

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO RETORNO EM ENERGIA SOBRE ENERGIA INVESTIDA  
DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO

por

George Porto Haeffner

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2012.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DO RETORNO EM ENERGIA SOBRE ENERGIA INVESTIDA  
DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO

por

George Porto Haeffner

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Dra. Marina Seelig

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 10/12/2012.

## AGRADECIMENTOS

Família, obrigado pelos ótimos exemplos!

À minha mãe Jussara, pelo apoio incondicional aliado ao exemplo pessoal e profissional.

Ao meu irmão Christian, homem exemplo de excelente caráter e bom coração.

À minha irmã Mauren, parceira e companheira... Presente em tudo.

Ao colega engenheiro Markus Bonzanini, pelos sete anos de amizade e companheirismo.

HAEFFNER, G. P. Estudo do retorno em energia sobre energia investida do gás natural liquefeito. 2012. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## RESUMO

A quantidade de energia utilizada na exploração do gás natural vem aumentando devido à diminuição da disponibilidade do combustível e à dificuldade na extração do mesmo. Porém, esse aumento na quantidade de energia investida não implica em um conseqüente aumento na energia retornada por ele. No Brasil, aproximadamente metade do volume do gás natural utilizado é importado, sendo metade na forma liquefeita, precisando passar por um processo de regaseificação, que demanda energia. Este trabalho tem como finalidade avaliar o retorno em energia sobre energia investida do gás natural liquefeito através do indicador de sustentabilidade EROEI (*energy returned on energy invested*), que relaciona a razão entre a quantidade de energia disponível do gás natural liquefeito pela quantidade de energia gasta para obtê-lo. Foi considerada uma cadeia do gás natural liquefeito compreendendo exploração, rota tecnológica composta por liquefação, transporte marítimo e regaseificação, e distribuição em um ciclo de potência Brayton-Rankine combinado com três diferentes alternativas para planta de potência. Chegou-se a um valor do índice de 1,9:1, o que significa que é gasto uma unidade de energia para gerar 1,9 unidades de energia elétrica por gás natural liquefeito, o que assinala que esse combustível é pouco sustentável para esse fim.

**PALAVRAS-CHAVE:** EROEI, gás natural liquefeito

HAEFFNER, G.P. Study on the energy return on energy invested for liquefied natural gas. 2012. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## ABSTRACT

The amount of energy used in the exploration of natural gas has increased due to decreased fuel availability and the difficulty in extracting it. However, this increase in the amount of energy invested does not imply a consequent increase in energy returned by him. In Brazil, about half the volume of natural gas used is imported, half in liquefied form, needing to go through a regasification process, which requires energy. This study aims to evaluate the energy return on energy invested for liquefied natural gas through the sustainability indicator EROEI (*energy returns on energy invested*), which relates the ratio between energy available of liquefied natural gas by the amount of energy expended to get it. It was considered as a boundary of liquefied natural gas comprising exploration, technological route consists of liquefaction, shipping and regasification, and distribution in a power cycle Brayton-Rankine combined with three different alternatives for power plant. Came to an index value of 1.9:1, meaning that is spent a unit of energy to produce 1.9 units of electrical energy by liquefied natural gas, which indicates that this fuel is not sustainable for this end.

**KEYWORDS:** EROEI, liquefied natural gas

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
2.1 Gás natural liquefeito.....	1
2.2 Retorno em energia sobre energia investida do gás natural liquefeito .....	2
3. METODOLOGIA.....	4
3.1 Sistema considerado .....	4
3.1.1 Exploração do gás natural .....	5
3.1.2 Rota tecnológica do GNL.....	6
3.1.3 Distribuição.....	7
3.1.3.1 Alternativas para acoplamento entre a planta de regaseificação e o CHP .....	8
3.2 Retorno em energia sobre energia investida .....	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	10
5. CONCLUSÃO.....	12
6. REFERÊNCIAS.....	12

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil importa a metade da demanda nacional de gás natural através do gasoduto Brasil-Bolívia, fato prejudicado devido à instabilidade política do país fornecedor. No mundo, o mercado do gás natural está mais integrado e passa por mudanças estruturais nas rotas comerciais, especialmente devido a regiões instáveis politicamente. Como alternativa ao fornecimento do combustível ao país, surge o gás natural liquefeito [Gosmann, 2011]. Atualmente, o Brasil possui duas plantas de regaseificação de gás natural, e estuda-se a possibilidade de mais unidades, inclusive no Rio Grande do Sul, em Rio Grande. Atualmente o abastecimento é feito por navios metaneiros provenientes de Trinidad e Tobago e recentemente a Petrobras fechou um contrato com a Venezuela para fornecimento do combustível em 2013 [Petrobras, 2012].

Existe uma crescente preocupação com a sustentabilidade das fontes de energia. Um indicador que vem sendo utilizado para avaliar processos sob o ponto de vista sustentável é o retorno em energia sobre energia investida (*energy returned on energy invested*, EROEI), que é a razão entre a quantidade de energia disponível adquirida de uma determinada fonte de energia pela quantidade de energia gasta para a obtenção dessa energia disponível. Quando o EROEI de um processo é menor ou igual a um, a fonte de energia torna-se um "sumidouro de energia", e já não pode ser utilizado como uma fonte primária de energia Gagnan *et al.* [2011]. Fraise [2011] quantificou o declínio do EROEI para o Canadá em relação ao gás natural, em virtude do aumento da dificuldade na exploração e do esgotamento dos combustíveis fósseis tradicionais, e afirmou que oferta e demanda de energia estão ligados por mais do que o preço, porque a oferta de energia é a criação de demanda por mais energia, desenvolvendo ainda mais o setor energético. Por isso, deve-se utilizar o EROEI como indicador de sustentabilidade, em prol do crescimento econômico aliado a preservação do meio ambiente.

Murphy *et al.* [2009] desenvolveu uma metodologia para determinação do EROEI onde é necessário delimitar a fronteira de um sistema e quantificar as entradas e saídas de energia do mesmo, a fim de determinar o indicador de sustentabilidade. Este trabalho tem como finalidade utilizar essa metodologia para estudar o retorno em energia sobre energia investida do gás natural liquefeito (GNL). Estimar a quantidade de energia gasta na cadeia do GNL desde sua exploração até a geração elétrica comparando diferentes processos de regaseificação, determinando assim o mais energeticamente sustentável. Para tal, serão utilizados balanços de massa e fluxos de energia do sistema estudado por Stradioto [2011] cuja fronteira compreende: exploração; rota tecnológica do combustível, considerando as partes de liquefação, estocagem, transporte marítimo, estocagem e regaseificação; distribuição em um ciclo de potência Brayton-Rankine combinado. Dentro da distribuição são apresentadas três diferentes alternativas para comparação para indicação da mais sustentável: acoplamento entre regaseificação e a planta de potência nos estágios de compressão do subciclo Brayton; acoplamento entre a regaseificação e a planta de potência nos estágios de compressão do subciclo Brayton e no condensador do subciclo Rankine, utilizando água como fluido de trabalho; idêntico ao ciclo anterior, utilizando nitrogênio como fluido de trabalho do subciclo Rankine. Será quantificada a energia necessária para exploração, rota tecnológica e distribuição do gás natural, e será relacionada com a quantidade de energia entregue pelo combustível após utilização no ciclo de potência, avaliando assim a energia de retorno para o investimento.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Gás natural liquefeito

O gás natural é um combustível fóssil com base em metano, podendo ser encontrado na natureza de maneira isolada ou associado ao petróleo. Dentre os produtos derivados do

petróleo, tem tido participação crescente na matriz energética nacional, que atualmente consome 60 milhões de metros cúbicos diários de gás, nas condições normais de pressão e temperatura (CNTP), principalmente em função de ser um combustível de qualidade, com alta capacidade energética e nível de poluição mais reduzido pelo baixo nível de enxofre e de particulados existente em sua composição. Metade da produção é nacional e o restante é importado da Bolívia através do gasoduto Brasil-Bolívia. Num cenário mundial de abundância de gás natural, os mercados mais integrados estão passando por mudanças estruturais nas rotas comerciais, especialmente devido às regiões politicamente instáveis. Neste contexto, surge o gás natural liquefeito, que em 2009 chegou a um terço do total transacionado no mundo e em 2010 correspondeu a 23% da oferta de gás importado no Brasil [Gosmann, 2011]. O gás natural é transportado até o consumidor final tanto na forma gasosa, por meio de gasodutos, quanto na forma líquida: ao ser submetido a uma temperatura de  $-162^{\circ}\text{C}$  e pressão de 101 kPa, ele torna-se líquido, o que diminui seu volume para que possa ser transportado em caminhões ou navios metaneiros. Enquanto o gás natural liquefeito tem volume de  $1\text{ m}^3$ , o gás natural gasoso tem volume de aproximadamente  $600\text{ m}^3$ , na CNTP [Petrobras, 2012]. O custo de transporte do gás natural liquefeito torna-se menor do que por gasoduto quando as distâncias superam 3,5 mil quilômetros [Stradioto, 2011].

Apesar da indústria de gás natural ser antiga, ela ganhou importância a partir da década de 1970 com os choques do petróleo, configurando-se como uma boa alternativa ao uso do petróleo. Atualmente a energia gerada por turbinas a gás é responsável por aproximadamente 17,5% da energia gerada no mundo, sendo que as previsões para o ano de 2020 é de que chegará a 30%, [Aneel, 2002]. Para garantir o suprimento confiável, seguro e diversificado, foi criada pelo Conselho Nacional de Política Energética a Resolução nº4 de 24/11/2006, a primeira iniciativa para assegurar a implementação plena das atividades concernentes ao GNL e superação dos possíveis problemas com sua execução [ANP, 2010]. Com base nesse ato administrativo, a Petrobras apresentou dois projetos de terminais de importação de GNL, um em Pecém (CE) e outro na Baía de Guanabara (RJ), com capacidade de regaseificar, respectivamente, 7 e 14 milhões de  $\text{m}^3/\text{dia}$ . Como maiores exportadores de GNL para o mundo, a região da Ásia figura em primeiro lugar e em segundo a África. O Brasil tem como principal fonte para fornecimento de GNL a Nigéria e Trinidad e Tobago. A Petrobras fechou um acordo com a estatal venezuelana PDVSA para importar o equivalente a um milhão de toneladas por ano de GNL a partir de 2013 [Petrobras, 2012].

Como o Rio Grande do Sul é o último estado a ser abastecido pelo gasoduto Brasil-Bolívia e é necessário manter a segurança energética estadual, torna-se importante o estudo sobre o combustível na forma liquefeita, principalmente pela possibilidade futura da instalação da terceira unidade nacional de regaseificação de gás liquefeito da Petrobras, na cidade de Rio Grande.

## **2.2 Retorno em energia sobre energia investida do gás natural liquefeito**

De acordo com Fraise [2011], a indústria do gás natural consome energia extra da rede para manter as elevadas explorações do produto, fazendo com que a sociedade diminua a energia total recebida. Esse aumento da quantidade de trabalho, aço, concreto e combustível consumido pela indústria reduz a energia total destinada à população, atuando como uma pressão de contração na economia global. É preciso energia para produzir energia. A energia líquida é o resultado da energia entregue menos a energia consumida. Para a produção de gás natural a energia é consumida como combustível em sondas de perfuração e veículos e na construção para aquecimento das casas dos trabalhadores e fornecimento de alimentos. Energia líquida é a energia excedente após esses custos serem pagos, disponível para alimentar a economia. Oferta e demanda de energia estão ligados por mais do que o preço, porque a oferta de energia é a consequente criação de demanda por energia. É importante pesquisar qual a energia necessária para produção e exploração de gás natural e somar com as perdas energéticas relacionadas à rota tecnológica do combustível, para relacionar com a energia disponível após utilização do combustível em um ciclo de potência.

Se gasta energia, geralmente na forma de combustível ou eletricidade, para produzir a energia disponível para o consumo. A relação entre a entrada de energia e a energia disponível para uso é um indicador importante. O retorno em energia sobre energia investida é definido para a produção de energia em um processo, tal como um poço de petróleo ou uma mina, como a razão da energia bruta produzida através do processo e a energia necessária para executar o processo. O EROEI age para relacionar o esgotamento dos combustíveis fósseis como fontes de energia em relação ao desenvolvimento de tecnologias para a extração dos mesmos combustíveis, porque quanto mais distante e profunda a busca por combustíveis, maior será o gasto de energia necessário para a exploração, e conseqüentemente o EROEI diminui [Hall *et al.*, 2009].

Murphy *et al.* [2011] apresentaram uma metodologia formal com estrutura e nomenclatura para análise do EROEI, visando comparar vários processos. Abordaram quatro áreas que são de interesse particular dentro da análise: fronteira do sistema em análise, correções de qualidade na energia, conversões econômicas na energia e estatísticas EROEI. Por fim, apresentaram um passo-a-passo instruindo como realizar uma análise EROEI, metodologia utilizada no presente trabalho.

De acordo com Hall *et al.* [2009], o retorno em energia sobre energia investida fornece uma abordagem útil para examinar vantagens e desvantagens na utilização de diferentes combustíveis para produção de energia e também oferece a possibilidade de olhar para o futuro, atuando como ferramenta para auxiliar o que os mercados parecem incapazes de fazer. Eles analisaram a aplicação do EROEI relacionando os combustíveis fósseis com as características econômicas, e quantificaram que o mínimo EROEI é 3:1, para petróleo e etanol de milho desde a exploração até a utilização do combustível, que uma sociedade deve atingir em sua exploração de energia para apoiar a contínua atividade econômica com função social sustentável, devendo ganhar mais energia do que usa para produzir energia. Excedente de energia é definido como a quantidade de energia que sobra após os custos de obtenção da energia a contabilizar, sendo um dos critérios necessários para permitir a sobrevivência e crescimento, movimento, aquecimento e equipamentos de muitas espécies. O EROEI tecnicamente relaciona apenas a energia utilizada na obtenção do resto da energia a algum ponto na sociedade. Entretanto, a energia deve ser entregue até "o consumidor", sendo necessário incluir as perdas de energia nas refinarias, os custos de energia, os custos para entregar o combustível para o consumidor final e a manutenção da infraestrutura para usar esse combustível. Essas "perdas" aumentam o consumo energético para produzir energia, diminuindo assim o EROEI.

Fraise [2011] utilizou registros da produção de gás natural com as respectivas despesas da Associação Canadense de Produtores de Petróleo desde 1947 visando calcular a energia líquida e EROEI a partir desses dados públicos. Produção de energia é igual aos volumes totais de produção de cada hidrocarboneto produzido num determinado ano (óleo convencional, gás natural, gás natural liquefeito), a qual é convertida em calor equivalente de energia, e medida em gigajoules. Identificar a energia de exploração é mais difícil, pois os dados públicos de gastos são registrados, no caso, apenas em dólares canadense por ano e não em energia, sendo necessário usar um fator de intensidade de energia para converter as despesas de dólares em energia. Há muitas etapas para a produção de petróleo: exploração, perfuração, coleta e separação, refino e transporte de produtos acabados, até a queima do combustível final. O EROEI poderia ser calculado em qualquer desses pontos do processo [Hall *et al.*, 2009]. Fraise [2011] examinou o EROEI dentro de um limite que inclui a exploração, perfuração, o recolhimento e a separação de fases gás natural e GNL. A análise não incluiu refino, o transporte de produtos acabados, a eficiência do uso final e os custos do trabalho. Quantificou que o EROEI decaiu de 38:1 em 1993 para 15:1 em 2005 ambos para gás natural.

É consensual que o EROEI para gás e petróleo está decaindo substancialmente desde 1930 [Cleveland, 2005; Hall *et al.*, 2009]. Uma das primeiras estimativas de EROEI foi feita por Cleveland [2005] em estudo sobre petróleo e gás nos Estados Unidos durante o período de 1954 a 1997 onde se chegou a um pico do EROEI de aproximadamente 25:1 em 1970. Heun e Wit, [2012] investigaram se o declínio do EROEI está associado a um aumento no preço do



petróleo e especularam sobre as implicações desses resultados na política de petróleo. Um modelo da relação entre EROEI e preços de mercado do petróleo foi desenvolvido, utilizando premissas econômicas e físicas não lineares de modelos de regressão por mínimos quadrados para correlacionar o EROEI na produção de petróleo com preço usando dados disponíveis de 1954 a 1996. O modelo reflete com precisão os preços históricos do petróleo (1954-1996) e correlaciona-se bem com os preços históricos do petróleo (1997-2010) quando uma extrapolação linear de declínio EROEI é assumida.

Gagnon *et al.* [2009] forneceram então uma avaliação preliminar do EROEI para o mundo, de petróleo e gás, com base na série histórica da produção mundial e das estimativas de insumos energéticos provenientes de gastos monetários para todo o petróleo de capital aberto e companhias de gás e as estimativas de intensidade de energia desses gastos. O EROEI na cabeça do poço foi de cerca de 26:1 em 1992, aumentou para 35:1 em 1999 e depois caiu para 18:1 em 2006, valores que sugerem que o EROEI está em declínio ao longo do tempo com o aumento dos níveis de perfuração anuais.

Além da energia gasta com exploração e transporte do gás natural há perdas na conversão da energia primária do combustível em energia elétrica quando o combustível é utilizado em plantas de potência pois mais da metade da energia disponível é perdida no processo [US Department of Energy, 2012]. Para plantas de potência com combustível gás natural, US Department of Energy [2012] cita um EROEI de 2,6:1 em 2012 e Bull [2010] cita um EROEI de 3,5:1 em 2010.

Stradioto [2011] analisou a quantidade de energia gasta na cadeia do gás natural liquefeito desde a sua exploração até o ponto de utilização, identificando o consumo de energia, perda de massa ao longo do transporte e destruição de exergia. Avaliou as possibilidades do aproveitamento energético, com a troca de calor envolvida no processo de regaseificação do GNL, buscando ciclos térmicos mais eficientes e aumentando o aproveitamento do trabalho reversível dos sistemas, abordando três alternativas de plantas de potência para operarem acopladas ao fornecimento de GNL. O ciclo selecionado para a integração entre as plantas foi o ciclo de potência Brayton-Rankine com três formas diferentes de acoplamento, mostrando que na cadeia de GNL 14,81% da energia contida no metano na entrada da planta de liquefação é perdida ou consumida nos processos que envolvem a cadeia. Este trabalho será utilizado como referência para a cadeia do GNL.

### 3. METODOLOGIA

De acordo com Murphy *et al.* [2011], a realização de uma análise EROEI consiste em expor os objetivos da análise claramente, criando um diagrama de fluxo e identificando os limites do sistema. Devem ser identificadas todas as entradas e saídas de energia apropriadas dentro da fronteira. Devem ser identificados os dados necessários para o cálculo do EROEI no diagrama de fluxo, escolhendo o método de ajuste de qualidade da energia onde todas as entradas e saídas devem estar em joules. Quando necessário, deve-se converter os fluxos de energia, tais como o custo de transporte de petróleo. O cálculo do indicador de sustentabilidade é o passo final.

#### 3.1 Sistema considerado

A Figura 3.1 detalha a cadeia do gás natural liquefeito, conforme estudo de Stradioto [2011], a qual representa a fronteira proposta no presente estudo, iniciando o processo de exploração e produção na e do gás natural, onde é retirada da mistura do petróleo grande parte das espécies que compõem o gás natural. Ainda na Figura 3.1 são evidenciadas as entradas (setas em verde) e saídas (setas em vermelho) de energia consideradas no presente trabalho, que serão apresentadas ao decorrer da metodologia. No trabalho, assume-se gás natural como metano na CNTP. A rota tecnológica do combustível segue para a liquefação. Depois de liquefeito, o produto é classificado como gás natural liquefeito. Nesse momento, o GNL está

pronto para a estocagem em tanques posicionados próximos aos terminais de carga para transporte em navios metaneiros até o terminal de regaseificação. O último estágio é o de distribuição do combustível até plantas de potência, onde será convertido em energia para a rede e entregue à sociedade.

O caso estudado por Stradioto [2011] considerou as exigências energéticas da cadeia de fornecimento descrita anteriormente para uma corrente de 126,42 kg/s de metano, cuja densidade é assumida 0,722 kg/m<sup>3</sup> na CNTP, na entrada da planta de liquefação, sendo essa massa definida para suprir a demanda de carregamento dos navios de transporte e equivalente a uma planta com capacidade de liquefazer aproximadamente 8,5 milhões de m<sup>3</sup>/ano de GNL (transformação do metano em gás natural liquefeito). Para manter o processo contínuo, foram considerados seis navios intercalando as fases de carga, transporte, descarga e retorno. Considerando que o carregamento e descarregamento de cada navio leve 144 horas e o transporte entre continentes leve 720 horas, cada ciclo leva 864. Cada navio transporta 145.000 m<sup>3</sup> de GNL, totalizando 870.000 m<sup>3</sup> por ciclo. Para suprir essa demanda, é necessário que a planta de liquefação receba 632.000 m<sup>3</sup>/hora de gás natural. Como o ciclo é composto por 864 horas, devem ser fornecidos 5,46 e+8 m<sup>3</sup> de gás natural para a planta de liquefação. Assim, poderão ser utilizados os dados energéticos quantificados por Stradioto [2011], que estudou a rota tecnológica e distribuição do GNL. Comparando o volume diário a ser regaseificado (14 e6 m<sup>3</sup>/dia), proposto por Stradioto [2011], com a capacidade das atuais plantas existentes no Brasil (14 e6 m<sup>3</sup>/dia), o valor é aproximado e poderá ser absorvido pelas plantas de regaseificação brasileiras.

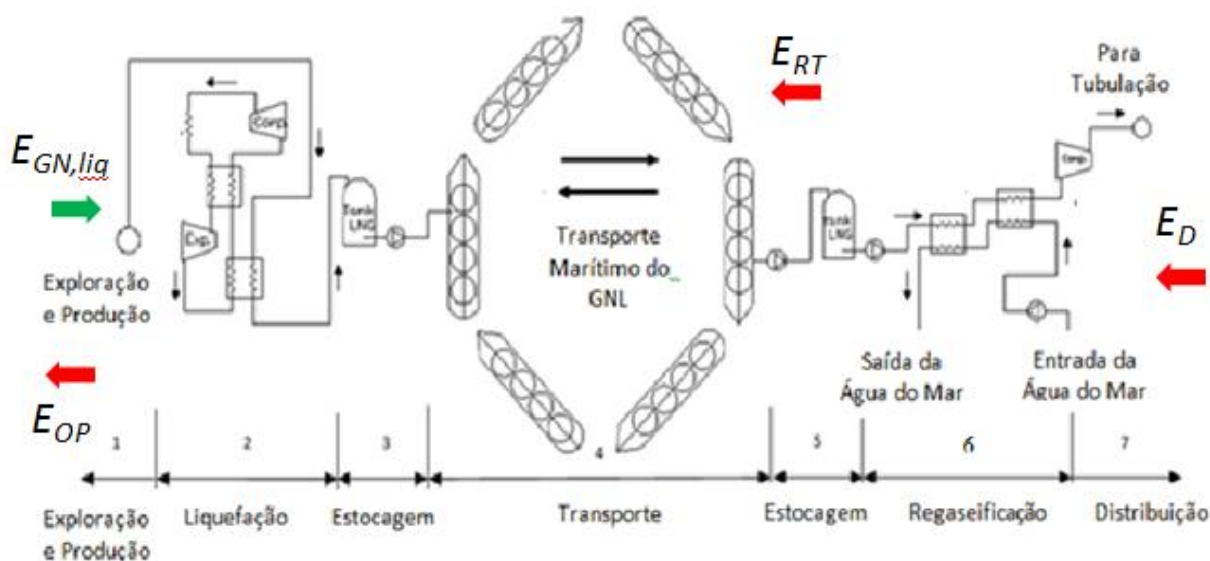


Figura 3.1 - Cadeia do gás natural liquefeito evidenciando entradas e saídas de energia [Stradioto, 2011, adaptado]

### 3.1.1 Exploração do gás natural

Trinidad e Tobago e Venezuela são dois potenciais fornecedores de gás natural liquefeito para o Brasil e serão assumidos como os fornecedores nesse trabalho. Logo, é de suma importância o conhecimento da energia gasta para exploração do combustível nos poços de petróleo desses países. Entretanto existem inconvenientes para identificar a energia de exploração para extração de petróleo e gás. O principal é uma escassez de dados sobre as entradas e saídas de energia. Por essa razão será utilizada a média mundial para petróleo e gás do estudo de Gagnon *et al.* [2006], que aponta um EROEI de 18:1. Esse valor relaciona a entrada de energia para a indústria de petróleo e extração de gás em um determinado ano para a produção de energia da indústria no mesmo ano. Em seu cálculo foram utilizados dados de

produção para um período, disponíveis em termos de volume de combustível produzido por unidade de tempo e convertidos para unidade de energia utilizando o poder calorífico do gás natural na CNTP (1,1 megajoule por pé cúbico de gás natural), obtendo assim a energia total produzida de gás natural no mundo. Para a quantificação da energia de entrada, foi relacionado o custo financeiro utilizado pela indústria de petróleo e gás, onde foi relacionada a intensidade de energia para o mundo (20 megajoule por dólar) e multiplicado esse número pelo investimento mundial das companhias públicas em dólar, gerando assim uma estimativa do custo da energia mundial em megajoule. O EROEI foi determinado dividindo o dado da produção em joules pela energia investida no mesmo ano.

Para determinar a quantidade de energia necessária para produzir certa quantidade de energia será quantificado o volume de gás natural ( $V_{GN}$ ) em  $m^3$  necessário para atender a demanda proposta pelo trabalho para liquefação conforme a Equação 3.1. A massa específica ( $\rho_{GN}$ ) é admitida como a do metano,  $0,722 \text{ kg/m}^3$  nas condições normais de temperatura e pressão. A vazão mássica  $m_{GN}$  é dada em  $m^3/h$  e o período do ciclo  $t$  é dado em horas. Então, será utilizada a conversão proposta por Gagnon *et al.* [2011] que utiliza o poder calorífico do gás natural na CNTP (38,8 megajoule por metro cúbico de gás natural) para quantificar a energia disponível do combustível na entrada da planta de liquefação ( $E_{GN,liq}$ ), em joule, conforme a Equação 3.2.

$$V_{GN} = \frac{m_{GN} t}{\rho_{GN}} \quad (3.1)$$

$$E_{GN,liq} = 38,84e6V_{GN} \quad (3.2)$$

Para quantificar a energia utilizada na exploração do gás natural será utilizado o EROEI médio mundial para petróleo e gás de 18:1. Relaciona-se com a Equação 3.3 para descobrir a energia demandada no processo produtivo da exploração do combustível, denominada energia de operação ( $E_{OP}$ ), dado em joule. A bibliografia utilizada admite os gastos de energia para construção e desativação da planta já no resultado do EROEI mundial.

$$E_{OP} = \frac{E_{GN,liq}}{18} \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Rota tecnológica do GNL

O gás natural depois de explorado deve ser liquefeito para posterior transporte por navio metaneiro para o terminal de regaseificação do país importador. O processo de liquefação proposto por Chang [2008] e indicado por (2) na Figura 3.1 ocorre a uma temperatura de  $-161,6^\circ\text{C}$  e pressão de  $101,32 \text{ kPa}$ , exigindo uma grande quantidade de energia, pois é composto por sucessivas fases de compressão e expansão, onde o ciclo utilizado foi um Brayton reverso com nitrogênio como fluido de trabalho. Depois de liquefeito, o GNL é estocado em tanques isolados (ponto (3) da Figura 3.1) para depois ser transferidos para os navios metaneiros para transporte entre os continentes (ponto (4)).

Segundo Genovese *et al.* [2009], como combustível dos motores para suprir a viagem dos navios é utilizado a energia do gás natural liquefeito transportado, que vira gás devido à diferença de temperatura com o meio exterior (5% do volume inicial) e seria perdido ou teria de voltar a ser comprimido, definido como perda de massa. Logo se assume que não existe perda energética no transporte pelos navios metaneiros. Como Venezuela e Trinidad e Tobago são próximos, será assumida a mesma perda energética para o transporte até Rio Grande, no Brasil. No país importador, o GNL é descarregado e transportado em tanques de armazenamento através de motobombas para posterior regaseificação, geralmente feita

utilizando água do mar como fluido para troca de calor. Essas fases demandam consumo de energia pelo trabalho de bombeamento. Stradioto [2011] quantificou a energia consumida por quilograma de gás natural ( $W$ ) na rota tecnológica do GNL conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Consumo de energia na rota tecnológica do GNL [Stradioto, 2011, adaptado]

Etapa	Energia [kJ/kg]
Liquefação	4150
Transferência do GNL para o Navio	4,09
Consumo de Energia pelo Navio	zero
Descarregamento do Navio	5,12
Processo de Regaseificação	23,92
Estação de Compressão	1112
<b>Total Energia/kg de GN (W)</b>	<b>5295,13</b>

A energia consumida no processo de rota tecnológica do gás natural liquefeito ( $E_{RT}$ ) é dada pela Equação (3.4), em joule. Esse valor será somado à energia de operação na exploração de gás natural para futura determinação do EROEI do processo em estudo.

$$E_{RT} = V_{GN} \rho_{GN} W \quad (3.4)$$

### 3.1.3 Distribuição

A planta de potência escolhida para acoplar e aproveitar as correntes de fluidos da cadeia do GNL foi um ciclo combinado Brayton-Rankine, estudado por Stradioto [2011]. Na parte superior da planta encontra-se um subciclo Brayton, composto por um compressor de ar de dois estágios, uma câmara de combustão, uma turbina de expansão dos gases de combustão com três estágios e finalmente um regenerador ligando as correntes de exaustão com a de admissão de ar para o combustor. O subciclo Rankine acopla-se ao anterior por meio de um gerador de vapor de recuperação (*heat recovery steam generator*, HRSG), composto por três trocadores responsáveis pela geração de vapor superaquecido, uma turbina de dois estágios de expansão, um condensador, uma bomba de baixa pressão, uma bomba de alta pressão e um tanque desaerador. A água é seu fluido de trabalho. No ciclo completo apresentado, a energia é fornecida pela queima de gás natural na câmara de combustão do subciclo Brayton. Com base na potência líquida obtida em cada ciclo, é possível definir o consumo específico de combustível do ciclo, dependendo da vazão mássica de combustível consumido (kg/s).

Durante o processo, 5% do volume transportado é transformado em combustível para os navios [Genovese *et al.*, 2009]. Utiliza-se então a Equação 3.5 que relaciona a massa específica para determinar a massa em quilograma de gás natural que chega à planta de potência ( $m_{GN}$ ), admitindo apenas a perda de massa referente ao consumo de combustível pelo navio e nenhuma outra perda de massa durante o processo.

$$m_{GN} = 0,95V_{GN} \rho_{GN} \quad (3.5)$$

Segundo Stradioto [2011], o ciclo especificado gera uma potência líquida ( $P_{CP,R}$ ) de 40,16 MW no ciclo referência quando alimentado o combustível gás natural após ter sido recebido do terminal de regaseificação a uma vazão mássica ( $m_{CP}$ ) de 1,632 kg/s. Logo, determina-se o tempo ( $t_{CP}$ ) em segundos em que toda massa ( $m_{GN}$ ) é consumida no ciclo de potência pela Equação 3.6. Pode-se então encontrar a energia real gerada pelo ciclo de potência  $E_{RG,CP}$  pela Equação 3.7.

$$t_{CP} = \frac{m_{GN}}{\dot{m}_{CP}} \quad (3.6)$$

$$E_{RG,CP} = P_{CP,R} t_{CP} \quad (3.7)$$

Entretanto, deve-se quantificar a condição ideal, onde toda a massa de combustível seria convertida em energia. No caso, deve-se substituir a massa combustível na Equação 3.5, visando encontrar o novo volume de gás natural ( $V_{GN,CP}$ ) que chega à planta de potência e idealmente tem uma energia do gás natural ( $E_{IGN,CP}$ ), encontrado utilizando os novos dados na Equação 3.2. Como o trabalho trata de quantificar o retorno em energia sobre energia investida do gás natural liquefeito, é necessário quantificar a energia da distribuição ( $E_D$ ) em joule pela Equação 3.8. Sabe-se que existe uma perda energética comparando a energia do gás natural com a utilização do gás natural para produção de energia elétrica, logo se espera que o valor de  $E_D$  seja negativo, ou seja, deverão ser somadas as demais energias “perdidas” no processo investigado [US Department of Energy, 2012].

$$E_D = E_{RG,CP} - E_{IGN,CP} \quad (3.8)$$

### 3.1.3.1 Alternativas para acoplamento entre a planta de regaseificação e o CHP

Utilizando o banco de dados descrito na metodologia, Stradioto [2011] quantificou o aumento de rendimento na planta de potência apresentada anteriormente. Na busca por ciclos térmicos mais eficientes e para aumentar o aproveitamento do trabalho reversível dos sistemas, propôs três alternativas de plantas de potência para operarem acopladas ao fornecimento de GNL, com benefício mútuo para ambos os processos: promoção da regaseificação do GNL sem energia auxiliar e aumento da eficiência da planta de potência.

- Alternativa 1: acoplamento entre regaseificação e a planta de potência nos estágios de compressão do subciclo Brayton;
- Alternativa 2: acoplamento entre a regaseificação e a planta de potência nos estágios de compressão do subciclo Brayton e no condensador do subciclo Rankine, utilizando água como fluido de trabalho;
- Alternativa 3: idêntico ao ciclo anterior, utilizando nitrogênio como fluido de trabalho do subciclo Rankine;

Nos três ciclos propostos, após a regaseificação, parte da massa de gás é destinada para a câmara de combustão e o restante é enviado para a distribuição em gasodutos. A Tabela 3.2 apresenta a potência total gerada a partir de uma mesma vazão mássica. Essas três alternativas serão comparadas a fim de verificar o quanto resultariam em acréscimos de potência e melhoria do EROEI.

Tabela 3.2 - Dados para comparação entre a potência gerada nos ciclos [Stradioto, 2011, adaptado]

	Ciclo de Referência	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Consumo de combustível [kg/s]	1,632	1,632	1,632	1,632
Potência total gerada [MW]	40,16	47,98	50,53	53,29

### 3.2 Retorno em energia sobre energia investida

A Figura 3.2 representa a entrada de energia, identificada como energia disponível do gás natural liquefeito na entrada da planta de liquefação ( $E_{GN,liq}$ ), e as perdas de energia, identificadas como a energia de operação ( $E_{OP}$ ) para exploração do combustível, a energia da rota tecnológica ( $E_{RT}$ ) para liquefação, transporte e regaseificação, e a energia de distribuição ( $E_D$ ) para utilização do combustível em planta de potência visando geração de energia elétrica. O EROEI varia com o tempo e será quantificado após determinação dos valores de energia.

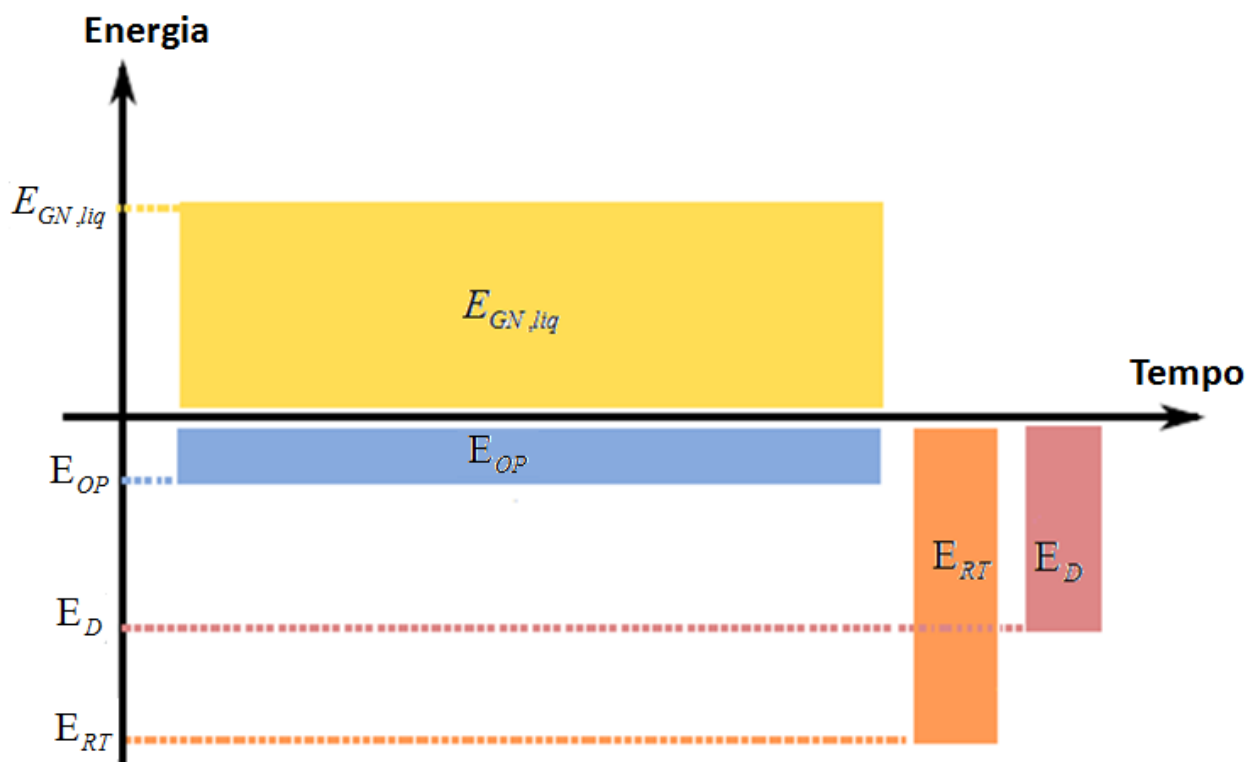


Figura 3.2 - Entradas e perdas de energia em planta de produção  
[Murphy *et al.*, 2011, adaptado]

Adaptando a metodologia proposta por Murphy *et al.* [2011] ao presente estudo, o total líquido produzido pelo processo durante um período temporal definido e entregue a rede é dado pela Equação 3.9, e o retorno em energia sobre energia investida é dado pela Equação 3.10.

$$E_{net} = E_{GN,liq} - E_{OP} - E_{RT} - E_D \quad (3.9)$$

$$EROEI = \frac{E_{GN,liq}}{E_{OP} + E_{RT} + E_D} \quad (3.10)$$

As unidades dos termos de energia são o joule e o resultado obtido é adimensional, do tipo, por exemplo, 30:1, que pode ser expresso como "30 a um". Isso quer dizer que um processo específico rende 30 joules de um investimento de um joule. Por essa definição, o ponto de equilíbrio para produção de energia ocorre quando o EROEI é um. O intervalo de abrangência é de  $0 \leq EROEI < \infty$ . Um processo com EROEI maior que um é uma fonte de energia, e um processo com EROEI menor que um é um sumidouro de energia.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para quantificar a energia de operação na exploração de gás natural no ciclo proposto, foi utilizada a quantidade de energia de gás natural que chegava a uma planta de liquefação e utilizada a correlação do EROEI mundial (18:1) proposta por Gagnon *et al.* [2011]. Descobriu-se que é necessário investir  $1,18 \times 10^{15}$  joule para gerar  $2,1 \times 10^{16}$  joules em energia de gás natural.

Após o combustível ser explorado, deve percorrer sua rota tecnológica para chegar até uma planta de potência, onde será utilizado para produção de energia elétrica. Na rota tecnológica, passa pelos processos de liquefação, transferência do GNL para o navio e posterior descarregamento e regaseificação até a estação de compressão. Stradioto [2011] afirma que é consumido 5296,13 kJ a cada kg de gás natural envolvido no processo. Como o ciclo proposto opera com  $5,45 \times 10^8$  m<sup>3</sup> de gás natural, a energia consumida na rota tecnológica é de  $2,06 \times 10^{15}$  J.

Ao final da rota tecnológica, o gás natural chega até o ponto onde será utilizado como combustível em uma planta de potência, denominado no trabalho como distribuição. Na distribuição foram analisados quatro diferentes ciclos de potência, sendo um de referência e os outros três buscando melhorias energéticas. Como dados de entrada, foi utilizada a potência gerada por cada ciclo de potência e a mesma vazão mássica de combustível, com o objetivo de quantificar a energia gerada por cada um dos ciclos. Em contrapartida, o combustível deixou de utilizar todo seu potencial energético durante o processo. Logo, foi subtraída a quantidade de energia real gerada em cada ciclo pela energia ideal do combustível gás natural, pois em plantas de potência que geram eletricidade mais da metade da energia disponível no combustível é perdida no processo [US Department of Energy, 2012]. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Entradas e saídas de energia na cadeia do GNL

Resultado	Valor	Unidade
Volume GN	5,45E+08	m <sup>3</sup>
Energia GN entrada liquefação	2,12E+16	J
Energia Operação	1,18E+15	J
Energia consumida RT	2,06E+15	J
Massa GN na distribuição	3,74E+08	kg
Tempo Ciclo de potencia	2,29E+08	s
Energia gerada Ciclo referencia	9,19E+15	J
Energia gerada Ciclo alternativa 1	1,1E+16	J
Energia gerada Ciclo alternativa 2	1,16E+16	J
Energia gerada Ciclo alternativa 3	1,22E+16	J
Volume GN na CHP	5,17E+08	J
Energia ideal do GN no CHP	2,01E+16	J
Energia distribuição ciclo referência	-1,09E+16	J
Energia distribuição alternativa 1	-9,11E+15	J
Energia distribuição alternativa 2	-8,53E+15	J
Energia distribuição alternativa 3	-7,9E+15	J

Seguindo a metodologia de Murphy *et al.* [2011], foi montado um diagrama de fluxos e identificados os limites do sistema, onde todas as entradas e saídas de energia foram quantificadas. Para calcular o EROEI, foi preciso relacionar todas as entradas e saídas de energia e introduzi-las na Equação 3.10, sabendo que o EROEI é um indicador de

sustentabilidade, e que o combustível vai perdendo seu potencial energético conforme vai passando por processos, pois existem cada vez maiores perdas de energia. No caso, substituindo todos os valores encontrados, chegou-se aos seguintes valores de EROEI mostrados na Tabela 4.2. Na fase de exploração foi utilizado o valor proposto por Gagnon *et al.* [2011]. A rota tecnológica engloba desde as quantidades energéticas na exploração até o final da rota tecnológica, ou seja, a regaseificação. O ciclo referência, alternativa 1 até 3, indicam o processo completo, onde foram quantificadas as energias desde a exploração, passando por rota tecnológica e resultando na distribuição do combustível para quatro diferentes modos de operação de uma planta de potência.

Tabela 4.2 - EROEI da cadeia do GNL

EROEI exploração	18;1
EROEI rota tecnológica	6,5:1
EROEI ciclo referência	1,5:1
EROEI alternativa 1	1,7:1
EROEI alternativa 2	1,8:1
EROEI alternativa 3	1,9:1

Após quantificação de todas as entradas e saídas de energia do sistema, percorrendo desde a exploração do gás natural, sua rota tecnológica até sua distribuição em uma planta de potência para geração de energia, quantificou-se um EROEI de no máximo 1,9:1 na alternativa 3, onde a geração elétrica é a partir de uma planta de potência CHP com acoplamento na regaseificação nos estágios de compressão do subciclo Brayton e no condensador do subciclo Rankine, utilizando nitrogênio como fluido de trabalho do subciclo Rankine.

US Department of Energy [2012] quantificou o EROEI para gás natural na geração de energia elétrica em 2,6:1 nos Estados Unidos, não diferenciando sistemas em que houve a necessidade de liquefação ou se simplesmente o gás foi transportado do poço até a planta de potência, sugerindo uma média de modos de produção do país para todas as formas do gás natural. Bull [2010] quantificou o EROEI para gás natural também utilizado para geração de energia elétrica em 3,5:1 para o Reino Unido, não diferenciando qual a rota tecnológica do combustível. Esses números embasam o resultado encontrado aqui, pois a análise se baseou apenas na cadeia do gás natural liquefeito, processo que exige maior consumo energético do que o combustível transportado na forma de gás.

O EROEI quantificado para a rota tecnológica foi 6,5:1, ou seja, para cada joule de energia investida nos processos de exploração, liquefação, transporte e regaseificação, foram produzidos 6,5 joules de energia na forma bruta ainda de gás natural. Quando o combustível é distribuído na planta de potência, quantificou-se que é necessário investir um joule energia, em toda a fronteira estudada, para gerar até 1,9 joules de energia.

Comparando as quatro diferentes alternativas propostas no ciclo de potência, fica evidente que a alternativa 3, que apresenta maior geração de potência com a mesma vazão mássica e tempo das outras, apresenta obviamente melhor eficiência energética e consequente melhor EROEI, no caso quantificado em 1,9 joules gerados a cada joule investido. No caso, de todas as alternativas propostas, a mais sustentável é a alternativa 3.

Mesmo que o processo tenha sido quantificado como fornecedor de energia para a sociedade e não sumidouro, estudos de Hall *et al.* [2009] indicam que o EROEI mínimo que a sociedade deve atingir para crescimento sustentável é de 3:1, valor superior ao encontrado pelo trabalho. Assim, o enorme processo que o combustível atravessa para a geração de energia elétrica não é sustentável. Seu uso, então, deve ser considerado em outros tipos de energia.



## 5. CONCLUSÃO

Foi considerada uma cadeia do gás natural liquefeito compreendendo exploração, rota tecnológica composta por liquefação, transporte marítimo e regaseificação, e distribuição em um ciclo de potência Brayton-Rankine combinado com três diferentes alternativas para planta de potência. Chegou-se a um valor do índice de 1,9:1, o que significa que é gasto uma unidade de energia para gerar 1,9 unidades de energia elétrica por gás natural liquefeito, o que assinala que esse combustível é pouco sustentável para esse fim.

O retorno em energia sobre energia investida do gás natural liquefeito encontrado para geração elétrica foi abaixo do valor mínimo de 3:1 que uma sociedade deve atingir em sua exploração de energia para apoiar a contínua atividade econômica com função social sustentável. Entretanto, o caminho percorrido pelo combustível acaba por desenvolver uma indústria mais forte, desenvolve pesquisa e tecnologia, gera empregos e impostos aos países devido ao enorme investimento e circulação financeira, resultando em possível melhoria na qualidade de vida das pessoas.

Cada vez mais está sendo necessário investir mais energia para gerar outra fonte de energia. O que foi observado nesse trabalho é que à medida que a energia bruta precisa ser modificada e transportada para finalmente ser distribuída, o EROEI do processo diminui.

É evidente que as pessoas, indústrias e países lutem por lucro financeiro. O EROEI não questiona tal objetivo, apenas identifica quais processos são ecologicamente mais corretos. Sugere-se então a união de análises, do método EROEI com a análise financeira de investimentos. Assim, será possível o desenvolvimento econômico aliado à política ecologicamente correta.

Sugere-se para trabalhos futuros considerar as perdas de massa em função das diferentes temperaturas do GNL no processo e uma análise exergética do processo, pois muita energia que é considerada como perdida pode ser reaproveitada. Sugere-se também uma análise financeira, comparando indicadores de diferentes combustíveis, identificando qual combustível atualmente é mais ecologicamente correto com alto retorno financeiro para o Brasil.

## 6. REFERÊNCIAS

ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Atlas da Energia Elétrica no Brasil**, 2002. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf)>. Acessado em 19 novembro 2012.

ANP – Agencia nacional do petróleo. **O gás natural liquefeito no Brasil – experiência da ANP na implantação dos projetos de importação de GNL**. Rio de Janeiro: ANP 2010.

BRITISH PETROLEUM (2009). **Statistical review of world energy: full report 2009**. London, UK: BP, 2009. Disponível em <[www.bp.com](http://www.bp.com)> Acesso em 04/12/2012

BULL, J. Oco Carbon. **EROEI of eletricity**. 2010 <<http://oco-carbon.com/2010/05/19/eroei-of-electricity-generation/>> Acessado em 04/12/2012

CLEVELAND, C.J. Net energy from the extraction of oil and gas in the United States. **Energy**, 30, 769–782, 2005.

CLEVELAND, C.J. Energy Return on Investment (EROEI). **Encyclopedia of the Earth**, 2008. Disponível em; <[http://www.eoearth.org/article/Energy\\_return\\_on\\_investment\\_\(EROEI\)](http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_(EROEI))> Acessado em 17 novembro 2012.

CHANG, H.M.; CHUNG, M.J.; KIN, M.J.; PARK, S.B., **Thermodynamic design of methane liquefaction system based on reversed-Brayton cycle**, *Cryogenics* (2008), doi: 10.1016/j.cryogenics. 2008.08.006

FRAISE, J. The EROEI of Conventional Canadian Natural Gas Production. **Sustainability**, p. 2080-2104, 2011.

GAGNON, N.; HALL, C.A.S.; BRINKER, L. A preliminary investigation of energy return on energy investment for global oil and gas production. **Energies** 2, 490–503, 2009.

GENOVESE, A. L ; TAHAN, C. M. V. ; BERNAL, J. L. O.; **Análise do GNL para o suprimento energético brasileiro**. In: Santos Offshore Oil & Gas Conference 2009, Santos. Biblioteca Virtual - Conferência 2009. Santos : Santos Offshore, 2009. v. 4. p. 1-15.

GHIRARDI, A. (2008). **Gás natural na América do Sul: do conflito à integração possível**. *Le Monde Diplomatique Brasil*, jan. 2008.

GOSMANN, H. **Integração gasífera na América do Sul: estudo dos casos dos Gasodutos Bolívia-Brasil (GASBOL) e Lateral-Cuiabá no contexto das relações bilaterais Bolívia-Brasil**. 2011. 53 f. Monografia (Especialização em Relações Internacionais)—Universidade de Brasília, 2011.

HALL, C.A.S.; BALOGH, S.; MURPHY, D.J. What is the Minimum EROEI That a Sustainable Society Must Have? **Energies**, 2, 25–47, 2009.

HERENDEEN, R.A. **Net energy analysis: Concepts and methods**. In *Encyclopedia of Energy*. Elsevier: New York, NY, USA, 2004; Volume 4, pp. 283-289.

HEUN, M.K.; WIT, M. Energy return on (energy) invested (EROEI), oil prices, and energy transitions. **Energy Policy**, 40, 147–158, 2012.

MURPHY, D.J.; HALL, C.A.S. Order from chaos: A preliminary protocol for determining EROEI of fuels. **Sustainability**, 3, 1888-1907, 2011.

PETROBRAS – PETROLEO BRASILEIRO <<http://www.petrobras.com.br/pt/>> Acessado em 06/12/2012

STRADIOTO, D. **Análise energética e exergética da cadeia do gás natural líquido e a integração do processo de regaseificação com ciclos combinados de potência** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

US DEPARTMENT OF **ENERGY**; **Role of alternative energy sources: Natural gas technology assessment**. DOE/NETL – 2012/1539. National energy technology laboratory, United States, 2012.