



Estudo da viabilidade de aproveitamento de CO₂ offshore visando à produção de ureia

Study of a technical and economic feasibility of converting offshore CO₂ into urea

D. dos S. Freitas^{1*}; J. J. Marques¹; C. A. G. Perlingeiro²

¹ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão - Sergipe, Brasil

² Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 21941-909, Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, Brasil

*daifreitase@yahoo.com.br

(Recebido em 15 de março de 2016; aceito em 02 de maio de 2016)

A intensificação das emissões de CO₂ na atmosfera e sua consequente influência no contexto ambiental reforçam a necessária busca por alternativas de disposição deste poluente. Desta forma, as tecnologias sequestrantes de CO₂ ganharam notório destaque na literatura científica. Dentre as rotas químicas potencialmente sequestrantes, a síntese de ureia denota uma função estratégica no âmbito socioeconômico, uma vez que possibilita atender demandas voltadas à produção de alimentos e à minimização da forte dependência externa desta *commoditie*, em virtude de sua baixa produção nacional. Nesse contexto, foi desenvolvido um estudo para avaliar a utilização do CO₂ proveniente do pré-sal na produção de ureia. Propôs-se uma planta de produção integrada de amônia e ureia, com capacidade de 1Mt/ano, consumo médio estimado em 1,90 x 10⁸ kW e potencial para evitar a emissão de 20,7 Mt/ano de CO₂. O investimento inicial foi estimado em US\$ 241,2 milhões, com tempo de retorno de 6,1 anos. Obteve-se um Valor Presente Líquido (VPL) de US\$ 65.141.152,61 aplicando-se uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 15%, e a Taxa Interna de Retorno (TIR) prevista foi 48%.

Palavras-chave: Sequestro de CO₂, Ureia, Análise Técnica e Econômica

The intensification of CO₂ emissions and its consequent influence on the environmental context reinforce the need to search alternative for disposal of this pollutant. Thus, the technologies of capture, transport and sequestration, geological or chemical, of CO₂ gained notorious prominence in the scientific literature. Among the potentially sequestering chemical routes, the synthesis of urea also denotes a strategic function within socioeconomic scope, because it allows attending the demands focused on food production and on the minimization of the strong external dependence on this commodity because of its low domestic production. In this context, a study was developed to evaluate the use of CO₂ from pre-salt in the production of urea. Thus, it proposes an integrated plant production of ammonia and urea, with capacity 1Mt/ano, estimated average consumption of 1.90 x 10⁸ kW and potential to prevent the emission of 20.7 Mt CO₂ per year. The initial investment was estimated in US\$ 241.2 million, with a payback time of 6.1 years. The Net Present Value (NPV) was US\$ 65,141,152.61 applying corresponding to a Minimum Attractive Rate of Return (MARR) of 15%, and the Internal Rate of Return (ROR) predicted was 48%.

Keywords: CO₂ sequestration, urea, technical and economic analysis

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas experimentadas em todo o planeta representam um grande desafio para a humanidade. O efeito estufa, indispensável à vida na Terra, tornou-se um imenso problema devido à intensificação das emissões dos chamados gases do efeito estufa: metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), vapor d'água (H₂O) e, em destaque, o gás carbônico (CO₂), o qual apesar de não possuir o maior potencial de aquecimento, tem sido acumulado maciçamente na atmosfera, agravando as consequências do aquecimento global.

Emissões de CO₂ são subproduto de diversos processos, desde a respiração celular até a queima de combustíveis, estando mais fortemente relacionadas à produção energética e às indústrias, principalmente as cimenteiras, siderúrgicas e petrolíferas. Estima-se que cada barril de petróleo extraído produz, em média, 436 kg de CO₂ [1], o que representa uma imensa contribuição para o efeito estufa. Para este trabalho, considerou-se o volume produzido nos campos do pré-sal brasileiro, cujo teor médio no gás associado pode atingir 75% v/v de CO₂ [2].

A captura, o transporte e a fixação (biológica, geológica ou química) de carbono são alvos de estudos de novas e tradicionais tecnologias, as quais visam mitigar sua disposição na atmosfera e, por consequência, reduzir impactos ambientais relacionados ao aquecimento global. Uma maneira efetiva de aumentar significativamente o consumo de gás carbônico é a partir do desenvolvimento de rotas alternativas para produtos químicos de larga demanda no mercado, onde o CO₂ possa ser utilizado como insumo.

Uma indústria em potencial para esta aplicação é a de fertilizantes nitrogenados, por sua importância socioeconômica, ao propiciar a produção de alimentos para atender a uma demanda crescente, contrastante com a baixa oferta no mercado nacional. A ureia, principal adubo nitrogenado usado mundialmente devido aos custos mais baixos de obtenção e à alta concentração de nitrogênio (46%), é um derivado da amônia, produto este que tem 90% da produção mundial dependente do gás natural como fonte primária [3]. A aplicação de um estudo de viabilidade econômica permite constatar se o processo é rentável e atrativo do ponto de vista financeiro [4], além de indicar se esta corresponde à melhor resposta à questão dentre outras possíveis alternativas.

Na literatura, apesar da predominância de estudos voltados ao sequestro geológico de carbono, muitos trabalhos abordam aspectos importantes da captura e separação de CO₂: Ravanchi e Sahebdehfar [5]; Pires et. al. [6]; Ravanchi et. al. [7]; Wang et. al. [8]; Kargari e Ravanchi [9]; Bandyopadhyay [10]; Sabouni et. al. [11]; Munford et. al. [12]; Koelbl et. al. [13]; e de seu uso bioquímico: Bholá et. al. [14]; Singh e Ahluwalia [15]; e químico: Olah [16]; Monteiro [17]; Aquino [18]; Bose et. al [19]; Havran e Dudukovic [20]; Zangeneh et. al. [21].

Neste contexto, o presente trabalho objetiva avaliar técnico-economicamente a alternativa de sequestro de CO₂ e sua posterior transformação em ureia, a fim de contribuir para a exploração ambientalmente responsável das reservas do pré-sal.

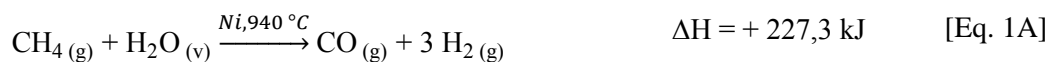
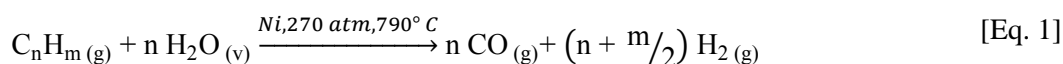
1.1. Produção da Ureia

Neste trabalho, a produção de ureia obedece às seguintes etapas:

i. Captura do CO₂: a partir das correntes de gás natural extraídas em campos de produção offshore;

ii. Separação do CO₂: através da absorção química por solução de aminas;

iii. Produção de hidrogênio (H₂): através da reforma endotérmica do gás natural, segundo as Equações 1 e 1A:

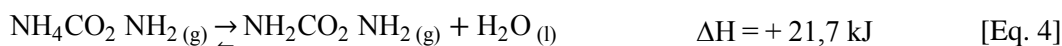
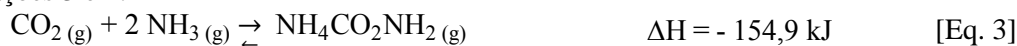


iv. Separação do nitrogênio (N₂) do ar atmosférico: a partir da destilação fracionada;

v. Reação de síntese da amônia (NH₃): via processo Haber-Bosch, conforme a Equação 2:



vi. Reação de síntese da ureia (NH₂CONH₂): via processo Bosch-Meiser, segundo as Equações 3 e 4:



1.2. Análise Econômica

Um estudo de viabilidade econômica permite constatar se o processo é rentável e atrativo do ponto de vista financeiro. Com o investimento total estimado e, considerados todos os custos e receitas envolvidos nas operações, gera-se o fluxo de caixa, utilizado para calcular os índices econômicos VPL e TIR, muito úteis para inferir sobre a viabilidade econômica do investimento.

1.2.1. Estimativa de Investimentos

O investimento total corresponde ao total de recursos aportado no empreendimento. Para determiná-lo, deve-se aplicar a Equação 5.

$$I_{\text{total}} = I_{\text{fixo}} + I_{\text{giro}} + I_{\text{partida}} \quad [\text{Eq. 5}]$$

O investimento de giro é um capital fixo que deve ser mantido durante toda a vida útil do empreendimento [4]. Por sua vez, o investimento de partida serve para cobrir custos que ocorrem antes e durante a partida do processo, como a contratação antecipada de pessoal e a operação ineficiente do processo durante a fase inicial [22].

O investimento fixo é segmentado em investimento direto e indireto, segundo a Equação 6. O termo direto está relacionado aos investimentos nos equipamentos de produção, referidos como *Inside Battery Limits* (ISBL) e também aos investimentos em utilidades e sistemas auxiliares, ou *Outside Battery Limits* (OSBL), como área de estocagem e tratamento de efluentes.

$$I_{\text{direto}} = \text{ISBL} + \text{OSBL} \quad [\text{Eq. 6}]$$

Já o investimento indireto refere-se aos elementos que não influenciam na capacidade da planta, como os custos com estudos de viabilidade, gerenciamento de *know-how* e planos de contingências [23]. O investimento direto é a soma do ISBL com OSBL [4], consoante à Equação 6. Na literatura, encontram-se correlações entre os termos das Equações 6 e 7, tornando possível obter o investimento total (I_{TOTAL}) em função do ISBL dos equipamentos [22].

1.2.2. ISBL dos Equipamentos

O ISBL representa o custo instalado dos equipamentos diretamente envolvidos na produção. Com uma série de equações utilizadas por Frare [24], pôde-se relacionar as dimensões características, potência consumida e os índices de Marshal e Swift para estimar o ISBL.

1.2.3. Estimativas de Custos e Receitas

Entende-se por custo a soma dos valores de todos os recursos e operações utilizados no processo produtivo de certa atividade, englobando o custo anual com utilidades (vapor, água), com reagentes, solventes e consumo de energia elétrica. Os custos podem ser classificados de diversas maneiras, de acordo com sua finalidade. Considerado o volume de produção, os custos são classificados em fixos ou variáveis.

Os custos fixos são aqueles que não sofrem alteração de valor em caso de aumento ou diminuição da produção. Independem, portanto, do nível de atividade, conhecidos também como custo de estrutura. Por outro lado, os custos variáveis são aqueles que variam proporcionalmente de acordo com o nível de produção ou atividades. Seus valores dependem diretamente do volume produzido ou do volume de vendas efetivado num determinado período.

A receita total, por sua vez, é formada pelas entradas de recursos financeiros que a planta recebe por ano durante sua vida útil, originada a partir da comercialização do seu produto [25].

1.2.4. Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa é uma ferramenta de controle financeiro que tem por objetivo auxiliar na tomada de decisões sobre a situação do caixa da empresa. Este relatório gerencial informa a origem de todo o dinheiro que entrou no caixa e a aplicação de todo o dinheiro que saiu do caixa em um determinado período.

1.2.5. Indicadores Econômicos

- Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A TMA consiste na taxa mínima de retorno que o investidor pretende obter como rendimento de um investimento, sendo também denominada taxa de juros comparativa ou taxa de desconto [25]. Alguns autores consideram a TMA como a taxa de juros equivalente à maior rentabilidade das aplicações correntes e de pouco risco, sendo que o investimento é atrativo se este render no mínimo o valor da TMA. Para o caso do Brasil, de um modo geral estima-se a TMA em 15%.

- Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL de uma proposta de investimento é a soma algébrica, na data zero, dos saldos dos fluxos de caixa descontados à Taxa Mínima de Atratividade, conforme expressa a Equação 7.

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+i)^j} - I \quad [\text{Eq. 7}]$$

em que, C_j = fluxo de caixa, de ordem j ;

i = taxa mínima de atratividade;

n = número de períodos de tempo;

I = investimento.

Sob este critério, o projeto só será viável no caso do ser $VPL > 0$.

- Taxa Interna de Retorno (TIR)

Também conhecida como *Internal Rate of Return* (ROR), a TIR corresponde ao cálculo da taxa de desconto que, aplicada a uma série de entradas e saídas de caixa, iguala o fluxo a zero [26], conforme expressa a Equação 8.

$$\sum_{j=1}^n \frac{EC_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=1}^n \frac{SC_j}{(1+i)^j} = 0 \quad [\text{Eq. 8}]$$

em que, EC_j = entradas de caixa, de ordem j ;

SC_j = saídas de caixa, de ordem j .

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho pode ser classificado como um modelo de pesquisa bibliográfica no aspecto teórico, na busca de referências bibliográficas e pesquisa exploratória, e na busca de soluções existentes para o problema proposto. A metodologia de desenvolvimento deste trabalho seguiu os seguintes passos:

- i. **Identificação do problema de pesquisa:** levantamento das dificuldades (técnicas, econômicas, sociais e ambientais) passíveis de solução ou minimização a partir da proposta estudada;
- ii. **Pesquisa exploratória:** busca de referências bibliográficas para dar suporte ao que foi detectado como problema de pesquisa;
- iii. **Incorporação da proposta de estudo:** apresentação da alternativa escolhida como objeto de estudo dentre as outras possibilidades;
- iv. **Identificação de possíveis ferramentas computacionais (softwares):** aplicação de softwares que auxiliem na resolução das análises de viabilidade, a exemplo do *MS Excel* e *Maple e Hysys 3.2*, como suporte para a análise técnica; e *MS Excel* e *Risk Simulator*, como suporte para análise econômica;
- v. **Análise técnica da proposta:** verificação da viabilidade técnica do projeto quanto aos seus parâmetros básicos (tecnologia disponível, espaço, *layout* e condições operacionais);
- vi. **Análise econômica da proposta:** verificação da rentabilidade do projeto através da análise dos principais parâmetros econômicos (VPL, TIR, *Payback*).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de Viabilidade Econômica

Focada a limitação espacial de um ambiente *offshore*, ou seja, em mar aberto, empregou-se uma planta integrada de produção de amônia e ureia, conforme ilustra a Figura 1.

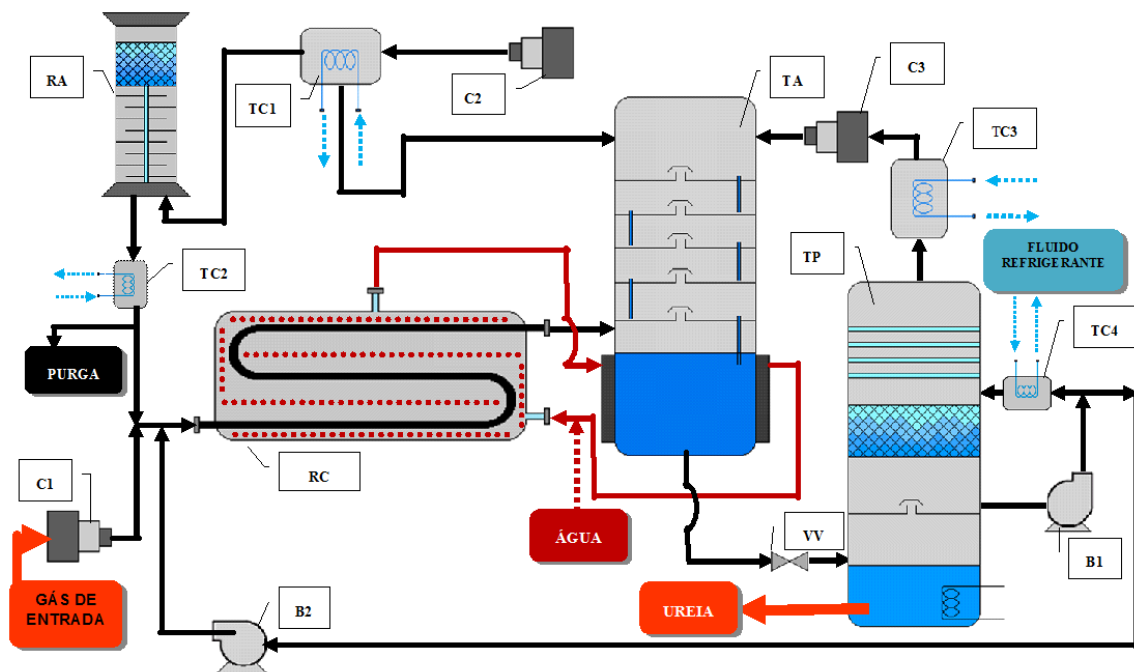


Figura 1: Fluxograma da produção integrada de amônia e ureia

Fonte: Adaptado da Patente US 3.371.115 [27]

Neste processo, o gás de entrada (CO_2 , N_2 e H_2) é comprimido (C1) e segue para o reator de carbamato (RC), onde ocorrem as Equações 3 e 4. Água é admitida para resfriamento, visto que a Equação 3 é altamente exotérmica. A corrente contendo carbamato de amônio (NH_4CONH_2) com CO_2 e N_2 não reagidos e frações de H_2 e NH_3 oriundas do reator de amônia (RA), segue para a torre de absorção (TA) onde a circulação de NH_3 no topo reage com o CO_2 presente na torre para formar mais carbamato. A corrente de topo, pobre em CO_2 (contendo apenas os gases leves, H_2 e N_2 , e frações de NH_3) é comprimida e ao passar por um trocador de calor (TC1) condensa a amônia presente, a qual recircula à TA para absorver mais CO_2 .

H_2 e N_2 seguem para o (RA) e a corrente resultante retoma o processo, passando antes no trocador de calor (TC2), para adequar a temperatura na entrada do RC. A base da TA é mantida sob aquecimento, para favorecer a decomposição do carbamato em ureia (NH_2CONH_2), conforme a Equação 4. A corrente de fundo da TA (contendo carbamato de amônio, ureia, CO_2 e H_2O) segue para a Torre de Purificação (TP), também provida de aquecimento em sua base para decompor o carbamato presente. Parte do carbamato eflui pela torre e, ao passar pela seção de recheio, decompõe-se em amônia (corrente de topo que retorna à TA) e CO_2 (que retorna à base da TP). Nesta unidade, a ureia produzida é removida e a solução de carbamato recircula no processo.

Empregou-se nos cálculos dos balanços mássicos e energéticos uma corrente de entrada com 7% de H_2 , 35% de N_2 e 58% de CO_2 , para uma base de cálculo de 137,5 t/dia de gás de entrada. A capacidade da planta foi estimada em 1,02 Mt/ano de ureia (300 dias em operação/ano [23]). Para a valoração do consumo energético das torres de separação, empregou-se uma análise termodinâmica baseada no cálculo da Energia Livre de Gibbs associada aos processos de separação.

Como resultados, a Tabela 1 apresenta os valores de energia consumida pelas bombas, compressores e trocadores de calor, a partir de simulação em ambiente *Hysys* e a Tabela 2 apresenta os valores de potência das unidades de separação (TA e TP).

Tabela 1: Energia consumida pelos equipamentos de linha

| EQUIPAMENTO | CONSUMO (kW.h) |
|-------------------------|----------------|
| Bomba (B1) | 1505,8 |
| Bomba (B2) | 3130,6 |
| Bomba (B3) | 3,4 |
| Compressor (C1) | 2330 |
| Compressor (C2) | 1352 |
| Trocador de Calor (TC1) | 2753,3 |
| Trocador de Calor (TC2) | 4522,2 |
| Trocador de Calor (TC3) | 37,3 |
| Trocador de Calor (TC4) | 2331,1 |
| TOTAL Parcial | 17965,7 |

Tabela 2: Energia consumida pelas torres de separação, em kJ

| Equipamento | Consumo (kJ) | Consumo (kW.h) |
|---------------------------|--------------------|----------------|
| Torre de Absorção (TA) | $1,38 \times 10^7$ | 3833,3 |
| Torre de Purificação (TP) | $1,66 \times 10^7$ | 4611,1 |

Das Tabelas 1 e 2 conclui-se que o consumo energético total da planta é de $2,64 \times 10^4$ kWh, representando durante um ano de operação (300 dias) $1,90 \times 10^8$ kW em potência consumida.

3.2. Análise de Viabilidade Econômica

3.2.1. ISBL dos Equipamentos e Investimento Total

Aplicando as equações propostas por Frahe [24] e os índices de Marshal & Swift, estimaram-se os custos dos equipamentos dispostos na Figura 1, conforme exposto na Tabela 3.

Tabela 3: ISBL dos equipamentos de processo

| Equipamento | | Custo (US\$) |
|--|----------------|----------------------|
| Bombas | B1, B2 e B3 | 166.487,19 |
| Compressores | C1 e C2 | 1.042.867,05 |
| Trocadores de Calor | TC1, TC2 e TC3 | 20.990.680,81 |
| Torres de Absorção | TA e TP | 7.051.549,29 |
| Reatores | RA e RCA | 13.036.266,19 |
| TOTAL (Equipamentos Principais, EP) | | 41.893.349,34 |

Os dados para os reatores de amônia (RA) e de carbamato de amônio (RCA) foram extraídos da literatura [23], tendo capacidades muito próximas às necessidades do projeto de estudo. Para o cálculo do ISBL, descrito na Tabela 4, recorreu-se às relações específicas [22].

Tabela 4: Critérios para a estimativa do ISBL

| Item | Critério | Valor (US\$) |
|------------------------|----------|----------------------|
| Tubulações | 46% E.P. | 19.452.411,24 |
| Instrumentação | 15% E.P. | 6.343.177,58 |
| Materiais Elétricos | 7% E.P. | 2.960.146,54 |
| Isolamentos Térmicos | 2% E.P. | 845.757,01 |
| Pintura | 1% E.P. | 422.878,51 |
| Fundações e Estruturas | 15% E.P. | 6.343.177,58 |
| Montagem Industrial | 47% E.P. | 19.875.289,75 |
| Peças Sobressalentes | 3% E.P. | 1.268.635,52 |
| TOTAL (ISBL) | | 57.511.476,72 |

A partir do ISBL, foram obtidas as relações entre os termos da Equação 5 e o custo dos equipamentos principais, conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Estimativa do investimento total do projeto a partir da análise do ISBL

| Fator | Correspondência | Valor (US\$) |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| OSBL | 0,45 ISBL | 25.880.164,52 |
| I _{DIRETO} | 1,45 ISBL | 83.391.641,25 |
| I _{INDIRETO} | 0,25 I _{DIRETO} | 20.847.910,31 |
| I _{FIXO} | 1,81 ISBL | 104.095.772,86 |
| I _{GIRO} | 0,15 I _{TOTAL} | 20.847.910,31 |
| I _{PARTIDA} | 0,10 I _{FIXO} | 20.847.910,31 |
| I_{TOTAL} | 2,34 ISBL | 134.576.855,53 |

Estes valores correspondem apenas à estrutura básica da unidade de produção integrada de amônia e ureia. Os custos médios envolvendo unidades auxiliares estão contemplados na Tabela 6.

Tabela 6: Custo de unidades complementares ao projeto de estudo

| Unidade | Valor (US\$) | Fonte |
|------------------------------|---------------------|--------------|
| Separação de N ₂ | 6.000.000 | [28] |
| Separação de CO ₂ | 2.440.000 | [29] |
| Reforma do Gás Natural | 98.180.000 | [30] |

A partir das relações de estimativa de custos [23], foram previstos os custos fixos e variáveis do processo, conforme exposto nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Planilha de custos fixos do projeto

| Item | Fator de Custo (US\$) | Valor (US\$/Ano) |
|-----------------------------------|---|-------------------------|
| Mão de Obra (MO) | 2.500/Operador/Mês | 600.000,00 |
| Mão de Obra de Manutenção (MOM) | 1% IF | 1.040.957,73 |
| Mão de Obra de Laboratório (MOL) | 15% MOO | 90.000,00 |
| Material de Manutenção (MM) | 1% IF | 1.040.957,73 |
| Material de Laboratório (ML) | 3% MM | 31.228,73 |
| Despesas Financeiras (Juros) | Juros 8% a.a. | 8.327.661,82 |
| Seguros e Taxas | 5% IF | 5.204.788,64 |
| Despesas Gerais e Administrativas | 70% (MO +MOM + MOL) | 1.211.670,41 |
| Custos de Comercialização | 6% Receita Líquida | 30.631.748,33 |
| | TOTAL (Custo Fixo) | 48.179.013,41 |
| | Depreciação | 14.453.704,02 |
| | TOTAL (Custo Fixo + Depreciação) | 62.632.717,43 |

Para o cálculo do custo de mão de obra, considerou-se o número de 20 funcionários com salário médio mensal de US\$ 2.500 [23]. A valoração de custos com seguros e taxas levou em consideração a taxa de juros praticada em relação ao investimento fixo.

As despesas gerais contemplam os gastos administrativos da planta e a depreciação é o desgaste natural da unidade no decorrer do tempo, considerada como 30% do custo fixo [23]. Dessa forma, os custos fixos do processo foram estimados em US\$ 62.632.717,43 por ano.

Para a valoração dos elementos de custo flutuante (gás natural, ureia e créditos de carbono), consultou-se o *Index Mundi*, site de cotação de preços de ativos industriais na Internet (insumos e produtos).

O custo de H₂ refere-se à sua obtenção via reformador em um equipamento ATR (*Autothermal Reformer*) [31]. Devido à escassez de informações, para o custo com frete marítimo, consideraram-se os valores correspondentes à exportação de soja [32]. Contudo, os custos variáveis do processo foram estimados em US\$ 284.716.892,13 ao ano, conforme exposto na Tabela 8.

Tabela 8: Planilha dos custos variáveis do processo

| | | Preço (US\$) | Fonte | Quantidade | Valor (US\$) |
|------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Reagentes | Gás Natural | 87,56/Mm ³ | Index Mundi ⁽³⁾ | 2.077,7 Mm ³ | 181.923.412,00 |
| | CO ₂ | 40,00/t | [33] | 574.200 t | 22.968.000,00 |
| | N ₂ | 0,02/kg | [34] | 346.500.000 kg | 6.930.000,00 |
| | H ₂ | 2,04/kg | [31] | 69.300.000 kg | 141.372.000,00 |
| | Catalisador (-Fe) | 500/m ³ ⁽¹⁾ | Aliaba ⁽³⁾ | 7.630,8 m ³ | 3.815.400,00 |
| | Catalisador (-Ni) | 10/m ³ | Aliaba ⁽³⁾ | 11.020 m ³ ⁽²⁾ | 110.200,00 |
| Utilidades | Energia Elétrica | 144/MW | Alcoa ⁽³⁾ | 190.152,72 | 27.381.991,68 |
| Processo | Frete Marítimo | 0,02/km.t | [32] | 1.019.495,5 t | 24.467.892,00 |
| TOTAL | | | | | 284.716.892,13 |

(1) Catalisador à base de ferro para a síntese de amônia com carga de compra anual média de 7.630,8 considerando a carga total de catalisador (22.892,4 m³) dividida pela vida útil do catalisador (3 anos).

(2) Catalisador à base de níquel para a reforma primária do gás, com carga de compra anual média de 11.020 m³ considerando a carga total de catalisador (55.100 kg) dividido pela vida útil do catalisador (5 anos);

(3) Referências de pesquisa nos referidos *sites*.

Por escassez de informações, não foram considerados neste estudo os custos relacionados ao acabamento da ureia, que tem por finalidade conferir à ureia características adequadas a seu manuseio e às suas diferentes aplicações (fertilizante, pecuária ou industrial).

3.2.2. Fluxo de Caixa

Para o cálculo do fluxo de caixa, consideraram-se os seguintes critérios:

- **Receita de Vendas:** equivale ao somatório da multiplicação do preço dos produtos pela quantidade de produtos;
- **Impostos:** ICMS (Imposto de Comercialização de Mercadorias e Serviços) da região que será destinada a mercadoria, considerado como 5% da Receita de Vendas;
- **Receita Líquida:** equivale à receita de vendas decrescida dos impostos e contribuições incidentes sobre as mesmas, de acordo com Regulamento do Imposto de Renda RIR/99;
- **Custos Variáveis:** estão diretamente relacionados com o quantitativo de produção;
- **Custos Fixos com Depreciação:** somatório dos custos que independem da produção realizada mais a depreciação;
- **Lucro Bruto:** equivale ao valor da Receita Líquida, subtraído o custo fixo com depreciação e o custo variável;
- **Lucro Líquido:** equivale ao lucro bruto subtraído os impostos;
- **Depreciação:** refere-se ao desgaste natural da unidade ao decorrer do tempo;
- **Geração de Caixa:** é determinado a partir da dedução do valor dos investimentos e da formação do capital de giro líquido sobre o lucro líquido;
- **Capital de Giro:** 4% sobre as vendas, como taxa a ser aplicada sobre as vendas brutas para efeito de cálculo de capital de giro líquido ao final de cada período;
- **Valor Residual:** corresponde ao valor que a unidade terá ao término de sua depreciação. O critério de cálculo é o somatório de 1% dos equipamentos principais, 1% das tubulações, peças sobressalentes e do capital de giro [23];
- **Investimento:** é o capital que se aplica com o intuito de obter rendimentos a prazo. No primeiro ano o valor investido corresponde a 1/3 do investimento total, sendo o valor restante aplicado durante o segundo ano de construção [23].

Nesta análise, considerou-se o tempo de construção da planta de 2 anos, o mesmo período necessário para a construção da fábrica de fertilizantes nitrogenados da Raízen/PR. As Tabelas 9 e 10 expõem o fluxo de caixa do projeto.

Tabela 9: Fluxo de caixa para o projeto de estudo, em US\$ x 10⁸ por ano, para o horizonte de 12 anos.

| Itens | Anos | | | | | |
|---|--------|---------|---------|---------|-------|-------|
| | Ano 1 | Ano 2 | Ano 3 | Ano 4 | Ano 5 | Ano 6 |
| Receita de Vendas (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,00 | 510,5 | 510,5 | 510,5 | 510,3 |
| (-) Imposto – ICMS (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,00 | 25,6 | 25,5 | 25,5 | 25,5 |
| (=) Receita Líquida (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,00 | 485,0 | 485,0 | 485,0 | 485,0 |
| (-) Custos Fixos com Depreciação (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,00 | 62,6 | 62,6 | 62,6 | 62,6 |
| (-) Custos Variáveis (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,00 | 284,7 | 284,7 | 284,7 | 284,7 |
| (=) Lucro (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,00 | 137,6 | 137,6 | 137,6 | 137,6 |
| (-) Investimento (US\$) x 10 ⁶ | 80,4 | 160,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| (-) Formação de Capital de Giro (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,0 | 19,4 | 19,4 | 19,4 | 19,4 |
| (=) Geração de Caixa (US\$) x 10 ⁶ | - 80,4 | - 160,8 | 118,2 | 118,2 | 118,2 | 118,2 |
| (+) Valor Residual (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| (+) Valor Acumulado (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | - 80,4 | - 241,2 | - 122,9 | - 4,6 | 113,6 |
| (=) Fluxo de Caixa Livre (US\$) x 10 ⁶ | - 80,4 | - 241,2 | - 122,9 | - 4,7 | 113,5 | 231,8 |

Tabela 10: Continuação do fluxo de caixa para o projeto de estudo, em US\$ x 10⁸ por ano, para o horizonte de 12 anos.

| Itens | Anos | | | | | |
|---|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | Ano 7 | Ano 8 | Ano 9 | Ano 10 | Ano 11 | Ano 12 |
| Receita de Vendas (US\$) x 10 ⁶ | 510,5 | 510,5 | 510,5 | 510,5 | 510,5 | 510,3 |
| (-) Imposto – ICMS (US\$) x 10 ⁶ | 25,5 | 25,5 | 25,6 | 25,5 | 25,5 | 25,5 |
| (=) Receita Líquida (US\$) x 10 ⁶ | 485,0 | 485,0 | 485,0 | 485,0 | 485,0 | 485,0 |
| (-) Custos Fixos com Depreciação (US\$) x 10 ⁶ | 62,6 | 62,6 | 62,6 | 62,6 | 62,6 | 62,6 |
| (-) Custos Variáveis (US\$) x 10 ⁶ | 284,7 | 284,7 | 284,7 | 284,7 | 284,7 | 284,7 |
| (=) Lucro (US\$) x 10 ⁶ | 137,6 | 137,6 | 137,6 | 137,6 | 137,6 | 137,6 |
| (-) Investimento (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| (-) Formação de Capital de Giro (US\$) x 10 ⁶ | 19,4 | 1,4 | 19,4 | 19,4 | 19,4 | 19,4 |
| (=) Geração de Caixa (US\$) x 10 ⁶ | 118,2 | 118,2 | 118,2 | 118,2 | 118,2 | 118,2 |
| (+) Valor Residual (US\$) x 10 ⁶ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| (+) Valor Acumulado (US\$) x 10 ⁶ | 231,8 | 350,1 | 468,3 | 586,5 | 704,8 | 823,1 |
| (=) Fluxo de Caixa Livre (US\$) x 10 ⁶ | 350,1 | 468,3 | 586,5 | 704,8 | 823,1 | 941,3 |

A partir da análise do fluxo de caixa, observou-se que ao final de 11 anos de operação, admitida a média de 300 dias/ano [23], o projeto renderá aproximadamente US\$ 941 milhões (após 10 anos de operação, considerado os dois primeiros anos para construção da planta) e 6,1 anos para recuperar todo o investimento aplicado (4,1 anos após se iniciarem as operações).

O cálculo da função VPL (Valor Presente Líquido) foi realizado na planilha Microsoft Excel a partir das Equações 7 e 9. Seus resultados em função da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) podem ser analisados na Tabela 11.

Sintaxe da função VPL = VPL (taxa; valores)

[Eq. 9]

Tabela 11: Cálculo do VPL a partir do MS Excel para o projeto de estudo

| TMA | 8% | 10% | 15% |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| VPL [Eq. 9], (US\$) | 511.382.028,01 | 441.289.492,58 | 306.338.008,11 |
| Investimento (US\$) | 241.196.855,50 | 241.196.855,50 | 241.196.855,50 |
| VPL [Eq. 7], (US\$) | 270.185.172,51 | 200.092.637,08 | 65.141.152,61 |

A análise da Tabela 11 sugere diferentes abordagens entre as equações 7 e 9, visto que resultam em valores distintos. Isto ocorre porque, enquanto a Equação 9 abrange apenas as taxas e os fluxos, a Equação 7 abrange também o valor do investimento inicial, de forma que a equivalência estabelecida pela Equação 10 deve ser atingida.

$$\text{VPL [Eq. 9]} = \text{VPL [Eq. 7]} + \text{Investimento} \quad [\text{Eq. 10}]$$

Para este estudo, considerou-se a TMA de 15%, a qual é o valor comum para indústrias de grande porte [23]. Aplicando a TMA de 15% ao projeto de estudo, encontrou-se um VPL de US\$ 65.141.152,61. Por este critério o projeto pode ser aceito, visto que seu VPL é positivo.

3.2.3. Taxa Interna de Retorno

Da Equação 7, estimou-se a TIR em 32%. Neste caso, a TIR significa que o investidor recupera seu investimento em 32% sobre o capital inicial, demonstrando a viabilidade do projeto.

4. CONCLUSÃO

Foi proposta uma planta de produção integrada de amônia e ureia com configuração compacta, visando à operação em mar aberto (*offshore*). A viabilidade técnica da proposta foi alcançada, atingindo uma produção de aproximadamente 1 Mt/ano de ureia, com um consumo médio de 190 GW.h e potencial de evitar a emissão de 20,7 Mt/ano de CO₂. Tal quantidade equivale a 0,53 t de CO₂/t de ureia.

A viabilidade econômica do projeto também foi atingida. Para sua aplicação, seria necessário investir US\$ 241.196.855,50, a ser recuperado em 6,1 anos (ou 4,1 anos após o início da operação). Obter-se-ia um lucro anual de US\$ 225.812.246,72, o qual, findados 12 anos, renderiam no caixa aproximadamente US\$ 941 bilhões. Aplicando-se uma taxa de 15%, estimou-se um VPL de US\$ 65.141.152,61 e uma TIR de 48%.

Adicionalmente, o projeto contempla a inserção no mercado de créditos de carbono a partir dos 20,7 milhões de toneladas de CO₂ anualmente evitadas, amparando ambientalmente a exploração petrolífera no contexto do pré-sal.

5. AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, em particular ao PRH 45, da Universidade Federal de Sergipe.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ravagnani AG, Suslick SB. Modelo dinâmico de sequestro geológico de CO₂ em reservatórios de petróleo. *Rev. Bras. Geociênc.* 2008 Mar; 38(1):39-60. ISSN 0375-7536.
2. Medina PN. Uma abordagem da teoria dos jogos para ratear os benefícios oriundos da injeção de gás rico em CO₂ nos reservatórios do pré-sal [dissertação], Rio de Janeiro (RJ): COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2012. 85p.
3. Braga B, Hespanhol I, Conejo JGL. *Introdução à engenharia ambiental*. São Paulo: Prentice Hall; 2002. 336p.
4. Rodrigues MP. Estudo de viabilidade técnica e econômica na etapa de revalorização da reciclagem mecânica de polietileno e polipropileno [TCC], Salvador (BA): Universidade Salvador, Salvador; 2011.
5. Ravanchi MT, Sahebdehfar S. Carbon dioxide capture and utilization in petrochemical industry: potentials and challenge. *Appl. Petrochem. Res.* 2014 May; 4(1):63–77, doi 10.1007/s13203-014-0050-5.
6. Pires JM, Martins FG, Alvim-Ferraz MM, Simes M. Recent developments on carbon capture and storage: an overview. *Chem. Eng. Res. Des.* 2001 Aug; 89(9):1446–1460, doi 10.1016/j.cherd.2011.01.028.
7. Ravanchi MT, Sahebdehfar S, Zangeneh FT. Carbon dioxide sequestration in petrochemical industries with the aim of reduction in greenhouse gas emissions. *Front. Chem. Sci. Eng.* 2011 Mar; 5(2):173–178, doi 10.1007/s11705-010-0562-1.
8. Wang M, Lawal A, Stephenson P, Sidders J, Ramshaw C. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a state-of-the-art review. *Chem. Eng. Res. Des.* 2011 Sep; 89(9):1609–1624, doi 10.1016/j.cherd.2010.11.005.
9. Kargari A, Ravanchi MT. Carbon dioxide: capturing and utilization. *Greenhouse Gases - capturing, Utilization and Reduction*. 2012, ISBN: 978-953-51-0192-5.
10. Bandyopadhyay A. Amine versus ammonia absorption of CO₂ as a measure of reducing GHG emission: a critical analysis. *Clean Technol Environ.* 2011 Apr; 13(2):269-294, doi 10.1007/s10098-010-0299-z.
11. Sabouni R, Kazemian H, Rohani S. Carbon dioxide capturing technologies: a review focusing on metal organic framework materials (MOFs). *Environ Sci Pollut R.* 2014 Apr; 21(8):5427-5449, doi 10.1007/s11356-013-2406-2.
12. Mumford KA, Wu Y, Smith KH, Stevens GW. Review of solvent based carbon-dioxide capture Technologies. *Frontiers of Chemical Science and Engineering.* 2015 Jun; 9(2):125-141, doi 10.1007/s11705-015-1514-6.
13. Koelbl BS, van den Broek MA, Faaij AC, van Vuuren DP. Uncertainty in carbon capture and storage (CCS) deployment projections: a cross-model comparison exercise. *Climatic Change.* 2014 Apr; 123(3):461-476, doi 10.1007/s10584-013-1050-7.
14. Bhola V, Swalaha S, Kumar RR, Singh M, Bux F. Overview of the potential of microalgae for CO₂ sequestration. *Int J Environ Sci Te.* 2014 Oct1(7):2103-2118, doi 10.1007/s13762-013-0487-6.
15. Singh UB, Ahluwalia AS. Microalgae: a promising tool for carbon sequestration. *Mitig Adapt Strategies Glob Chang.* 2013 Jan; 18(1):73-95, doi 10.1007/s11027-012-9393-3.
16. Olah GA. The role of catalysis in replacing oil by renewable methanol using carbon dioxide capture and recycling (CCR). *Catal Lett.* 2013 Oct; 143(10): 983-987, doi 10.1007/s10562-013-1096-1. 145p.
17. Monteiro JS. Um estudo sobre alternativas de sequestro de carbono: modelos, métricas e otimalidade [dissertação]. Rio de Janeiro: Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2009.
18. Aquino AS. Análise de rotas alternativas para sequestro químico de CO₂: produção de metanol, gás de síntese e ácido acético [TCC]. Rio de Janeiro (RJ): Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2008. 86p.
19. Bose A, Jana K, Mitra D, De S. Co-production of power and urea from coal with CO₂ capture: performance assessment. *Clean Technol Environ.* 2015 Jun; 17(5):1271-1280, doi 10.1007/s10098-015-0960-7.
20. Havran V, Dudukovic MP, Lo CS. Conversion of methane and carbon dioxide to higher value products. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011 May; 50(12):7089–7100, doi 10.1021/ie2000192.
21. Zangeneh FT, Sahebdehfar S, Ravanchi MT. Conversion of carbon dioxide to valuable petrochemicals: an approach to clean development mechanism. *Jour. Nat. Gas. Chem.* 2011 May; 20(5):219–231, doi 10.1016/S1003-9953(10)60191-0.
22. Perlingeiro CG. *Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos*. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 208 p.

23. Saraiva TA. Estudo de viabilidade técnica e econômica de processos de produção de ureia [tcc]. Salvador (BA): Universidade Salvador; 2010.
24. Frare LM, Gimenes ML, Pereira NC. Correlações para estimativas de custos na remoção de ácido sulfídrico de biogás. *Acta Sci Technol.* 2006 Mar; 28(1):29-37, doi 10.4025/actascitechnol.v28i1.1282.
25. Sales CB. Avaliação técnico-econômica das rotas tecnológicas convencionais e avançadas para produção de eletricidade através da gaseificação de biomassa [dissertação]. Itajubá (MG): Universidade Federal de Itajubá; 2007. 187 p.
26. Balarine OO. Desvendando o cálculo da tir. *Revista de administração.* 2003 jan; 38(1):15-24.
27. Cook LH, Mavrovic I. Process for combined production of ammonia and urea. *United States Patent* 3371115, 1968.
28. Santaren CA. Análise de sistemas de elevação artificial por injeção de nitrogênio para surgência de poços e produção. Rio de Janeiro (RJ): Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
29. Maia JP. Separação e captura de dióxido de carbono em instalações marítimas de produção de petróleo [tese]. São Paulo (SP): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2007. 176 p.
30. Cruz FE. Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: avaliação exergética e custo de produção [tese]. São Paulo (SP): Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2010. 183 p.
31. Lopes DG. Análise técnica e econômica da inserção da tecnologia de produção de hidrogênio a partir da reforma de etanol para geração de energia elétrica com células a combustível [tese]. Campinas (SP): Universidade Estadual de Campinas; 2009.
32. Ojima AO. Perfil da logística de transporte de soja no Brasil. *Informações Econômica.* 2006 Jan; 36(1).
33. Costa IL. Análise do potencial técnico do sequestro geológico de CO₂ no setor petróleo no Brasil [dissertação]. Rio de Janeiro (RJ): COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2009. 107 p.
34. Lavezo AE. Estudo da minimização do custo de um processo de separação de misturas gasosas multicomponentes através da membrana de fibra oca [dissertação]. Campinas (SP): Universidade Estadual de Campinas; 2006.