

A metodologia adotada para se efetuar o estudo da eficiência energética da unidade, através da obtenção de um índice de eficiência que corresponda satisfatoriamente a variações ocorridas no processo, consiste em duas etapas, essencialmente. A primeira envolve a obtenção dos dados necessários aos cálculos das eficiências e aplicá-los em algumas expressões adaptadas da literatura, e a segunda, em avaliar a sensibilidade das expressões escolhidas frente a variações no processo. O procedimento foi desenvolvido inicialmente com os dados obtidos na simulação do caso nominal de operação da unidade.

4.1 Definição do volume de controle

Para o procedimento dos cálculos envolvidos na análise energética da unidade, é necessário definir-se um volume de controle, através do qual fluirão matéria e energia associados à variação de exergia do sistema de interesse. No caso da UPGN representada na simulação, o volume de controle engloba os sistemas de resfriamento, turbo-expansão e separação, além do sistema de refrigeração por compressão de propano. O volume de controle adotado é apresentado na Figura 4.1, tendo como fluxos de interesse aqueles apresentados pela Tabela 4.1.

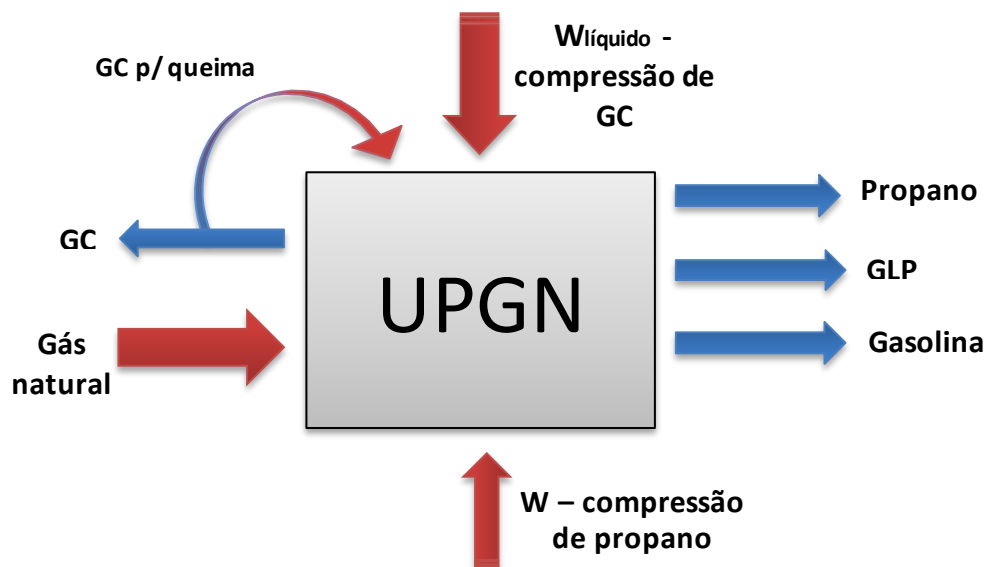


Figura 4.1: Fluxos de matéria e energia associados à variação de exergia, para o volume de controle escolhido.

Tabela 4.1: Fluxos de exergia de interesse para a análise energética.

Entradas	Gás Natural
	GC p/ queima
	Trabalho líquido fornecido à compressão de GC
	Trabalho fornecido à compressão de propano

Saídas	GC
	Propano
	GLP
	Gasolina

4.2 Obtenção de dados

4.2.1 Exergia química

O cálculo da exergia química para as correntes do processo necessita dos dados de exergia de componentes puros e das frações molares de cada componente na corrente. A parcela da exergia química dos componentes puros deve ser aquela calculada para os valores de temperatura e pressão ambientes. Neste trabalho foram utilizados valores tabelados por Morris e Szargut (1985), quando estes eram disponíveis para as espécies envolvidas no processo, enquanto que os demais foram calculados pela Equação 2.16. Dos 13 componentes do gás natural processado na UPGN, apenas o isobutano e o isopentano tiveram as suas exergias químicas calculadas. Os valores da exergia química específica dos componentes puros usados nos cálculos da exergia química das correntes são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Exergia química específica dos componentes envolvidos no cálculo da exergia química das correntes do processo ($T = 298,15 \text{ K}$ e $P = 1 \text{ atm}$).

Componente	Exergia Química (kJ/kmol)
Oxigênio	3970
Água líquida	900
Nitrogênio	720
Dióxido de carbono	19.870
Metano	831.650
Etano	1.495.840
Propano	2.154.000
i-butano	2.800.098
Butano	2.805.800
i-pentano	3.453.850
Pentano	3.463.300
Hexanos	4.118.500
Heptanos	4.761.700
Octanos	5.413.100
Nonanos	6.064.900

As energias de Gibbs necessárias ao cálculo foram obtidas através do software AspenPlus®, o qual utiliza o banco de dados do NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Na Tabela 4.3 encontram-se as energias livres de Gibbs utilizadas no cálculo das exergias do isobutano e isopentano, sendo estas as energias livres de Gibbs padrão de

formação, por se tratarem de valores à temperatura e pressão ambiente padrão ($T = 298,15 \text{ K}$ e $P = 1 \text{ atm}$).

Dispondo-se das exergias específicas dos componentes puros, as exergias químicas específicas podem ser calculadas através da Equação 2.18. As frações molares dos componentes para cada corrente, necessárias ao cálculo, podem ser encontradas na Tabela 3.2.

Tabela 4.3: Energia livre de Gibbs de formação das espécies envolvidas no cálculo da exergia do isobutano e do isopentano.

Componente	Energia de Gibbs de formação (kJ/kmol)
Oxigênio	0
Dióxido de carbono	-394.380
Água líquida	-237.180
i-butano	-21.497
i-pentano	-14.120

4.2.2 Exergia termomecânica

O cálculo da exergia termomecânica das correntes do processo é realizado através da Equação 2.12, a qual requer o conhecimento prévio das entalpias e entropias das correntes. Estas propriedades foram obtidas utilizando-se a ferramenta *Properties Analysis* do software AspenPlus®, no qual, para cada corrente, o software realiza o cálculo das propriedades selecionadas (entalpia e entropia) em função de pressão, temperatura e frações molares de cada componente. As análises foram efetuadas tanto para as pressões e temperaturas de processo, quanto para aquelas das condições ambientes

As taxas de exergias química e termomecânica das correntes de interesse para a análise estão reunidas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Taxas de exergia química e termomecânica das correntes de interesse do estudo.

Corrente	Exergia Química (kW)	Exergia Termomecânica (kW)	Total (kW)
Carga	1.010.875	10.145	1.021.020
GC	755.064	12.516	767.583
GC p/ queima	6.571	109	6.677
Propano	5.957	21	5.978
GLP	173.457	498	173.955
Gasolina	63.796	73	63.869

4.2.3 Exergia associada aos fluxos de trabalho recebidos pelo V.C.

Sendo a exergia definida como o trabalho máximo que um sistema pode realizar, todo o trabalho que entra ou sai do volume de controle atua diretamente sobre a exergia do sistema. No decorrer do processo de separação do gás natural, especificamente na etapa de recuperação da pressão do gás combustível, faz-se necessária a adição de trabalho ao

sistema através de compressão. Parte desta energia é proveniente do trabalho obtido no turbo-expansor, sendo ainda necessária a adição de trabalho externo para se alcançar a pressão desejada. O trabalho líquido utilizado nesta etapa do processo acaba sendo, portanto, uma entrada do processo, vindo a aumentar a exergia do sistema, sendo calculado como segue:

$$\dot{W}_{\text{líquido}} = \dot{W}_{C-01} + \dot{W}_{C-02} - \dot{W}_{T.E.} \quad (4.1)$$

O processo recebe, ainda, trabalho para a compressão do propano refrigerante, cuja atuação no processo consiste em resfriar a corrente de gás natural de entrada. O aumento de exergia no processo devido ao trabalho recebido pelo sistema de refrigeração de propano é relacionado com a carga térmica que é retirada nos permutadores P-02 e P-04 através do Coeficiente de Performance (COP), que é definido como sendo a razão entre o calor retirado e o trabalho realizado:

$$COP = \frac{|\dot{Q}_F|}{\dot{W}_{C_3}} \quad (4.2)$$

onde \dot{Q}_F é a taxa de calor retirado nos permutadores P-02 e P-04 e \dot{W}_{C_3} é a taxa de trabalho consumido na compressão do propano refrigerante. O COP desta UPGN foi anteriormente calculado por Eckert (2013), em um estudo realizado no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo o valor determinado de 1,25.

Na Tabela 4.5 encontram-se as taxas de exergia adicionadas ao sistema devido ao trabalho líquido utilizado na compressão do gás combustível e ao trabalho utilizado na compressão do propano, calculado segundo a Equação 4.2.

Tabela 4.5: Taxas de exergia adicionadas ao V.C. devido ao consumo de trabalho.

Etapa	Exergia (kW)
Compressão de GC	2.892
Compressão de C ₃	2.252

4.3 Cálculo das eficiências

Com os dados de exergia das correntes e variação de exergia associada ao trabalho e às trocas de calor com propano, pode-se calcular a eficiência da unidade baseada na 2ª lei da Termodinâmica. Dentre as diversas abordagens da eficiência baseada na disponibilidade do sistema, optou-se por efetuar a análise com um índice de cada categoria. Dois índices foram considerados, adaptados da literatura: eficiência *input-output* (Equação 2.19) e eficiência *consumed-produced* segundo Rian e Ertesvåg (2012) (Equação 2.25).

4.3.1 Eficiência input-output

A eficiência *input-output* engloba todos os fluxos de exergia que entram e saem do volume de controle (Figura 4.1). Através dos valores calculados, na seção anterior, para as

exergias das correntes de entrada e de saída do processo e para os trabalhos fornecido ao sistema, a eficiência *input-output* pode ser calculada conforme a Equação 4.3:

$$\varepsilon = \frac{\sum \dot{E}_{produtos}}{\dot{E}_{feed} + \dot{E}_{GC_{reboilers}}^{CH} + \dot{W}_{C_{GC}} + \dot{W}_{C_{C3}}} \quad (4.3)$$

na qual $\dot{E}_{produtos}$ é a taxa de exergia total dos produtos, \dot{E}_{feed} é a taxa de exergia total da corrente de entrada, $\dot{E}_{GC_{reboilers}}^{CH}$ é a taxa de exergia química do gás combustível utilizado na geração de energia térmica para os *reboilers*, $\dot{W}_{C_{GC}}$ é a taxa de exergia adicionada pelos compressores de gás combustível e $\dot{W}_{C_{C3}}$ é a taxa de exergia adicionada pelo compressor de propano.

4.3.2 Eficiência consumed-produced segundo Rian e Ertesvåg (2012)

Esta eficiência avalia os consumos de exergia e as variações de exergias no processo produzidas à custa do consumo de exergia termomecânica da corrente de entrada, do trabalho fornecido e da exergia química do gás combustível utilizado na geração de energia para aquecimento do óleo térmico. Calcula-se tal eficiência através da Equação 4.4.

$$\varepsilon = \frac{\sum \Delta \dot{E}_{produtos}^{CH} + \sum \dot{E}_{produtos}^{TM}}{\dot{E}_{feed}^{TM} + \dot{E}_{GC_{reboilers}}^{CH} + \dot{W}_{C_{GC}} + \dot{W}_{C_{C3}}} \quad (4.4)$$

na qual $\Delta \dot{E}_{produtos}^{CH}$ é a taxa de exergia de separação das correntes de produtos, $\dot{E}_{produtos}^{TM}$ é a taxa de exergia termomecânica das correntes de produtos e \dot{E}_{feed}^{TM} é a taxa de exergia termomecânica da corrente de entrada.

Além das exergias termomecânicas das correntes de entrada e de produtos, fez-se necessário determinar a exergia de separação das correntes, ΔE_k^{ch} , para o qual a Equação 2.26 foi utilizada. Os valores calculados para a exergia de separação das correntes de produtos encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Taxas de exergias de separação das correntes de produtos.

Corrente	Exergia de separação (kW)
GC	214
Propano	20
GLP	420
Gasolina Natural	166

4.4 Análises de sensibilidade no processo

Os testes de sensibilidade feitos sobre os índices de eficiência têm o intuito de verificar a validade dos mesmos frente a variações do processo. Esses testes foram realizados a partir da simulação estacionária no software AspenPlus®, através da opção *Sensitivity* do menu *Model Analysis Tools*. Esta opção do AspenPlus® permite que se obtenham resultados da simulação apenas para variáveis de interesse, previamente

determinadas, efetuando simulações nas quais são variados parâmetros, também, previamente selecionados.

Testaram-se parâmetros passíveis de variações na simulação, em contrapartida a parâmetros que são fixados que, conseqüentemente, não permitem análises de sensibilidade frente ao processo. Desta forma, determinaram-se dois parâmetros do processo para serem variados: a carga térmica cedida no *reboiler* da torre desetanizadora (T-01) e a vazão de produto de fundo da torre despropanizadora (T-03), utilizada como reciclo indireto da torre T-02. Os intervalos de variações podem ser observados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Intervalos de variação dos parâmetros nas análises de sensibilidade.

Parâmetro	Ponto nominal de operação	Intervalos de variação	Número de simulações
Carga térmica cedida pelos <i>reboilers</i> da torre T-01	3.477 kW	2.781 a 4.172 kW	4
Vazão de fundo da torre T-03	40,3 kmol/h	35 a 45 kmol/h	4

5 Resultados

5.1 Cenário de operação em condições normais da UPGN

O primeiro caso de estudo para o cálculo da eficiência exergética da unidade foi realizado sob as condições normais de processo, isto é, antes de se provocarem variações no processo. A carga térmica cedida no *reboiler* da torre T-01 é de 3.477 kW e a vazão de produto de fundo da torre T-03 é fixada em 40,3 kmol/h. Os dados calculados para esse caso são aqueles apresentados no Capítulo 4.

5.1.1 Eficiência input-output

As taxas de exergias que constituem os fluxos de entrada e de saída do volume de controle estão reunidas na Tabela 5.1. A eficiência *input-output* para estes dados de processo foi calculada em 97,9%.

Tabela 5.1: Taxas de exergias de entrada e de saída do volume de controle.

Exergias de entrada (kW)	
Compressores GC	2.892
Compressor C ₃	2.252
E ^{CH} da corrente de carga	1.010.875
E TM da corrente de carga	10.145
E ^{CH} do GC para geração de energia	6.571
Exergias de saída (kW)	
ΣE^{CH} das correntes de saída	998.274
ΣE^{TM} das correntes de saída	13.107

Conforme o esperado, o valor obtido para esta eficiência é elevado. Isto é justificado pela manutenção da parcela da exergia química dos componentes de processo, que, conforme exhibe a Tabela 5.1, são as exergias de maior magnitude.

5.1.2 Eficiência consumed-produced segundo Rian e Ertesvåg (2012)

As taxas de exergias consumidas e produzidas no processo, que constituem o denominador e o numerador da Equação 4.4, respectivamente, estão reunidas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Taxas de exergias consumidas e produzidas no volume de controle.

Exergia consumida (kW)	
Compressores GC	2.892
Compressor C ₃	2.252
E TM da corrente de carga	10.145
E ^{CH} do GC para geração de energia	6.571
Exergia produzida (kW)	
$\Sigma \Delta E^{CH}$ das correntes de saída	820
ΣE^{TM} das correntes de saída	13.107

O valor obtido para esta eficiência, através das Equação 4.4 foi de 63,7%, que, conforme o esperado é menor do que aquele encontrado pela Equação 4.3. Isto se deve ao termo de exergia de separação ($\Delta \dot{E}_{produtos}^{CH}$), o qual elimina a taxa de exergia química dos componentes que é invariável durante o processo.

5.2 Análises de sensibilidade

As análises foram realizadas sobre as variáveis que têm impacto direto no cálculo das exergias, isto é, correntes de saída, corrente de gás combustível utilizado na geração de energia térmica, carga térmica requerida nos *reboilers* das torres, permutadores de propano (P-02 e P-04), compressores de GC e turbo-expansor.

Após a obtenção dos dados do processo para os casos simulados na análise de sensibilidade, as exergias químicas das correntes foram recalculadas de acordo com os novos parâmetros. A exergia termomecânica, no entanto, não necessitou de novos cálculos, visto que a temperatura e a pressão das correntes não se alteraram significativamente frente à variação dos parâmetros.

5.2.1 Variação na carga térmica da torre T-01

Eficiência input-output

Para o caso de variação do parâmetro de carga térmica da torre T-01, observou-se que, com o seu crescimento, a exergia das correntes de produtos aumentou até atingir-se o caso base de operação, após o qual as mesmas permaneceram praticamente constantes.

O consumo total de gás combustível para geração de energia térmica variou conforme o previsto, de modo que quanto maior a carga térmica fornecida à torre T-01, maior o consumo de gás combustível. Os valores calculados para as taxas de exergia nesta análise de sensibilidade podem ser observados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Taxa de exergia das correntes de produtos e do gás combustível utilizado na geração de energia térmica, para diferentes valores da carga térmica da torre T-01.

	Carga térmica da T-01 (kW)	$E_{produtos}$ (kW)	$E_{GC_{reboilers}}^{CH}$ (kW)
-20%	2.781	944.376	5.158
-10%	3.129	984.272	5.874
CASO BASE	3.477	1.011.382	6.571
+10%	3.824	1.011.135	6.939
+20%	4.172	1.010.780	7.300

Visto que a exergia da corrente de entrada não varia, e que a parcela de exergia do gás combustível de geração de energia térmica é pequena frente à primeira, as eficiências calculadas pelo método *input-output* cresceram frente ao aumento da carga térmica da T-01 até atingir-se o valor de carga térmica utilizada no caso base, a partir do qual as mesmas se mantiveram aproximadamente constantes. Os resultados podem ser observados na Figura 5.1.

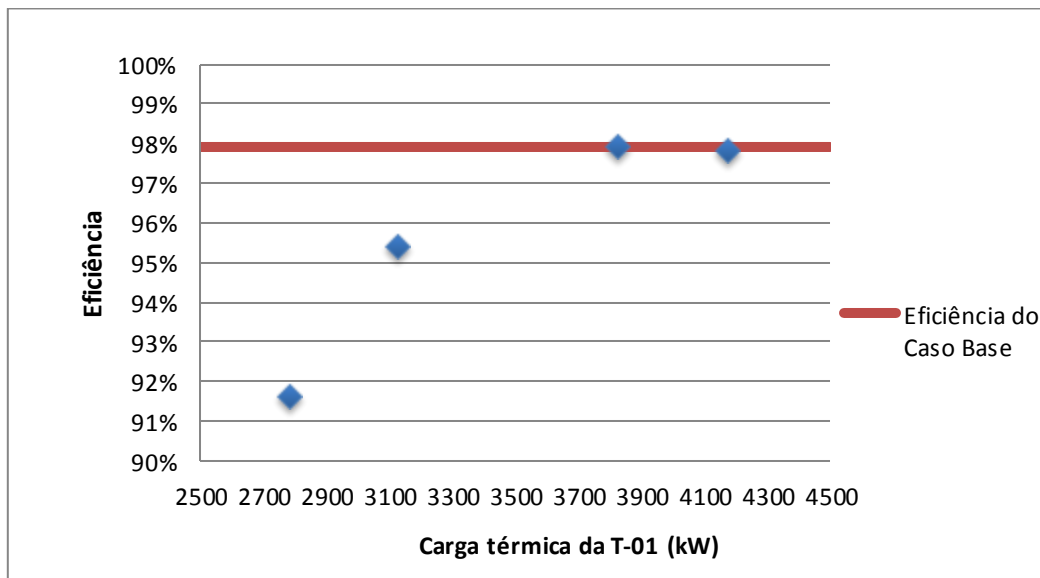


Figura 5.1: Eficiência *input-output* em função da carga térmica da torre T-01.

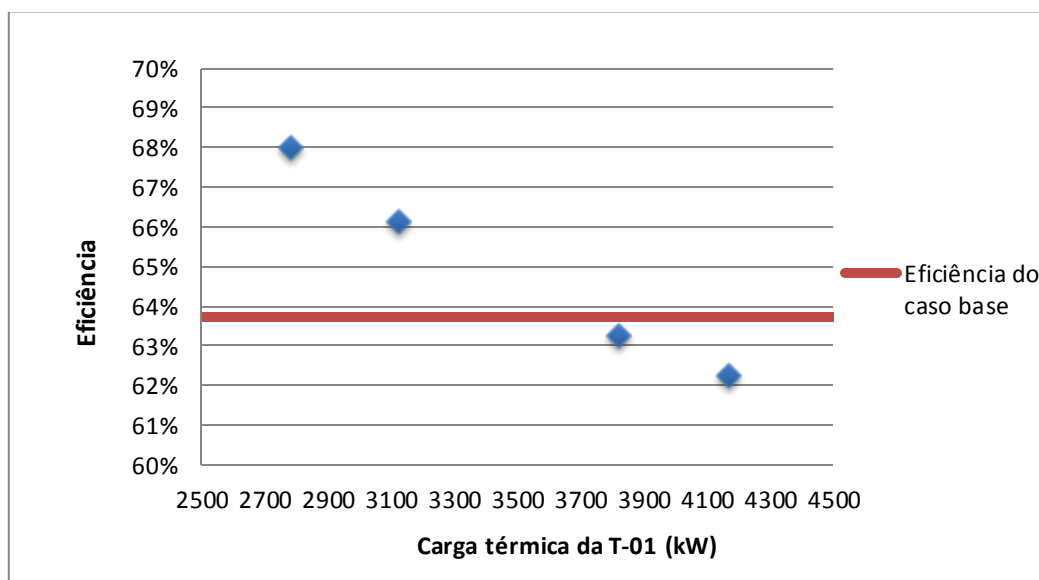
Eficiência consumed-produced segundo Rian e Ertesvåg (2012)

A influência da alteração da carga térmica da torre T-01 sobre a eficiência de *Rian e Ertesvåg (2012)* é observada pela variação da taxa de exergia de separação das correntes de produtos ($\Delta E_{produtos}^{CH}$) e pela variação no consumo de gás combustível para geração de carga térmica, visto que as taxas de exergia termomecânica das correntes de entrada e de produtos se mantêm constantes. As variações das taxas de exergia de separação e de consumo de gás combustível podem ser observadas na Tabela 5.4 e Tabela 5.3, respectivamente.

Tabela 5.4: Taxa de exergia de separação das correntes de produtos, para diferentes valores da carga térmica da torre T-01.

	Carga térmica da T-01 (kW)	$\Delta E_{produtos}^{CH}$ (kW)
-20%	2.781	653
-10%	3.129	740
CASO BASE	3.477	819
+10%	3.824	819
+20%	4.172	819

Observa-se que as taxas de exergia de separação dos produtos cresceram com o aumento da carga térmica da torre T-01, sendo que a partir do valor de carga térmica fornecida no caso base, as mesmas mantiveram-se constantes. Porém, a variação do consumo de gás combustível se mostrou mais significativa para o resultado da eficiência, de modo que esta apresentou tendência negativa frente ao aumento do consumo do mesmo. Os resultados dos cálculos da eficiência *consumed-produced* de Rian e Ertesvåg (2012) estão reunidos na Figura 5.2.

**Figura 5.2:** Eficiência *consumed-produced* segundo Rian e Ertesvåg (2012) em função da carga térmica da torre T-01.

5.2.2 Variação na vazão de produto de fundo da torre T-03

Eficiência input-output

Para este caso observou-se uma tendência de crescimento na exergia das correntes de produtos com o aumento da vazão de fundo da torre T-03.

Já o consumo total de gás combustível para geração de energia térmica variou de forma inversa, visto que, com o aumento da vazão de fundo da torre T-03, uma tendência de redução do mesmo foi observada. Os valores calculados para as taxas de exergia na análise de sensibilidade com a vazão de fundo da torre T-03 podem ser observados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Taxa de exergia das correntes de produtos e do gás combustível utilizado na geração de energia térmica, para diferentes valores de vazão de fundo da torre T-03.

	Vazão de fundo da T-03 (kmol/h)	$E_{produtos}$ (kW)	$E_{GC_{reboilers}}^{CH}$ (kW)
	35,0	1.007.865	7.749
	37,5	1.009.692	7.132
CASO BASE	40,3	1.011.382	6.571
	42,5	1.012.916	6.252
	45,0	1.014.118	6.059

Visto que o efeito do aumento da taxa de exergia dos produtos e a redução da taxa de consumo de gás combustível enviado para a geração de energia afetam positivamente a eficiência, e dado que a exergia de entrada é constante, as eficiências *input-output* apresentaram tendência de crescimento com o aumento da vazão de fundo da T-03. Os valores obtidos para a eficiência *input-output* ao se variar a vazão de fundo da T-03 são apresentados na Figura 5.3.

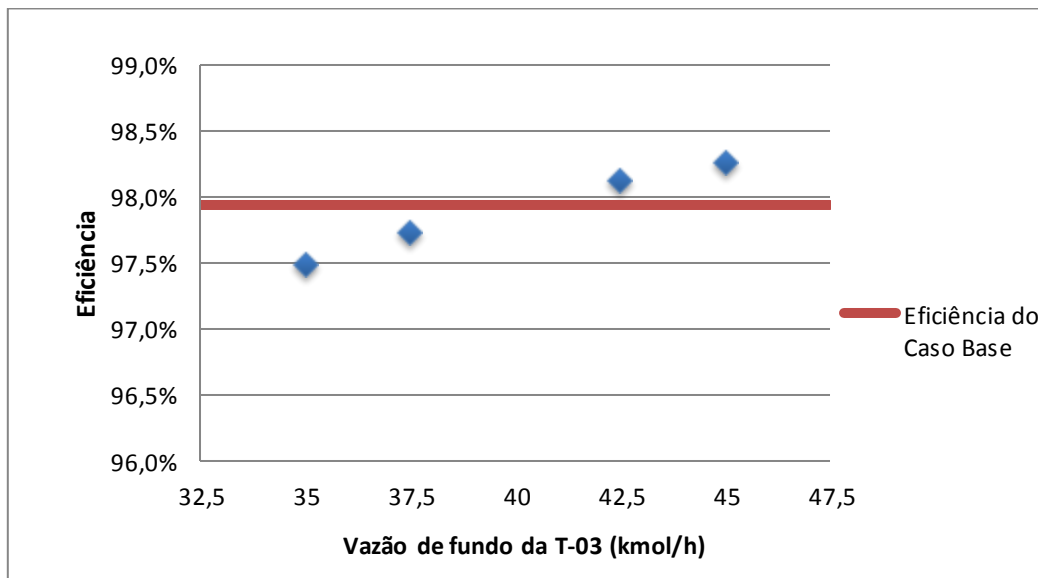


Figura 5.3: Eficiência *input-output* em função da vazão de fundo da torre T-03.

Eficiência consumed-produced segundo Rian e Ertesvåg (2012)

Ao variar-se a vazão de fundo da torre T-03, observou-se que a taxa de exergia de separação manteve-se aproximadamente constante, apresentando apenas uma pequena variação (menor que 1%), como se pode observar na Tabela 5.6. Desta forma, o fator que determinou a variação da eficiência foi o consumo de gás combustível para geração de energia térmica, visto que as taxas de exergia termomecânica das correntes de entrada e de produtos não se alteram com a variação dos parâmetros. As taxas de exergia do gás combustível para consumo interno podem ser encontradas na Tabela 5.5.

As eficiências *consumed-produced* segundo Rian e Ertesvåg (2012), então, cresceram frente o aumento da vazão de fundo da torre T-03. Os valores obtidos são apresentados na Figura 5.4.

Tabela 5.6: Taxa de exergia de separação das correntes de produtos, para diferentes valores de vazão de fundo da torre T-03.

	Vazão de fundo da T-03 (kmol/h)	$\Delta E_{produtos}^{CH}$ (kW)
	35,0	821
	37,5	825
CASO BASE	40,3	828
	42,5	830
	45,0	832

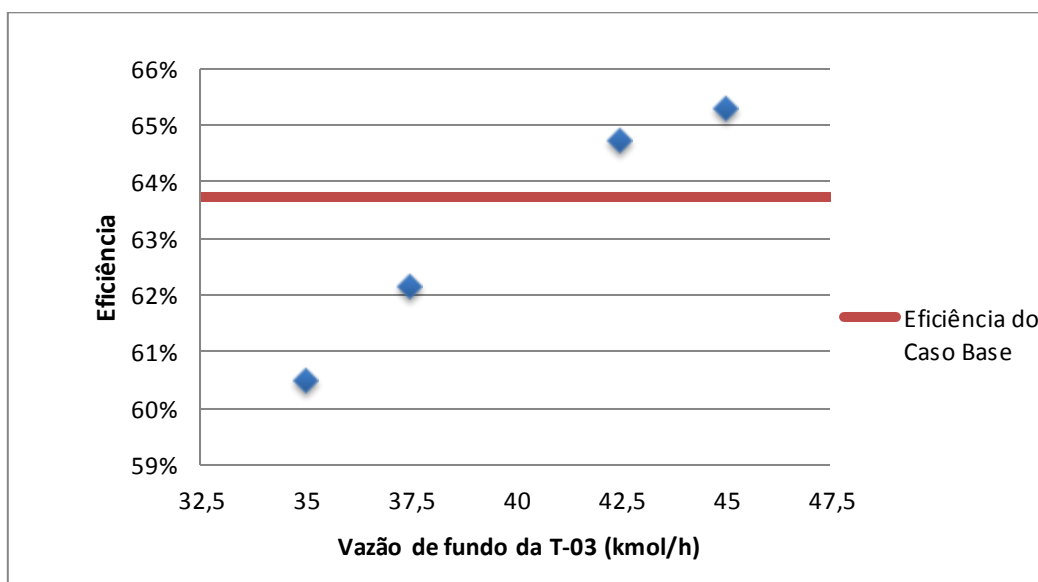


Figura 5.4: Eficiência *consumed-produced* segundo Rian e Ertesvåg (2012) em função da vazão de fundo da torre T-03.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram realizados estudos sobre a eficiência energética de uma UPGN baseados na propriedade termodinâmica exergia. Foram analisados diferentes casos de operação para a unidade, através de análises de sensibilidade, sendo um em seu estado nominal de operação e os outros para situações onde algum parâmetro de processo foi variado.

As eficiências foram calculadas através de duas expressões adaptadas da literatura, das quais para o método *input-output* obteve-se um índice de 97,9% de eficiência e para o método *consumed-produced* obteve-se 63,7%. O alto valor encontrado para a primeira expressão se justifica pela manutenção da parcela da exergia química invariável durante o processo, a qual possui a maior magnitude. A segunda expressão apresenta valores mais baixos por eliminar a mesma, através do termo de separação de exergia das correntes.

As expressões propostas sofreram variações sensíveis nos intervalos de variação dos parâmetros da análise, e através das análises de sensibilidade foi possível se observar a tendência de variação das parcelas de exergias constituintes das expressões utilizadas. Para o método *input-output*, a parcela de exergia química das correntes teve maior influência sobre os resultados em ambos os casos de variação, de modo que quando esta aumentava as eficiências também aumentavam. Para o método *consumed-produced*, tanto a parcela da exergia de separação, quanto a exergia química do gás combustível utilizado na geração de energia térmica, tiveram influências consideráveis. Porém, em ambos os casos, a variação no consumo de gás combustível se mostrou mais importante.

Apesar de os valores obtidos de eficiência calculados através do método *consumed-produced* refletirem de uma forma mais representativa o desempenho da unidade, por eliminarem a parcela de exergia química invariável durante o processo, salienta-se o fato de que ela considera apenas o enriquecimento das correntes de produtos em relação à corrente de entrada, o que tende a gerar um aumento da eficiência. Isto não reflete, porém, as contaminações das correntes com outros produtos, que não os desejados, que podem ocorrer devido a variações no processo, afetando de maneira negativa a especificação das correntes.

Propõe-se para trabalhos futuros a inclusão de um fator de ponderação para os componentes, de forma que se possa definir a influência, positiva ou negativa, dos mesmos em uma dada corrente. Ainda, propõe-se analisar a unidade sob o efeito de recirculações de produtos para a corrente de carga, situações que podem ocorrer em caso de não cumprimento das especificações, além de incluírem-se, na simulação, as etapas referentes ao processo de refrigeração por compressão de propano, de modo que se possam observar os efeitos das variações no processo também nesta etapa.

7 Referências

Eckert, F. S. **Análise da lucratividade em uma unidade de processamento de gás natural**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Curso de Engenharia Química. 2013.

Marmolejo-Correa, D.; Gundersen, T. A comparison of exergy efficiency definitions with focus on low temperature processes. **Energy**, v. 44, n. 1, p. 477-489, 8// 2012. ISSN 0360-5442.

Moran, M. J.; Shapiro, H. N. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. 5th. The Atrium, Southern Gate, Chichester West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd, 2006. ISBN ISBN-13 978-0-470-03037-0 ISBN-10 0-470-03037-2.

Morris, D. R.; Szargut, J. **Standard chemical exergy of some elements and compounds on the Planet Earth**: Pergamon Journals Ltd. 11 1985.

Rian, A. B.; Ertesvåg, I. S. Exergy Evaluation of the Arctic Snøhvit Liquefied Natural Gas Processing Plant in Northern Norway—Significance of Ambient Temperature. **Energy & Fuels**, v. 26, n. 2, p. 1259-1267, 2012/02/16 2012. ISSN 0887-0624.

Sonntag, R. E.; Borgnakke, C.; Van Wylen, G. J. **Fundamentos da termodinâmica**. 6ª edição. 2003. ISBN 85-212-0327-6.

Vaz, C. E. M.; Maia, J. L. P.; Santos, W. G. d. **Tecnologia da indústria do gás natural**. São Paulo, SP - Brasil: Editora Edgard Blücher LTDA. 2008.