

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**OKSSANA LETÍCIA KRELING**

**PRODUÇÃO DE UREIA A PARTIR DO  
GÁS DE SÍNTESE OBTIDO DOS  
CARVÕES MINERAIS DO SUL DO  
BRASIL - AVALIAÇÃO TÉCNICA E  
ECONÔMICA**

**Bagé  
2023**

**OKSSANA LETÍCIA KRELING**

**PRODUÇÃO DE UREIA A PARTIR DO  
GÁS DE SÍNTESE OBTIDO DOS  
CARVÕES MINERAIS DO SUL DO  
BRASIL - AVALIAÇÃO TÉCNICA E  
ECONÔMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Química como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Sérgio Meth Morgenbesser

**Bagé  
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

K92p Kreling, Okssana Letícia

Produção de ureia a partir do gás de síntese obtido dos  
carvões minerais do sul do brasil: avaliação técnica e  
econômica / Okssana Letícia Kreling.

43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2023.

"Orientação: Sérgio Meth Morgenbesser".

1. Ureia. 2. Carvão mineral. 3. Processo Stamicarbon. I.  
Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**OKSSANA LETÍCIA KRELING**

**PRODUÇÃO DE UREIA A PARTIR DO GÁS DE SÍNTESE OBTIDO DOS CARVÕES MINERAIS DO SUL DO BRASIL - AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 04 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Sérgio Meth Morgenbesser  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Edson Abel dos Santos Chiamonte  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Udo Eckard Sinks  
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **EDSON ABEL DOS SANTOS CHIARAMONTE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/02/2023, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **UDO ECKARD SINKS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SERGIO METH MORGENBESSER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/02/2023, às 12:08, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1043879** e o código CRC **B6B11AB4**.

Referência: Processo nº 23100.002091/2023-90 SEI nº 1043879

## RESUMO

Cada vez mais o crescimento populacional e a carência de nutrientes no solo vem se tornando um problema para suprir a demanda por alimentos no mundo inteiro. Com isso, a procura por fertilizantes cresce como solução para este problema. Fertilizantes nitrogenados são conhecidos pelo seu impacto significativo no crescimento e desenvolvimento de lavouras, dado que a ausência de nitrogênio nas plantas dificultar o seu desenvolvimento. Dentre os fertilizantes nitrogenados, a ureia possui maior concentração de nitrogênio em sua composição (45%). Atualmente, o Brasil conta com apenas duas unidades fabris, hoje arrendadas pela Unigel. A produção destas duas fábricas são cerca de 650 mil toneladas de ureia ao ano. Entretanto, a quantidade produzida não supre a demanda dos produtores rurais brasileiros (cerca de 7 milhões de toneladas), o que deixa o país dependente de importações a preços elevados. Como alternativa para melhora da atual situação do mercado de ureia no Brasil, o presente trabalho avalia tecnicamente e economicamente a seção de síntese de produção de ureia utilizando gás de síntese obtido dos carvões minerais da região Sul do Brasil utilizando o processo de Stripping de CO<sub>2</sub> da Stamicarbon. Obteve-se como resultado uma planta produzindo 2.685.099,61 toneladas de ureia granulada ao ano, operando com uma eficiência de 83,26% e um preço de custo de R\$259,20 por tonelada de ureia produzida. Ao contrário do padrão adotado pelas indústrias utilizando amônia e gás carbônico, neste trabalho a ureia é produzida a partir da amônia e o gás de síntese produzido de carvões minerais. Para isso, simulou-se a seção de síntese para produção de ureia. Com os dados extraídos da simulação, foram realizadas avaliações técnicas e econômicas sobre a viabilidade de implantação deste projeto.

**Palavras-chave:** Ureia. Carvão mineral. Processo Stamicarbon.

## ABSTRACT

Increasingly, population growth and the lack of nutrients in the soil have become a problem to meet the demand for food worldwide. As a result, the demand for fertilizers grows as a solution to this problem. Nitrogen fertilizers are known for their significant impact on the growth and development of crops, given that the absence of nitrogen in plants hinders their development. Among nitrogen fertilizers, urea has the highest concentration of nitrogen in its composition (45%). Currently, Brazil has only two manufacturing units, currently leased by Unigel. The production of these two factories is around 650 thousand tons of urea per year. However, the amount produced does not meet the demand of Brazilian rural producers (about 7 million tons), which leaves the country dependent on imports at high prices. As an alternative to improve the current situation of the urea market in Brazil, the present work technically and economically evaluates the synthesis section of urea production using synthesis gas obtained from mineral coals in the southern region of Brazil using the Stripping process CO<sub>2</sub> by Stamicarbon. As a result, a plant producing 2.685.099,61 tons of granulated urea per year was obtained, operating with an efficiency of 83,26% and a cost price of R\$259,20 per ton of urea produced. Contrary to the pattern adopted by industries using ammonia and carbon dioxide, in this work urea is produced from ammonia and synthesis gas produced from coal. For this, the synthesis section for urea production was simulated. With the data extracted from the simulation, technical and economic evaluations were carried out on the feasibility of implementing this project.

**Keywords:** Urea. Mineral Coal. Stamicarbon Process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ureia comercializada em formato granular .....	14
Figura 2	Sistema reacional de produção de ureia nas condições de síntese.....	17
Figura 3	Jazidas de carvão mineral no Rio Grande do Sul .....	20
Figura 4	Representação geral das etapas de produção de ureia .....	22
Figura 5	Fluxo de processos da seção de síntese .....	23
Figura 6	Representação em blocos da seção de síntese e granulação de ureia .....	32
Figura 7	Fluxo de caixa.....	38



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição característica do carvão .....	20
Tabela 2	Geração de biureto conforme variação da temperatura .....	29
Tabela 3	Parâmetros de operação da seção de síntese.....	33
Tabela 4	Compostos de alimentação da planta .....	33
Tabela 5	Eficiência da conversão em ureia da planta.....	34
Tabela 6	Taxa de conversão em ureia por equipamento.....	34
Tabela 7	Produção de ureia .....	35
Tabela 8	Produção global de ureia .....	35
Tabela 9	Custos de implantação .....	36
Tabela 10	Valores utilizados para a precificação.....	37
Tabela 11	Fluxo de caixa previsto para 10 anos.....	37
Tabela 12	Índices de viabilidade econômica.....	38

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 Objetivo Geral .....	12
1.2 Objetivos Específicos .....	12
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>13</b>
2.1 Ureia .....	13
2.2 Síntese da Ureia .....	14
2.2.1 Propriedades Químicas do Processo de Síntese .....	15
2.2.1.1 Equilíbrio Térmico .....	16
2.2.1.2 Equilíbrio Líquido-Vapor.....	17
2.2.2 Formação de Biureto .....	18
2.3 Gás de Síntese ( <i>Syngas</i> ) .....	18
2.4 Carvão Mineral no Brasil.....	19
2.5 Mercado da Ureia no Brasil .....	21
2.6 Processo Produtivo da Ureia .....	21
2.7 Trabalhos Correlatos .....	23
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>25</b>
3.1 Simulação da Planta .....	25
3.1.1 Equipamentos utilizados .....	26
3.1.2 Modelagem Termodinâmica.....	27
3.1.3 Método de Estimativa de Biureto .....	28
3.2 Avaliação Técnica.....	29
3.3 Avaliação Econômica .....	29
<b>4 RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>31</b>
4.1 Validação Técnica .....	31
4.2 Análise Econômica .....	36
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e a escassez de nutrientes nos solos, a demanda por alimentos vem crescendo ano após ano. Desta forma, o produtor rural busca por soluções como a aplicação de fertilizantes, provendo mais nutrientes ao solo (SAATH; FACHINELLO, 2018). A alta demanda por fertilizantes transparece a necessidade de construção de novas instalações industriais modernas ou modificação das já existentes, de modo a aumentar suas capacidades produtivas.

O nitrogênio é importante para o crescimento e desenvolvimento das plantas, e quando ausente dificulta o crescimento das mesmas. Em meio aos diversos fertilizantes nitrogenados, destaca-se a ureia como a mais utilizada devido a alta concentração de nitrogênio (cerca de 46%). Por conta disso e do crescimento populacional crescente desde os séculos XIX e XX, os fertilizantes nitrogenados, principalmente a ureia, são predominantes no Brasil e no mundo (FRINK; WAGGONER; AUSUBEL, 1999).

Hoje, o Brasil produz cerca de 650 mil toneladas de ureia, número inferior aos 7,1 milhões de toneladas importadas para suprir a demanda brasileira anual, resultando em um gasto de cerca de 2 bilhões de dólares em 2020 (MALISZEWSKI, 2021). Neste cenário, o Brasil acaba dependente da importação de ureia de alto custo, acarretando em um custo ainda maior para o produtor rural, e consequentemente, para o consumidor final.

O *Stripping* de CO<sub>2</sub> é um processo desenvolvido pela empresa Stamicarbon para aplicação no processo produtivo de ureia, embora haja estudos testando a aplicabilidade do processo para outras produções como de etanol por meio de rotas sintéticas. Seu principal diferencial comparado a outros métodos é a utilização do equipamento *stripper* de CO<sub>2</sub>: uma torre vertical utilizada para dissociar o carbamato residual gerado na síntese de ureia (MEESSEN, 2010).

A produção de ureia utilizando o *Stripping* de CO<sub>2</sub> pode ser decomposto em cinco passos: (i) desabsorção-hidrólise dos gases inertes de entrada, (ii) síntese de formação da ureia com dióxido de carbono e amônia, (iii) evaporação da água e gases inertes não convertidos são encaminhados para a (iv) recirculação e a ureia convertida é direcionada para a (v) seção de granulação. O processo desenvolvido pela Stamicarbon proporciona um rendimento de cerca de 80% de ureia, podendo ser ainda mais eficiente utilizando o CO<sub>2</sub> convertido em ureia e o excesso em amônia. Então, a inserção do *stripper* de CO<sub>2</sub> da Stamicarbon pode proporcionar a redução de investimentos, aumento da eficiência da planta, redução dos custos de operação e também minimiza as emissões no processo.

Existem outros processos aplicados na produção de ureia como *Once Through Urea Process*: um processo convencional onde o carbamato não convertido é dissociado em amônia e dióxido de carbono. Este processo considerado simples, entretanto, comparado com o processo *Stripping* de CO<sub>2</sub>, possui baixa conversão total de dióxido de carbono, que é agente limitante para a conversão de ureia. Entretanto, proporciona uma conversão de até 60% em ureia (KUMAR; DAS, 2007).

A ureia é convencionalmente produzida a partir da amônia e do gás carbônico, sendo este último amplamente produzido pela indústria petroquímica. Além deste processo, uma alternativa para obtenção de hidrogênio e gás carbônico é o processo de gaseificação do carvão mineral. Uma matéria-prima abundante no Brasil, viável economicamente e de fácil produção se comparado às matérias da indústria petroquímica.

O carvão mineral é um fósil natural extraído da terra por meio do processo de mineração, podendo ser tanto subterrânea como a céu aberto. Suas principais aplicações são a geração de energia elétrica em usinas termelétricas e também como matéria-prima para fabricação de aço nas siderúrgicas. O carvão mineral brasileiro é majoritariamente utilizado nas termelétricas, onde são queimados para a geração de energia. Entretanto, o processo gera grande liberação de poluentes na atmosfera, contribuindo com o aumento do aquecimento global e efeito estufa. Outro problema é o alto teor de cinzas gerado pela queima do carvão encontrado em solo brasileiro.

A gaseificação do carvão mineral proporciona uma eficiência de conversão energética de 45% a 48%, valor mais eficiente que a combustão direta nas termelétricas (35% a 40%). O método de gaseificação também possibilita o melhor aproveitamento na obtenção de outros produtos como enxofre. A gaseificação do carvão mineral é, portanto, uma alternativa economicamente viável e sustentável de aproveitamento para a produção do gás de síntese matéria-prima da ureia. Assim, este trabalho objetiva uma análise técnica e econômica da produção de ureia utilizando carvão mineral como combustível e matéria-prima para o processo de *Stripping* de CO<sub>2</sub>.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e bibliográfica utilizada na elaboração deste projeto. O Capítulo 3 apresenta as etapas da metodologia de desenvolvimento adotada. Em sequência, são apresentados no Capítulo 4 os resultados desenvolvidos nas análises técnico-econômica. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais sobre este trabalho. No corrente capítulo, as próximas seções se organizam da seguinte forma: a Seção 1.1 apresenta o objetivo geral de estudo e a Seção 1.2 descreve os objetivos específicos.

## 1.1 Objetivo Geral

Avaliar tecnicamente e economicamente a produção de ureia a partir do gás de síntese obtido dos carvões minerais do sul do Brasil, utilizando o processo de *Stripping* de CO<sub>2</sub> da Stamicarbon.

## 1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar sobre diferentes processos para produção industrial de ureia;
- Levantar estudos anteriores sobre a simulação de produção de ureia;
- Levantar estudos anteriores sobre a utilização de carvão mineral para produção de gás de síntese;
- Elaborar a simulação da seção produtora de ureia utilizando o mecanismo de *Stripping* de CO<sub>2</sub> da Stamicarbon;
- Analisar os dados resultantes da simulação e comparar com dados de projetos similares;
- Realizar a análise econômica da produção de ureia simulada;
- Avaliar a viabilidade econômica e sustentável do projeto.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta o referencial teórico deste trabalho, abordando os temas julgados necessários para a compreensão do mesmo. As próximas seções são divididas da seguinte forma: a Seção 2.1 apresenta as características físico-químicas da ureia além de uma breve contextualização sobre sua comercialização e produção. A Seção 2.2 aborda as propriedades químicas obtidas durante o processo de síntese na produção de ureia e a formação de outros compostos como o biureto. Na Seção 2.3 é apresentado o processo produtivo do gás de síntese. A Seção 2.4 descreve as principais características do carvão mineral e sua distribuição geográfica no Brasil. A Seção 2.5 contextualiza brevemente o mercado de ureia no Brasil atualmente. Na Seção 2.6 são demonstrados as etapas do processo de síntese e as principais condições para operação do processo. Por fim, a Seção 2.7 apresenta um levantamento de trabalhos correlatos na simulação e modelagem de processos relativos a produção de ureia.

### 2.1 Ureia

A ureia ou carbamida é um fertilizante nitrogenado sólido, de fórmula molecular  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ . Sua aparência é de um composto branco e inodoro que sob condições normais de temperatura e pressão é encontrado em estado sólido (MEESSEN; PETERSEN, 1996).

A ureia, entre os fertilizantes nitrogenados, é a que possui maior concentração de nitrogênio com cerca de 45% (YANO; TAKAHASHI; WATANABE, 2005). As formas mais comumente encontradas da ureia são perolada (1 a 2 mm), granulada (2 a 4 mm) e pastilhada (2 a 4 mm). Basicamente o que diferencia a utilização de um formato ou outro são as condições de aplicação. No presente trabalho daremos ênfase para a ureia granulada, a qual é mostrada na Figura 1.

O uso comercial da ureia concentra-se na forma de fertilizante agrícola (cerca de 90% do mercado total da ureia). Apesar disso, a ureia também pode ser utilizada como alimento em rações animais, reagente da indústria farmacêutica ou insumo na produção de resinas e polímeros.

Segundo EPE (2019), a capacidade de produção global de ureia em 2019 foi de aproximadamente 218 milhões de toneladas métricas e que deverá aumentar para cerca de 302 milhões de toneladas métricas até 2030. No Brasil, a produção de ureia em 2020 foi de apenas 4 mil toneladas, número muito inferior se comparado as 643 mil toneladas

produzidas em 2018, quando haviam três unidades produtoras em operação (EPE, 2019).

A produção nacional de ureia até 2019 ficava a cargo de apenas duas empresas: a Petrobras com duas unidades fabris, sendo uma em Laranjeiras/SE, com capacidade produtiva de 594 mil toneladas por ano e, outra em Camaçari/BA com capacidade produtiva de 495 mil toneladas por ano. Em novembro de 2019 a Unigel arrendou, pelo período de dez anos, ambas as fábricas da Petrobrás. Contudo, em 2020, por conta da pandemia causada pela COVID-19 a empresa suspendeu suas operações, somente retornando a produção no primeiro trimestre de 2021.

Entretanto, somente uma empresa não é capaz de suprir a demanda nacional por ureia. Somente em 2020, o Brasil importou cerca de 7 milhões de toneladas de ureia para suprir sua demanda de aproximadamente 7,5 milhões de toneladas. Sendo assim, extremamente dependente do mercado internacional, o que resultou em um gasto de 270 dólares por tonelada no ano de 2020.

Figura 1 – Ureia comercializada em formato granular



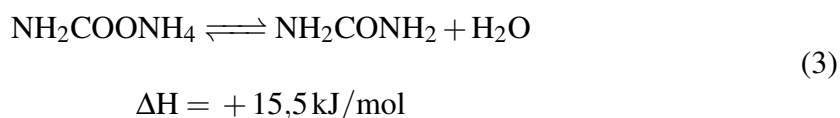
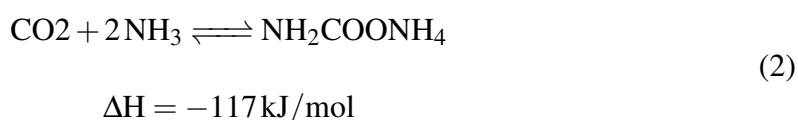
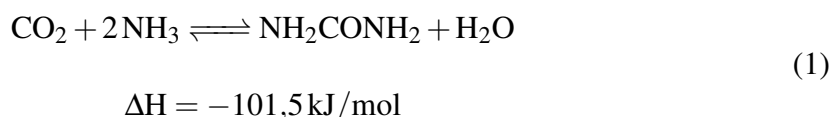
Fonte: autora.

## 2.2 Síntese da Ureia

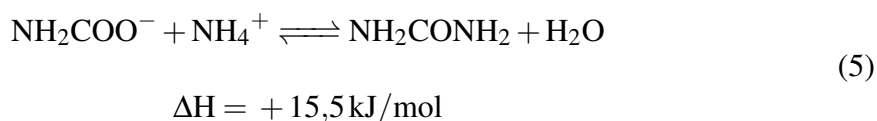
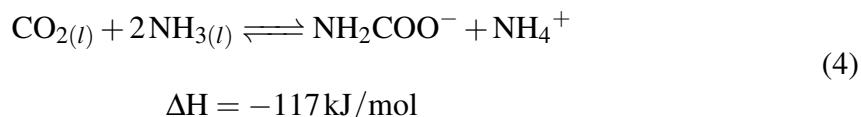
Segundo Meessen (2010), o processo utilizado pelas indústrias produtoras de ureia se baseia na reação reversível entre dióxido de carbono e amônia apresentado na Equação 1.

O processo de síntese é dividido em duas etapas, na primeira etapa o dióxido de

carbono e a amônia são convertidos em carbamato de amônio. A Equação 2 apresenta esta reação caracterizada por sua forma reversível, altamente exotérmica e extremamente rápida. No segundo estágio ocorre a secagem do carbamato de amônio resultando na decomposição do carbamato em água e ureia. Então reagindo de maneira reversível, lenta e levemente endotérmica (Equação 3).



Irazoqui, Isla e Genoud (1993) cita em seu trabalho que, devido ao caráter fortemente iônico do carbamato de amônio gerado durante o tempo de residência dentro do reator, o carbamato pode ser considerado dissociado em formato iônico ( $\text{H}_2\text{NCOO}^-$  e  $\text{NH}_4^+$ ). Esta reação é apresentada nas Equação 4 e 5.



Ao longo desta seção, a Subseção 2.2.1 aborda os dois principais pontos das características químicas da síntese da ureia: Equilíbrio Térmico e Equilíbrio Líquido-Vapor (ELV). Por fim, a Subseção 2.2.2 apresenta um dos principais contaminantes gerados na produção da ureia, o biureto.

### 2.2.1 Propriedades Químicas do Processo de Síntese

Na zona de síntese são encontradas as principais espécies químicas envolvidas no processo, sendo eles: amônia ( $\text{NH}_3$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), carbamato de



amônio ( $\text{NH}_2\text{COONH}_4$ ), ureia ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) e também o gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ). Este último não interfere nas reações de produção de ureia, agindo de forma passiva nas reações de corrosão.

Hamidipour, Mostoufi e Sotudeh-Gharebagh (2005) cita em suas obras a importância de considerar todos os produtos do meio reacional para os cálculos termodinâmicos. Porém, há exceções, como o reator de síntese de ureia, onde somente é possível assumir que as reações principais ocorrem, pois as condições de formação dos outros produtos não são favorecidas na etapa de síntese e podem ser negligenciadas.

### 2.2.1.1 Equilíbrio Térmico

O equilíbrio térmico é um fenômeno característico de reações reversíveis, que são retratadas pela capacidade dos produtos reagirem de forma reversa e retornarem aos reagentes iniciais. Na reação, as concentrações dos reagentes são consumidas ou geradas até atingirem um limite, o qual chamamos de concentração de equilíbrio. Alcançamos este estado quando a velocidade em que os reagentes são consumidos torna-se igual à de consumo dos produtos, como exemplificada na Equação 6.



Quando as concentrações atingem o equilíbrio químico, podemos relacioná-las com a constante  $K_c$ , relação termodinâmica que pode ser calculada através das concentrações de equilíbrio das espécies envolvidas, conforme a Equação 7. Onde a Equação 8 apresenta o significado de  $K_c$ .

$$K_c = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (7)$$

$$K_c = \frac{k_{AD}}{k_{AI}} \quad (8)$$

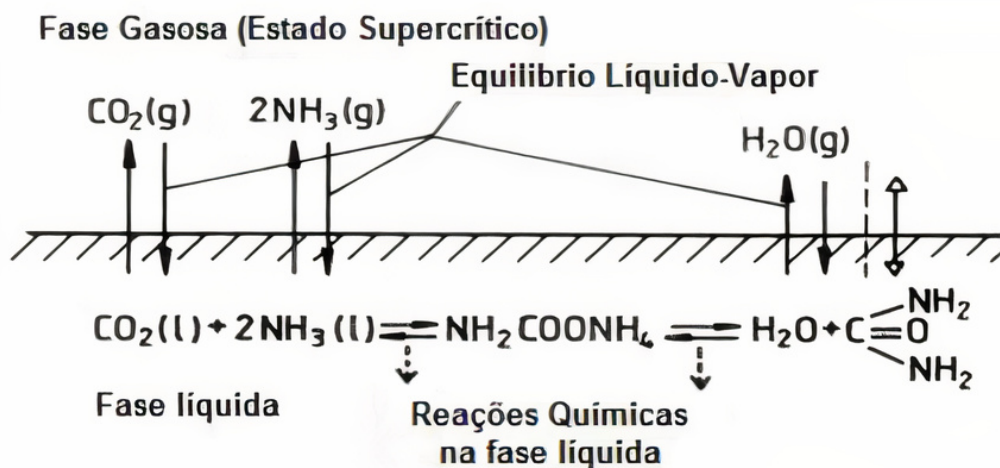
Onde  $C_A$  representa a concentração da espécie A no equilíbrio e  $k_{AD}$  e  $k_{AI}$  são as constantes cinéticas de sentido direto e inverso, respectivamente.

### 2.2.1.2 Equilíbrio Líquido-Vapor

Em sistemas fechados que contêm uma fase gasosa e uma fase líquida, as composições tendem a atingir um estado de equilíbrio onde pressão, temperatura e as fases dos materiais não se modificam. Entretanto, ao analisar microscopicamente os compostos, com o tempo as moléculas presentes em uma fase se difundem para a fase oposta. Tal fenômeno acontece por conta das velocidades de transferência entre os estados líquido e gasoso serem iguais (SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2000). Assim, o sistema estará em Equilíbrio Líquido-Vapor (ELV).

Na Figura 2 são visualizadas as reações durante a produção de ureia e suas respectivas condições de ELV. Segundo Irazoqui, Isla e Genoud (1993), as principais reações de conversão em ureia ocorrem em fase líquida, por conta disso o ELV imposto no sistema é parte importante na conversão dos materiais em ureia.

Figura 2 – Sistema reacional de produção de ureia nas condições de síntese



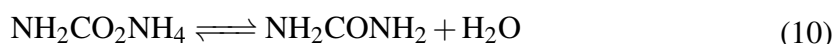
Fonte: Meessen (2010).

Nos processos comerciais de produção de ureia, o dióxido de carbono e amônia possuem suas condições de temperatura e pressão se localizam acima do ponto crítico. Então, ambos os componentes são submetidos a um estado supercrítico, assim, não há distinção entre as fases de estado (IRAZOQUI; ISLA; GENOUD, 1993). Entretanto, a água presente no ELV não é submetida a condições acima de seu ponto crítico.

### 2.2.2 Formação de Biureto

O biureto ( $\text{NH}_2\text{CONHCONH}_2$ ) é formado durante a produção de ureia. É classificado como um composto orgânico, contaminante da ureia por apresentar toxicidade a ruminantes e plantas. Assim, é o principal contaminante a ser fiscalizado pelo controle de qualidade.

Sua formação ocorre durante a dissociação de ureia que é descrita nas Equações 9, 10 e 11. É uma reação reversível, realizada em temperaturas elevadas e altas concentrações do reagente em meio líquido. No reator também é formado biureto, onde é obtido em equilíbrio com a formação de carbamato. Entretanto, a amônia excedente desloca a reação para a esquerda fazendo com que a formação do composto seja pequena ao ponto de ser desconsiderado. Somente nas primeiras etapas de separação, a ureia está disposta em forma mais concentrada e ainda quente. Posteriormente no processo, a formação do biureto torna-se mais intensa e passa a ser considerável.



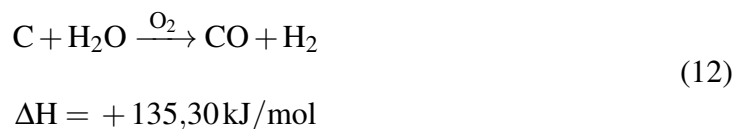
Na produção convencional, sua conversão total resulta em uma fração mássica de até 4,0% de contaminante em ureia granulada. Mesmo em baixa quantidade, a presença de biureto no produto final causa efeito agressivo às plantas, dessa forma, não é permitido a comercialização de ureia com uma concentração acima de 2,5% de biureto em massa. Kaasenbrood, Berg e Revallier (1963), demonstra que concentrações de até 0,5% do contaminante já podem causar efeitos negativos nas plantações e também estipula que a concentração mencionada como limite máximo é de 0,25% de massa.

### 2.3 Gás de Síntese (*Syngas*)

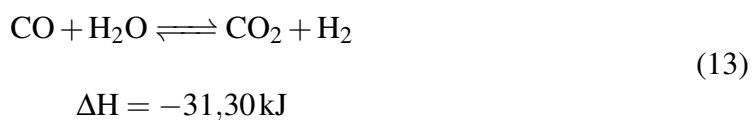
O gás de síntese, popularmente conhecido como *Syngas*, constitui-se de uma mistura gasosa composta por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). Sua razão

molar varia de acordo com a matéria prima e processo utilizado. É obtido principalmente a partir da gaseificação de combustíveis fósseis e biomassa.

A reação de gaseificação, apresentada na Equação 12, decorre da oxidação parcial da matéria prima a ser utilizada na presença de vapor d'água em elevada temperatura.



A mistura de CO e H<sub>2</sub> pode ser ajustada para a proporção adequada pela reação *Water Gas Shift* (WGS) ou pela reação *reverse water gas shift* (RWGS), como apresentado na Equação 13.



## 2.4 Carvão Mineral no Brasil

O carvão mineral tem por principais características ser sólido, de coloração preta e rico em carbono. É formado durante milhões de anos abaixo das camadas geológicas através de restos vegetais solidificados. No Brasil, as jazidas carboníferas se concentram nos estados do Sul do país. Normalmente encontrado em regiões de clima frio ou temperado, onde os vegetais são degradados antes de se decompor, as reservas de carvão no Brasil também são encontradas em São Paulo. Na Figura 3 são apresentadas as reservas de carvão mineral no Rio Grande do Sul.

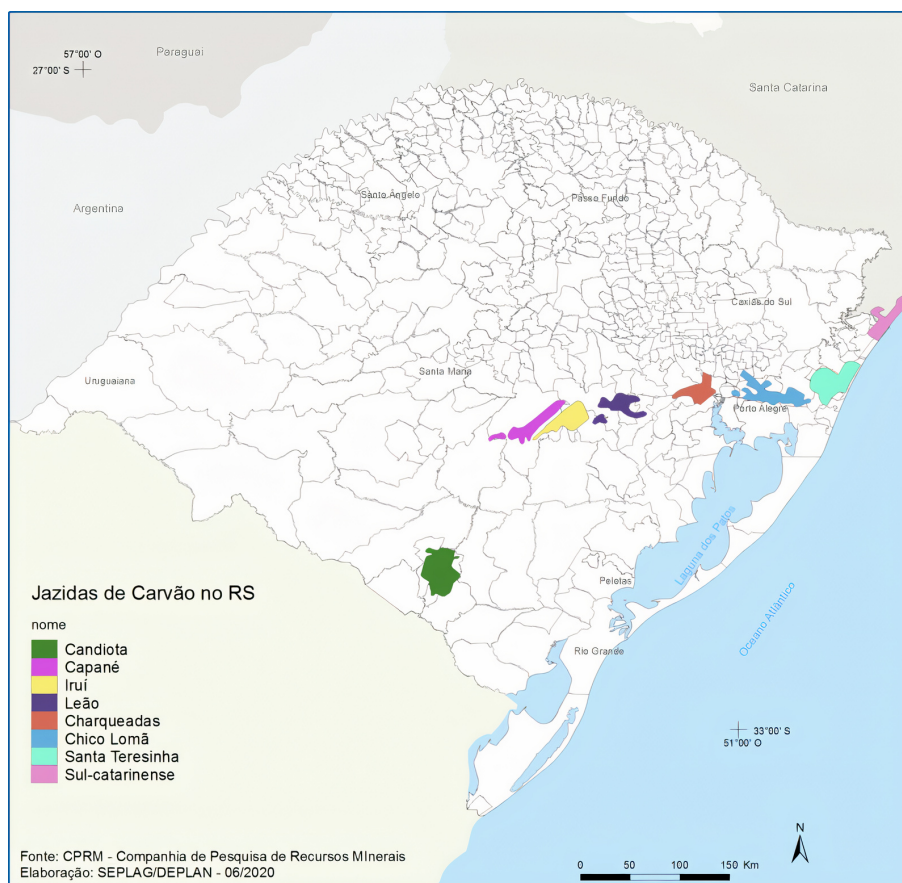
A maior reserva do Rio Grande do Sul se encontra na cidade de Candiota. Correspondendo a cerca de 38% de todo o carvão nacional, tal carvão possui propriedades ideais para utilização em termoeletricidade, segundo Jazida... (2008). As reservas de carvão mineral de Candiota contêm cerca de 1 bilhão de toneladas obtidos por mineração a céu aberto (CANO, 2017).

Devido ao grande teor de carbono, o carvão mineral se torna uma fonte promissora para a produção de químicos, como apresentado na Tabela 1. Outro ponto importante é que o carvão existe em grande quantidade e a custos relativamente baixos. Torna-se então a principal matéria prima substituta alternativa do petróleo e gás natural.

Cano (2017) afirma que o esgotamento das reservas de petróleo e gás natural

acontecerá nos próximos 30 e 50 anos respectivamente. Enquanto se estima que o esgotamento das reservas de carvão mineral ocorrerá em pouco mais de 100 anos, com base na disponibilidade de recursos e quantidades produzidas nos últimos anos.

Figura 3 – Jazidas de carvão mineral no Rio Grande do Sul



Fonte: SPGG (2020).

Tabela 1 – Composição característica do carvão

Característica do carvão	Teores médios do carvão ROM (%)
Umidade total	16,00
Cinzas (b.s.)	52,70
Material volátil (b.s.)	21,20
Carbono fixo (b.s.)	26,10
Enxofre total (b.s.)	1,30
Poder calorífico superior (b.s.)	3.262

Fonte: Jazida... (2008).

## 2.5 Mercado da Ureia no Brasil

Em 1971, o gás natural começou a ser utilizado como matéria-prima na produção de amônia e ureia nas indústrias brasileiras. A primeira fábrica, localizada em Camaçari (BA), deu origem à Nitrofertil (posteriormente chamada Fafen, e atualmente arrendada pela empresa Unigel) que com a construção de outra unidade em Laranjeiras (SE), estabeleceu a indústria de fertilizantes nitrogenados no país, utilizando de insumo básico também o gás natural. Desde então a demanda de fertilizantes teve um valioso impulso, embora ainda muito limitada pela necessidade de importações adicionais e cada vez maiores.

Há vivo interesse e grande esforço das empresas para desenvolver avanços tecnológicos próprios, para aumentar sua competitividade na indústria brasileira de fertilizantes, entre outras considerações. É necessário levar em consideração principalmente o tamanho das empresas já existentes e suas escalas de produção.

Os preços cada vez mais elevados do gás natural boliviano e o alto valor de importação agregado à ureia deveriam estimular investimentos em unidades industriais no país. A demanda no Brasil acaba sendo atendida por importações, de alto custo, que embora contando com linhas internacionais de financiamentos de longos prazos, não é favorável para a economia do país.

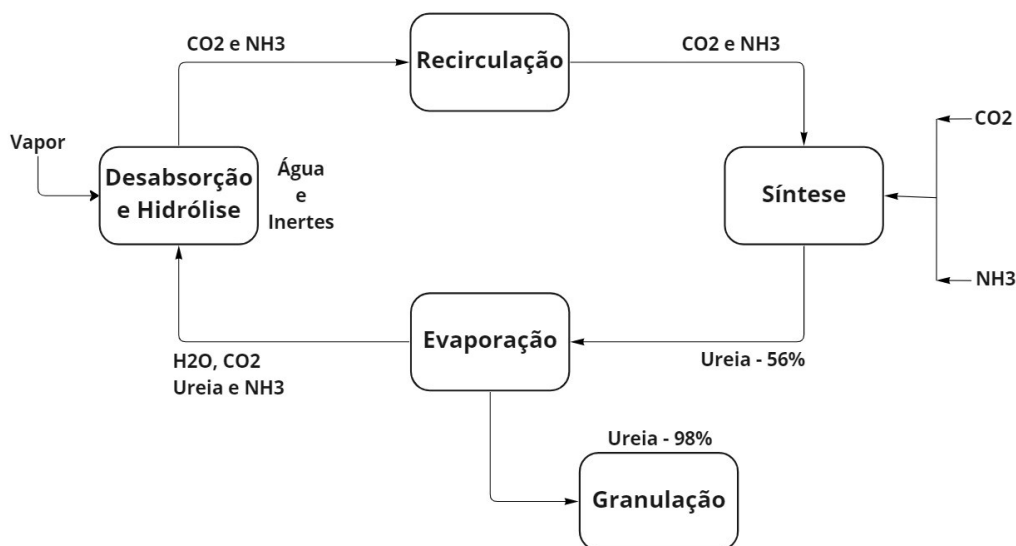
## 2.6 Processo Produtivo da Ureia

No meio industrial, a ureia é produzida utilizando dióxido de carbono e amônia como seus principais materiais. A sua formação é realizada em duas etapas: na primeira etapa, é gerado o carbamato. A segunda etapa tem como objetivo a desidratação do carbamato afim de ser decomposto em ureia e água. As duas reações ocorrem com os materiais em fase líquida, no entanto os reagentes amônia ( $\text{NH}_3$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) são adicionados em fase gasosa. As reações não são totais, porém equilibradas. Deste modo, a amônia é introduzida em excesso para a estequiometria aumentar o rendimento da conversão em ureia.

A produção de ureia se realiza em cinco etapas: (i) desabsorção e hidrólise dos gases inertes de entrada, (ii) síntese de formação da ureia com dióxido de carbono e amônia, (iii) evaporação da água e gases inertes não convertidos são encaminhados para a (iv) recirculação enquanto a ureia convertida é direcionada para a (v) seção de granulação

e finalmente a comercialização. A Figura 4 ilustra a sequência de etapas na produção de ureia de forma simplificada.

Figura 4 – Representação geral das etapas de produção de ureia

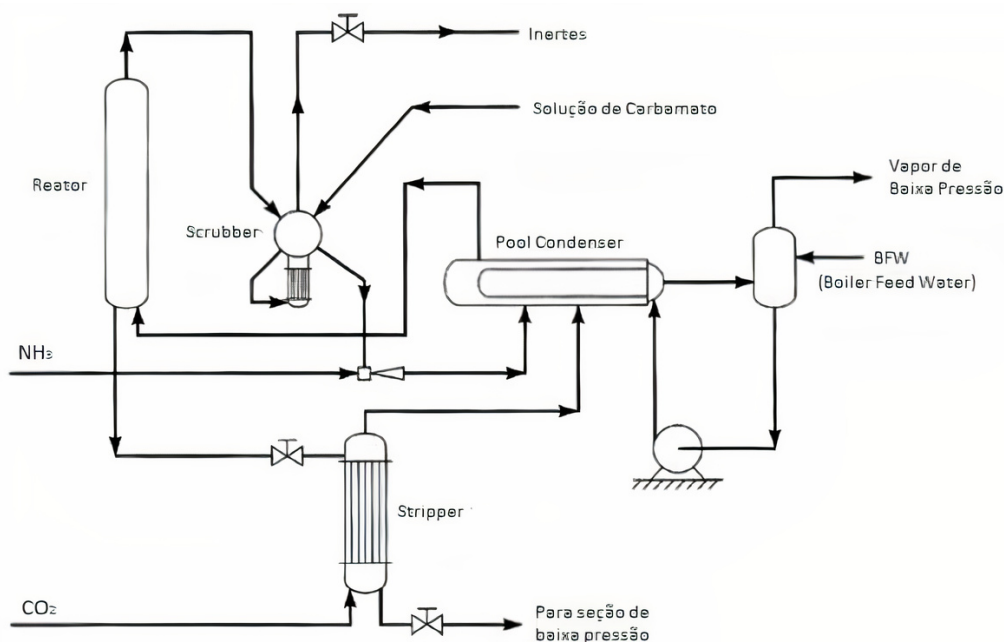


Fonte: Chinda (2015).

As principais reações durante a produção de ureia ocorrem etapa de síntese, nela são formadas ureia e carbamato de amônio. As etapas restantes são dispostas em purificação da ureia e reutilização dos compostos não convertidos. O processo inteiro opera aproximadamente em 140 bar, utilizando uma proporção de razão molar de alimentação de  $\text{NH}_3/\text{CO}_2$  próximo a 3:1. No processo proposto pela Stamicarbon há a introdução de um novo equipamento, o *stripper* de  $\text{CO}_2$ , uma torre vertical utilizada para a dissociação do carbamato residual gerado durante a síntese. Essa etapa é realizada direcionando o carbamato em sentido oposto ao gás carbônico de alimentação e a solução em fase líquida saindo do reator, onde a aplicação do *stripper* minimiza o reciclo na torre de decomposição de baixa pressão (MEESSEN, 2010). Na Figura 5 é apresentada uma visão simplificada da seção de síntese.

As porções gasosas de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  e outros gases não convertidos gerados no reator, são encaminhados para o *scrubber*, um equipamento caracterizado como esgotador e trocador de calor. O  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$  são convertidos para fase líquida na parte inferior do equipamento. Já o restante dos gases são direcionadas para a seção superior em sentido oposto a solução de carbamato vindo da etapa de recirculação. Os gases gerados no *scrubber*, contém baixas quantidades de  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$  e são largados à atmosfera após passagem por um equipamento absorvedor de  $\text{CO}_2$ .

Figura 5 – Fluxo de processos da seção de síntese



Fonte: Chinda (2015).

Com a baixa quantidade de  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$ , o *scrubber* é configurado operando em um estágio de recirculação. Durante a fase de expansão, o carbamato junto a solução de ureia, no inferior do *scrubber*, também é dissociado em  $\text{NH}_3$  e  $\text{CO}_2$ . Então, os outros compostos da solução retornam para o *Pool Condenser* e reaplicados no processo.

O *Pool Condenser*, um tipo de condensador, foi introduzido na seção de síntese de ureia em 1994, com o principal objetivo de reduzir em 34% o volume do reator e em 45% a área do *scrubber* onde é decomposto o carbamato. Assim, é possível reduzir em valor significativo os custos de manutenção de equipamentos e estruturas da planta.

## 2.7 Trabalhos Correlatos

Ao longo dos anos, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de modelar e simular o processo de produção de ureia, além da seleção de equipamentos necessários para a reprodução de um ambiente real. Chinda (2015) apresenta em seu trabalho uma simulação do processo desenvolvido pela Stamicarbon baseado nas fábricas da FAFEN. Os resultados apresentados são baseados nas porcentagens erro entre os valores reais e simulados, portanto não são expostos os dados reais utilizados. Neste trabalho são avaliados as formações de carbamato e biureto, além de um reajuste nas



equações cinéticas de suas formações.

Hamidipour, Mostoufi e Sotudeh-Gharebagh (2005) elabora em seu trabalho uma simulação acerca da produção de ureia baseada em dados reais obtidos de indústrias. São apresentadas as equações utilizadas e os resultados obtidos com a simulação comparado aos dados reais. Uma das análises realizadas propõe que sejam realizados ajustes nos parâmetros termodinâmicos para adequar os resultados obtidos com a simulação aos dados industriais utilizados. Outra análise constata a quantidade de estágios aplicados no *Stripper* para conversão de CO<sub>2</sub> em ureia, chegando a cerca de 60% de conversão com 10 estágios aplicados.

Jeenchay e Siemanond (2018) apresenta em seu trabalho simulações do processo de produção de amônia e ureia baseados na síntese de Haber-Bosch: um método industrial para obtenção de amônia através de uma reação entre hidrogênio e nitrogênio na forma gasosa. Os dados simulados são baseados em indústrias petroquímicas reais situadas na Tailândia, obtendo uma produção diária de 2.000 toneladas de ureia e 3.264 toneladas de amônia.

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho objetiva avaliar de forma técnica e econômica a simulação da seção de síntese produtora de ureia utilizando processo de *Stripping* por CO<sub>2</sub> da Stamicarbon. Para isso, foram planejados os seguintes passos: coleta de dados e revisão bibliográfica, simulação da seção de síntese, e por fim as análises técnicas e econômicas.

Na primeira etapa, realizou-se a coleta de dados através de pesquisa bibliográfica. Esta pesquisa visa a obtenção de um melhor entendimento do processo de produção de ureia, suas propriedades químicas e a contextualização do mercado da ureia no Brasil. Nesta etapa também foi confeccionado o referencial bibliográfico sobre o atual uso de carvões minerais no Sul do Brasil. Neste trabalho, o carvão mineral é considerado já gaseificado para a produção do gás de síntese para produção de ureia, e não se fará o estudo da etapa de gaseificação. Assim, consideraremos o gás de síntese como já ajustado para utilização.

#### 3.1 Simulação da Planta

Na engenharia química a simulação é utilizada para a previsão de condições operacionais de equipamentos em cenários reais. Assim, a etapa de simulação da seção de síntese de ureia, com configuração desenvolvida pela Stamicarbon, tem o intuito de apresentar uma visão do fluxo de produção e modelagem dos equipamentos a serem observados industrialmente. Para sua execução, as seguintes hipóteses são assumidas:

- O processo será simulado em estado estacionário;
- São consideradas duas principais reações: a formação de ureia e a formação de biureto;
- Os gases inertes para alimentação serão O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>;
- A produção de ureia será do tipo granulada;
- Não será considerada a perda de carga nos equipamentos;
- A formação de carbamato não será considerada devido a sua reciclagem neste processo, diferentemente de outros processos onde é descartado.

A simulação consiste na utilização de técnicas matemáticas empregadas em *softwares* específicos que permitem replicar o funcionamento de operações ou processos, ou seja, é um estudo do comportamento de sistemas reais através de modelos

matemáticos.

Existem diferentes perspectivas para a criação de uma simulação, a arquitetura modular sequencial e a orientado a equações. Na arquitetura modular sequencial o simulador executa módulo por módulo da simulação, então as informações fluem no mesmo sentido que os equipamentos são organizados e são gerados vários níveis de convergência. Já a arquitetura orientada a equações resolve a simulação de forma global, ou seja, o problema converge todo ao mesmo tempo e gera seus resultados conforme os parâmetros inicialmente aplicados.

Gratuitos ou não, existem diversos softwares de simulação de processos usados na engenharia química. Dentre eles, o *software* UniSim Design desenvolvido pela Honeywell Forge apresentou melhor desempenho para utilização neste trabalho, proporcionando a capacidade de lidar com processos nos estados sólido, líquido e gasoso.

Nas próximas subseções são descritas as premissas utilizadas na elaboração da simulação. Na Subseção 3.1.1 serão apresentados os equipamentos que compõem a seção de síntese da ureia e suas respectivas características. Em seguida, será apresentado na Subseção 3.1.2 o modelo termodinâmico utilizado para a simulação da seção de síntese. Por fim, na Subseção 3.1.3 será relatada a forma escolhida para a estimativa de biureto gerada durante o processo.

### **3.1.1 Equipamentos utilizados**

Neste projeto, visando obter uma representação da principal etapa da produção de ureia, foi elaborada uma simulação de seção de síntese utilizando o *software* UniSim. Esta etapa teve como objetivo representar a planta de forma mais próxima as configurações propostas pela Stamicarbon. Para isso, foram definidos modelos e configurações de equipamentos disponíveis no *software* para retratar os equipamentos de modo mais próximo da realidade.

O *Pool Condenser* modelado na simulação foi configurado como um bloco RSTOIC, um reator do tipo CSTR. Segundo Chinda (2015), este reator possui configurações relativas ao tempo de residência da solução reagente muito próximas as configurações do equipamento real. Cerca de 60% da ureia produzida no processo é gerada no *Pool Condenser*.

O reator foi simulado como um bloco RPLUG, um equipamento do tipo CSTR com cerca de 2,30 metros de diâmetro e 25,90 metros de comprimento. Neste reator

ocorre uma reação exotérmica gerando carbamato e uma reação endotérmica formando ureia. Então, a saída do reator é ligada a um tanque do tipo *flash* para a separação dos componentes em frações líquida e gasosa. Cada fração de saída possui um destino diferente. A fração líquida da saída, encaminhada para o *Stripper*, é uma solução composta por ureia, carbamato e água, com quantidades não significativas de biureto. Por fim, a fração gasosa é formada por  $\text{NH}_3$ , gás de síntese e inertes que são, então, direcionados ao *Scrubber*.

Modelado como um bloco de tipo RADFRAC configurado com 5 estágios, o *Scrubber* é configurado de modo a considerar o equilíbrio do carbamato líquido em cada estágio. Então, o calor é retirado somente do estágio inferior do equipamento. O *Scrubber* é alimentado por duas correntes de entrada: uma linha gasosa originada no reator e uma corrente líquida saindo do reciclo da seção de síntese contendo carbamato. Então, o *Scrubber* produz duas correntes de saída: a primeira linha é composta por gases inertes que são largados na atmosfera após passarem por um absorvedor. Já a segunda linha é uma corrente líquida composta por carbamato e deverá retornar para o processo como uma das entradas do *Pool Condenser*.

O *Stripper* de  $\text{CO}_2$  foi modelado como um bloco de modelo RADFRAC configurado com destilação multiestágio com 10 estágios. Correntes de calor são aplicadas entre os estágios 2 e 9 com o intuito de representar as transferências de calor entre os estágios. Com a entrada em sentido contrário do gás de síntese, o carbamato resultante do processo no reator é dissociado em  $\text{NH}_3$  e gás de síntese. O *Stripper* produz duas correntes de saída: uma corrente líquida, saindo da parte inferior do equipamento, composta por ureia e água, é conduzida para a etapa de granulação e então pronta para comercialização. A segunda corrente, contendo uma fração gasosa de material não convertido, sai da parte superior do equipamento para ser conduzida ao *Pool Condenser*. A fração gasosa pode conter:  $\text{NH}_3$ , vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  e gás de síntese.

### 3.1.2 Modelagem Termodinâmica

O modelo que melhor representou a configuração de modelagem termodinâmica do processo foi o SR-POLAR, descrita também no trabalho de Rasheed (2011). A principal equação do modelo SR-POLAR é descrita na Equação 14, desenvolvida por Schwartzentruber-Renon. Esta equação é recomendada para descrição do comportamento

de sistemas químicos não ideais operando à alta temperatura e pressão.

$$P = \left( \frac{RT}{V_m + c - b} \right) - \left( \frac{a}{(V_m + c)(V_m + c - b)} \right) \quad (14)$$

Onde:

P = Pressão de operação do sistema;

R = Constante ideal dos gases;

T = Temperatura de operação do sistema;

$V_m$  = Volume molar;

a = Termo de equação para atração;

b = Termo de equação para co-volume;

c = Fator de correção de deslocamento de volume.

Os dados e parâmetros das matérias-primas utilizadas para a realização da simulação podem ser encontrados no banco de dados da mesma.

### 3.1.3 Método de Estimativa de Biureto

Quando considerada no processo, são encontradas dificuldades para definição dos parâmetros de formação do biureto. O biureto é desconsiderado em grande parte dos casos produtivos, devido sua baixa conversão no processo. Também pode ser desconsiderado quando realizado controle de temperatura e pressão no processo, dessa forma a conversão se mantém baixa.

Chinda (2015) apresenta em seu trabalho uma linha do tempo de trabalhos relacionados à modelos cinéticos que buscam descrever a reação de formação do biureto. Após análise e estudo dos modelos, optou-se estimar a produção pelo modelo desenvolvido por Shen (1959). Seu estudo apresenta dados acerca da quantidade de biureto formada conforme de a temperatura durante as etapas do processo. Assim, a partir das temperaturas utilizadas no processo é possível estimar quanto de biureto é gerado ao longo das operações da planta. A Tabela 2 apresenta esta relação.

Tabela 2 – Geração de biureto conforme variação da temperatura

<b>T (K)</b>	<b>k (l/mol.h)</b>
323,15	$3,98.10^{-6}$
353,15	$2,38.10^{-5}$
373,15	$6,55.10^{-5}$
413,15	$1,68.10^{-3}$
423,15	$3,34.10^{-3}$
433,15	$5,66.10^{-3}$
443,15	$8,28.10^{-3}$

Fonte: Shen (1959).

### 3.2 Avaliação Técnica

Devido ao sigilo industrial empregado nos principais trabalhos selecionados como referência para este projeto, a validação técnica proposta compara a capacidade de produção do projeto proposto com dados de fábricas consolidadas mundialmente.

O processo também será validado considerando a eficiência teórica da planta e também sua eficiência operando em condições ideais a nível industrial, considerando que o processo desenvolvido pela Stamicarbon propõe uma margem de conversão média de 80% ureia. Para isso, serão descritas as condições de operação da seção de síntese, bem como quantidade de matéria-prima necessária para suprir a produção.

Afim de produzir a ureia de forma sólida, para comercialização, após a etapa de seção de síntese será adicionada uma seção de granulação. Além disso, embora não desenvolvida neste projeto, será estimada a quantidade de carvão mineral necessária para a geração do gás de síntese de alimentação da planta de ureia.

### 3.3 Avaliação Econômica

A validação econômica do projeto utiliza cálculos financeiros para projeção de resultados e indicadores de viabilidade econômica. A elaboração deste estudo procurou estimar fatores como: valor de investimento, despesas fixas, capacidade produtiva do projeto e custo unitário do produto. Os valores mensurados como investimentos e despesas fixas foram obtidos diretamente da simulação construída no UniSim. O custo unitário da tonelada de ureia é calculado baseado nos custos referentes a sua produção.

Após o mapeamento de gastos e capacidade produção, são calculados os índices de validação de viabilidade econômica, por exemplo:

- Taxa Mínima de Atratividade (TMA);
- Valor Presente Líquido (VPL);
- Índice de Lucratividade (IL);
- Taxa Interna de Retorno (TIR);
- *PayBack*.

Por fim, será apresentado o fluxo de caixa referente aos iniciais de instalação e produção de ureia no projeto. Seu objetivo é projetar ou antecipar os cenários positivos e negativos de um plano. Assim, é possível estimar o ponto de equilíbrio operacional da planta e então obter uma estimativa do prazo para obtenção de lucros com a produção de ureia.

## 4 RESULTADOS OBTIDOS

Extraídos a partir da simulação desenvolvida, os resultados obtidos foram baseados uma indústria operando em estado estacionário, à alta pressão, com uma capacidade de 2.685.099,61 toneladas de ureia granulada por ano.

Após processamento dos materiais na etapa de síntese da produção, da qual é obtida ureia líquida, o produto desta seção é direcionado a uma etapa de granulação e secagem. Assim, a água contida na ureia líquida é evaporada e o produto final é obtido: uma ureia granulada pronta para comercialização.

As próximas seções deste capítulo apresentam os resultados desenvolvidos a partir deste trabalho afim de atingir os objetivos propostos: avaliar tecnicamente e economicamente a produção de ureia utilizando como matéria-prima o gás de síntese extraído de carvão mineral utilizando o processo de *Stripping* de CO<sub>2</sub> da Stamicarbon. As próximas seções são divididas entre a Seção 4.1 que aborda os dados técnicos e desenvolvimento do projeto e, por fim, a Seção 4.2 apresenta os resultados econômicos obtidos.

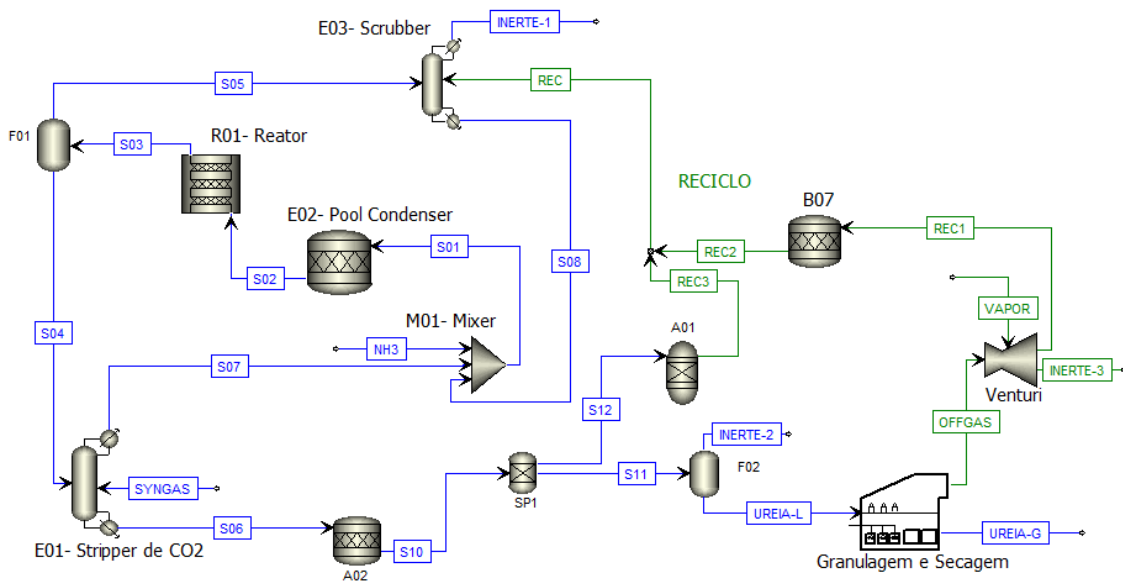
### 4.1 Validação Técnica

Para a elaboração da simulação, primeiramente foram determinadas as variáveis de operação da planta. O diagrama de processos e instrumentação da seção de síntese e granulação de ureia desenvolvidas neste projeto é apresentado na Figura 6. O diagrama é seccionado em duas áreas: as seções de produção e de reciclo. Destacada pelas correntes na cor azul, a seção de produção compões os equipamentos: *Pool Condenser* (representado no diagrama com identificador E02), reator (R01), *Stripper* de CO<sub>2</sub> (E01) e *Scrubber* (E03). Os demais equipamentos utilizados na seção de produção são responsáveis pela separação entre fases líquidas e gasosas das saídas e entradas de equipamentos. A seção de reciclo é destacada pelas correntes verdes, composta por equipamentos com função específica de tratamento dos materiais que serão reciclados e aplicados novamente ao processo.

O *Pool Condenser* (E02) opera a uma temperatura constante de 167°C e taxa de aquecimento de -17,92 mmkcal/h. Desta forma o equipamento é configurado como um condensador. A linha S02, saindo do *Pool Condenser* (E02), é direcionada ao reator (R01). O reator (R01), por sua vez, opera em temperatura constante de 183°C.



Figura 6 – Representação em blocos da seção de síntese e granulação de ureia



Fonte: autora.

Com isso, o reator (R01) propõe uma conversão de 42.885,53 kg/h de ureia. Saindo do reator (R01), a corrente líquida S04 é conduzido ao *Stripper* de CO<sub>2</sub> (E01): ao entrar possui temperatura de 185°C e ao sair possui temperatura de 165°C. No *Stripper* de CO<sub>2</sub> (E01) são produzidos 42.770,23 kg/h de ureia. A corrente líquida S06 saindo do *Stripper* (E01) contém ureia, água e gases inertes.

A ureia em fase líquida é transportada pela corrente UREIA-L é direcionada para a etapa de granulação, onde obtemos a ureia granulada contida na corrente UREIA-G pronta para comercialização. Na etapa de granulação, além do produto final, há também a corrente OFFGAS responsável pelo tratamento dos gases gerados para posterior retorno ao processo produtivo.

A corrente S12 contendo carbamato e compostos não reagidos é encaminhada ao *Scrubber* (E03), onde são reciclados e retornados ao processo. A corrente gasosa S05, vinda do reator (R01), também é encaminhada para o *Scrubber* (E03) com a mesma finalidade. O *Scrubber* (E03) opera com temperatura de entrada de 86°C e de 162°C na saída. Ao todo são reciclados 35.352,27 kg/h de materiais. Em suma, as condições de operação da seção de síntese citadas podem ser visualizadas na Tabela 3.

Kumar e Das (2007) afirmam que a temperatura do processo interfere diretamente no rendimento de equilíbrio a uma dada pressão. Assim, a temperatura e pressão de operação da planta foram planejadas para proporcionar uma conversão satisfatória de ureia. A partir dos dados definidos como parâmetros de operação, foram extraídos do

Tabela 3 – Parâmetros de operação da seção de síntese

<b>Equipamento</b>	<b>Variável</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
R01 – Reator	Temperatura no topo	183	°C
	Ureia no fluxo de saída	42.885,53	kg/h
E01 – Stripper CO2	Temperatura de entrada	185	°C
	Temperatura de saída	165,5	°C
	Fluxo de entrada (S08)	83.331,42	kg/h
	Fluxo de saída (S09)	77.951,81	kg/h
	Produção de Ureia	42.770,23	kg/h
E02 - Pool Condenser	Temperatura de Saída	167	°C
	Temperatura de entrada	86	°C
E03 - Scrubber	Temperatura de saída	162	°C
	Fluxo de entrada (S05)	14.494,07	kg/h
	Fluxo de entrada (S13)	22.466,28	kg/h
	Fluxo de saída (S15)	1.608,14	kg/h
	Fluxo de saída/reciclo (S17)	35.352,27	kg/h

Fonte: autora.

simulador os fluxos de massa apresentados na Tabela 4. Estes valores são considerados suficientes para a planta atingir sua capacidade plena de produção, de 2.685.099,61 toneladas de ureia por ano.

Tabela 4 – Compostos de alimentação da planta

<b>Material</b>	<b>Fluxo de Massa (kg/h)</b>
Gás de síntese	172.944,30
NH <sub>3</sub>	240.874,95
H <sub>2</sub> O	197.558,53
N <sub>2</sub>	87.529,38
O <sub>2</sub>	25.307,90

Fonte: autora.

De acordo com a lei da ação da massa, a concentração dos reagentes é responsável direta pela conversão da reação. No processo, o gás de síntese é o reagente limitante. Assim, quanto maior a relação e interação entre a amônia e o gás de síntese, maior é a taxa de conversão. O volume de água alimentando a planta deve ser o mínimo possível, desta forma, é facilitada a desidratação de carbamato, resultando em ureia.

A quantidade de biureto produzida pela planta durante as conversões no processo de síntese é calculada baseada no estudo de Shen (1959). Anualmente é esperado a geração de cerca de 61,06 l/mol.h de biureto. Esta quantidade é reduzida por conta do controle da pressão e temperatura adotados ao longo do processo na configuração dos equipamentos.

Afim de validar a conversão de ureia proposta pela Stamicarbon, foi calculada a eficiência teórica da planta, sua eficiência operando em condições de nível industrial e a conversão de ureia entre equipamentos. Os cálculos foram desenvolvidos tendo como referência os dados obtidos na simulação de volume de materiais de entrada e saída e nas relações estequiométricas envolvidas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5. Com os cálculos estequiométricos da reação de produção de ureia foi obtida a capacidade produtiva teórica da planta, onde, para uma eficiência total, a planta produziria 2.716.098,76 toneladas de ureia ao ano. Ao comparar a capacidade produtiva teórica com a simulada neste projeto, foi obtida uma eficiência de 83,26% para o processo utilizado. Assim, validando a eficiência de conversão em ureia proposta pelo processo desenvolvido pela Stamicarbon.

Tabela 5 – Eficiência da conversão em ureia da planta

	<b>Ureia Líquida (ton)</b>	<b>Eficiência</b>
Teórico	2.716.098,76	100%
Simulado	2.261.305,08	83,26%
Stamicarbon	-	80%

Fonte: autora.

Após obtida a eficiência da planta simulada, foi calculada a taxa de conversão de ureia para cada equipamento. Assim, é possível visualizar na Tabela 6 o quanto cada equipamento é responsável pela conversão total de ureia na planta. Levou-se em consideração somente os equipamentos que continham ureia em suas correntes, os quais foram: *Pool Condenser* (E02), reator (R01) e *Stripper* de CO<sub>2</sub> (E01).

Tabela 6 – Taxa de conversão em ureia por equipamento

<b>Linha</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Conversão em ureia</b>
S02	Pool Condenser	0,24%
S04	Reator	33,29%
S06	Stripper	33,27%
S09	Stripper	33,20%

Fonte: autora.

Por fim, a Tabela 7 apresenta os valores, em kg/h, de conversão em ureia líquida pós seção de síntese, e granulada após processo de granulação. A quantidade de ureia líquida é inferior à granulada devido a adição de N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> durante o processo de granulação. Esta ação ocorre a fim de impedir perdas significativas dos compostos durante o processo de granulação. Assim, com uma produção de 306.518,22 kg/h de

ureia granulada, a planta operando em 3 turnos de 8 horas e durante os 365 dias do ano totaliza a capacidade esperada de 2.685.099,61 ton/ano.

Tabela 7 – Produção de ureia

<b>Ureia</b>	<b>Produção (kg/h)</b>
Líquida	258.139,85
Sólida - Granulada	306.518,22

Fonte: autora.

A partir da produção estimada pode-se realizar uma comparação com outras principais fábricas apresentadas na Tabela 8. É possível observar que a capacidade produtiva do projeto de 2.685.099,61 ton/ano é 290% maior que a produção brasileira atual. Nota-se também que, comparada às demais fabricas, a produção se coloca de maneira competitiva mundialmente. Se combinadas a atual produção brasileira com a produção do projeto aqui proposto, o Brasil passaria a ocupar a 8º posição no ranking.

Tabela 8 – Produção global de ureia

<b>Ranking</b>	<b>País</b>	<b>Capacidade produtiva (milhões ton/ano)</b>
1º	Índia	24.282.045,33
2º	Rússia	8.172.801,00
3º	Indonésia	7.330.091,00
4º	Paquistão	5.882.816,90
5º	EUA	5.703.251,53
6º	Irã	5.580.540,00
7º	Canadá	4.056.762,00
8º	Vietnã	2.484.380,00
9º	Emirados Árabes Unidos	2.289.818,00
10º	Polônia	1.660.914,00
11º	Omã	1.652.539,00
12º	Nigéria	1.622.958,00
13º	Argélia	1.259.000,00
14º	Bielorrússia	1.068.234,00
15º	Argentina	949.614,54
16º	Brasil	925.134,00
-º	Projeto proposto	2.685.099,61

Fonte: FAO (2019).

Embora não seja o foco deste trabalho, estima-se a quantidade média de carvão mineral necessária para a produção do gás de síntese utilizado para a produção de ureia seja de 60kg de carvão mineral para a produção de 1 tonelada de ureia. Esta estimativa foi calculada baseada no estudo de Rincon et al. (2017).

## 4.2 Análise Econômica

A análise econômica apresentada a seguir baseia-se na planta resultante deste trabalho, com capacidade produtiva de 2.685.099,61 toneladas de ureia granulada ao ano. Para a implantação deste empreendimento, é necessário um investimento inicial para aquisição de equipamentos, terreno e construção da infraestrutura. O investimento inicial é estimado em pouco mais de 810 milhões de reais, conforme os custos de implantação apresentados na Tabela 9. O custo de capital é estimado considerando a execução de obras, compra e instalação de equipamentos. Também abrange títulos representativos da empresa. A estimativa de custo operacional se refere ao investimento em mão de obra responsável pela operação da planta. Já os custos em serviços públicos se referem às taxas tributárias federais, estaduais e municipais. Os custos são estimados e fornecidos pela simulação realizada no *software* Aspen Plus. Entre os custos fornecidos pelo *software*, apenas o custo em matérias-primas não é fornecido pelo simulador e foi obtido em uma pesquisa de mercado simples afim de obter um valor de base.

Tabela 9 – Custos de implantação

<b>Descrição do Custo</b>	<b>Valor</b>
Custo de capital (R\$/Ano)	107.966.784,00
Custo operacional total (R\$/Ano)	27.983.518,10
Custo total de matérias-primas (R\$/Ano)	564.737.577,60
Custo total de serviços públicos (R\$/Ano)	6.651.698,90
Custo em equipamento (R\$)	39.425.312,00
Custo total de instalação (R\$)	64.101.575,00
<b>Total (R\$)</b>	<b>810.866.465,60</b>

Fonte: autora.

A precificação da ureia é então estimada com base no preço total de custos fixos. Os custos utilizados para realizar a precificação são apresentados na Tabela 10 considerando a produção anual de 2.685.099,61 toneladas. Analisando a tabela de custos, é estimado um faturamento inicial de R\$ 696.247.982,70 considerando o preço por tonelada de R\$ 259,30.

A partir dos resultados obtidos, o fluxo de caixa na Tabela 11 apresenta uma estimativa do total de entradas (valor a receber) e saídas (valor a pagar) e saldo do empreendimento ao longo dos anos. Considerou-se para a elaboração do fluxo de caixa um aumento no preço da tonelada de ureia em 1% ao ano, mantendo-se constante após atingir o saldo positivo da planta. Os custos de saída, que consistem nas despesas

Tabela 10 – Valores utilizados para a precificação

<b>Custos Fixos de Produção</b>	<b>Valor</b>
Custo Operacional Total (R\$/Ano)	27.983.518,10
Custo Total de Matérias-Primas (R\$/Ano)	564.737.577,60
Custo em Equipamento/Manutenção (R\$)	39.425.312,00
Custo Total de Instalação (R\$)	64.101.575,00
Total de custos (R\$)	696.247.982,70
Preço unitário da tonelada (R\$)	259,30
Faturamento anual (R\$)	696.247.982,70

Fonte: autora.

Tabela 11 – Fluxo de caixa previsto para 10 anos

<b>Ano</b>	<b>Entrada (R\$/Ano)</b>	<b>Saída (R\$/Ano)</b>	<b>Saldo (R\$/Ano)</b>	<b>Preço ureia (R\$/ton)</b>
0	0,00	810.866.465,60	-810.866.465,60	0,00
1	696.247.982,70	810.866.465,60	-11.091.595,90	259,30
2	703.210.462,53	707.339.578,60	-15.220.711,97	261,89
3	710.172.942,36	707.339.578,60	-12.387.348,22	264,49
4	717.135.422,19	707.339.578,60	-2.591.504,63	267,08
5	724.097.902,02	707.339.578,60	14.166.818,79	267,08
6	724.097.902,02	707.339.578,60	30.925.142,21	267,08
7	724.097.902,02	707.339.578,60	47.683.465,62	267,08
8	724.097.902,02	707.339.578,60	64.441.789,039	267,08
9	724.097.902,02	707.339.578,60	81.200.112,46	267,08
10	724.097.902,02	707.339.578,60	97.958.435,87	267,08

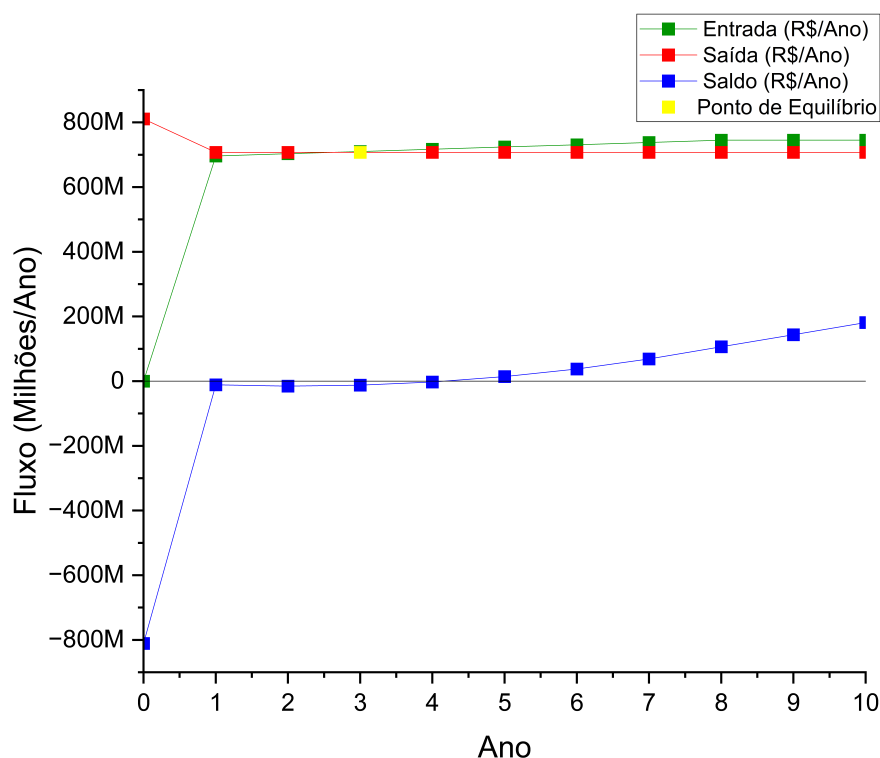
Fonte: autora.

da empresa, são considerados constantes já que não é esperada a compra de novos equipamentos a cada ano. Entretanto, é considerada a manutenção dos equipamentos e despesas ocasionais. Assim, é esperado que a partir do sétimo ano de produção a planta esteja gerando lucros, sendo sua receita maior que suas despesas.

Levando em consideração os dados anteriormente apresentados, a projeção gráfica para os 10 primeiros anos da empresa e o ponto de equilíbrio da planta é apresentado na Figura 7. O ponto de equilíbrio é atingido ao final do quarto ano de produção.

A partir das projeções do fluxo de caixa podem ser calculados os indicadores de viabilidade. A Tabela 12 apresenta os indicadores obtidos através do fluxo de caixa projetado do investimento para os próximos 10 anos. Considerando a taxa mínima de atratividade (TMA), o projeto é considerado viável. A TMA adotada de 15% a.a. é próxima aos taxa SELIC de 13,75% (em dezembro de 2022) e representa a remuneração mínima que o investidor deverá ganhar. O valor presente líquido é positivo no valor de

Figura 7 – Fluxo de caixa



Fonte: autora.

R\$ 3.039.043,50, este valor significa o montante do fluxo de caixa líquido ao final de 10 anos.

Tabela 12 – Índices de viabilidade econômica

Índice	Resultado
TMA - Taxa Mínima de Atratividade	15,00%
VPL - valor presente líquido	R\$ 3.039.043,50
IL - Índice de Lucratividade	8,84
TIR - Taxa Interna de Retorno	86,60%
<i>PayBack</i>	4 anos

Fonte: autora.

O índice de lucratividade é de R\$ 8,84, isto representa que o projeto é viável, pois para cada R\$ 1,00 investido, o retorno se mostra-se inicialmente de 884%, aproximadamente 9 vezes maior. A taxa interna de retorno é de 86,60%, portanto o projeto é rentável em relação à TMA de 15% a.a. Deste modo, percebe-se que o projeto apresenta uma remuneração sobre o capital investido de mais de 86% ao ano, ou seja, é maior do que muitas opções de investimento oferecidas no mercado financeiro. Com o *payback* apresentado, de 4 anos, o projeto tem o seu retorno muito rápido levando em

consideração sua complexidade e magnitude.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, o presente trabalho propôs um estudo de estimativa no intuito de prever a viabilidade econômica do processo de produção de ureia utilizando como matéria prima os carvões minerais da região Sul do Brasil.

Das etapas propostas, foi realizada a coleta de dados e revisão bibliográfica para melhor entendimento e contextualização de trabalhos da literatura. Dentre outros processos, o processo de *Stripping* de CO<sub>2</sub> da Stamicarbon se destacou pelo rendimento do processo, custo de equipamentos, vida útil da planta e impacto ambiental. Assim, este processo foi definido como rota de síntese para produção de ureia.

A simulação foi elaborada com o *software* Aspen Plus. A escolha do simulador foi realizada buscando atender todos os critérios necessários para estimar as variáveis deste processo. O *software* também foi utilizado com o intuito de extrair dados de produção, previsão de custos de investimento, avaliação da taxa de retorno: dados que proporcionam a avaliação de rentabilidade técnica e econômica. Foram simulados neste trabalho a seção de síntese de ureia composta pelos equipamentos: *Pool Condenser*, *Stripper* de CO<sub>2</sub> da Stamicarbon, *Pool Reactor* e *Scrubber*. Também realizou-se a simulação da etapa de granulação da ureia, assim, pode-se considerá-la pronta para comercialização. Estes equipamentos são suficientes para representação da configuração geral da planta.

Durante a elaboração do presente trabalho foram encontradas dificuldades na obtenção das propriedades termodinâmicas para definição dos parâmetros do componente puro. Também foram encontradas dificuldades para representação dos equipamentos da seção de síntese por conta das especificidades de cada um. Todavia, o referencial teórico levantado foi utilizado para que a simulação representasse da melhor forma o esquema real proposto pela Stamicarbon.

Dos resultados obtidos observamos que a planta aqui simulada conta com capacidade produtiva de 2.685.099,61 toneladas de ureia granulada ao ano. A simulação elaborada para produção de ureia utilizando o método proposto pela Stamicarbon obteve 83,26% de eficiência em conversão de ureia, validando assim, a conversão de 80% em ureia proposta pela empresa. Também obteve-se resultado satisfatório em relação à quantidade de biureto formado no processo. Estimou-se que anualmente serão gerados cerca de 61,06 l/mol.h de biureto, quantidade reduzida devido ao controle da pressão e temperatura do processo.

Os resultados econômicos apontam que o projeto de investimento é viável.

Considerando um preço de venda de R\$259,20 por tonelada de ureia e um faturamento anual inicial de R\$ 696.247.982,70. Baseando-se no faturamento inicial e considerando uma taxa mínima de atratividade de 15%, os índices aplicados para análise da viabilidade mostram que o projeto apresenta um valor presente líquido de R\$ 3.039.043,50, índice de lucratividade de R\$ 8,84, taxa interna de retorno de 86,60% e *PayBack* em 4 anos de produção.

## REFERÊNCIAS

- CANO, T. M. **Carvão Mineral**. 2017. Acesso em 17 de fevereiro de 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-2-carvao/@\\_@download/file/2-2-carvao.pdf](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/2-2-carvao/@_@download/file/2-2-carvao.pdf).
- CHINDA, R. C. **Simulação da Seção de Síntese de uma Unidade de Produção de Ureia - Processo Stamicarbon**. 128 f. Monografia (Dissertação (mestrado)) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2015.
- EPE. **Competitividade do Gás Natural: Estudo de Caso na Indústria de Fertilizantes Nitrogenados**. Governo Federal, Ministério de Minas e Energia, 2019. Acesso em 12 de fevereiro de 2022. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-01-19\%20-\%20GN\\_Fertilizantes.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-01-19\%20-\%20GN_Fertilizantes.pdf).
- FAO. **FAOLEX Database: Complete Collection**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019. Acesso em 29 de novembro de 2022. Disponível em: [www.fao.org/faolex/opendata](http://www.fao.org/faolex/opendata).
- FRINK, C. R.; WAGGONER, P. E.; AUSUBEL, J. H. Nitrogen fertilizer: retrospect and prospect. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 96, n. 4, p. 1175–1180, 1999.
- HAMIDIPOUR, M.; MOSTOUFI, N.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R. **Modeling the synthesis section of an industrial urea plant**. [s.n.], 2005. v. 106. 249-260 p. ISSN 1385-8947. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894704004036>.
- IRAZOQUI, H. A.; ISLA, M. A.; GENOUD, C. M. Simulation of a urea synthesis reactor. 2. reactor model. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 32, n. 11, p. 2671–2680, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie00023a034>.
- JAZIDA de Candiota. Companhia Riograndense de Mineração, 2008. Disponível em: [http://www2.crm.rs.gov.br/hypervisual/carvao/carvao\\_candiota.php?secao=carvao](http://www2.crm.rs.gov.br/hypervisual/carvao/carvao_candiota.php?secao=carvao).
- JEENCHAY, J.; SIEMANOND, K. Ammonia/urea production process simulation/optimization with techno-economic analysis. **28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering**, Elsevier, v. 43, p. 385–390, 2018. ISSN 1570-7946. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044464235650070X>.
- KAASENBROOD, P.; BERG, P. V. D.; REVALLIER, L. Fertilizer contaminants, biuret formation in the manufacture of urea. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 11, n. 1, p. 39–43, 1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf60125a012>.
- KUMAR, B.; DAS, P. C. **Manufacture of urea**. Tese (Doutorado) — National Institute of Technology, Rourkela, India, 2007.

MALISZEWSKI, E. **Dólar alto encarece insumos**. 2021. Acesso em 1 de março de 2022. Disponível em: [https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/noticia/dolar-alto-encarece-insumos\\_448179.html](https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/noticia/dolar-alto-encarece-insumos_448179.html).

MEESEN, J. H. Urea. In: \_\_\_\_\_. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. ISBN 9783527306732. Disponível em: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a27\\_333.pub2](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a27_333.pub2).

MEESEN, J. H.; PETERSEN, H. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1996. ISBN 9783527306732.

RASHEED, S. A. Revamping urea synthesis reactor using aspen plus. **China: UreaKnowHow**, p. 1–15, 2011.

RINCON, S. et al. Simulação do enriquecimento em h<sub>2</sub> de syngas obtido da cogaseificação de carvão mineral e biomassa. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 2, 2017.

SAATH, K. C. d. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, SciELO Brasil, v. 56, p. 195–212, 2018.

SHEN, R. C. Rate of biuret formation from urea. **Agricultural and Food Chemistry**, Volume 7 (11), pp. 762-763, 1959.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da Engenharia Química**. 5<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2000.

SPGG. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 5. ed. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Rio Grande do Sul, 2020. ISBN 978-65-87878-00-3. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/ocorrencias-minerais>.

YANO, G. T.; TAKAHASHI, H. W.; WATANABE, T. S. Avaliação de fontes de nitrogênio e épocas de aplicação em cobertura para o cultivo do trigo. **Semina: Ciências Agrárias**, Universidade Estadual de Londrina, v. 26, n. 2, p. 141–148, 2005.