



Asafe Bittencourt Cavalcanti

**Análise da viabilidade técnica do transporte de amônia em
oleodutos**

Projeto de Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da
PUC-Rio

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle, DEM
Coorientadora: Ana Rosa Fonseca de Aguiar Martins, DEQM

Rio de Janeiro
Julho, 2021

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, que sustenta os meus passos todos os dias. Agradeço também a meus pais Walério e Raquel por serem exemplo de vida pra mim. Agradeço a meu irmão, Ciro, pela amizade. Agradeço a minha namorada, Emily, pelo seu amor e amizade .

Gostaria de fazer também um agradecimento especial à professora Ivani Bott, do Departamento de Engenharia Química e de Materiais, por ter sido tão generosa comigo e ter me apoiado nesses anos de faculdade, sem a ajuda dela nada disso seria possível. Foi uma chefe muito especial pra mim.

Agradeço também ao meu orientador, professor Florian Pradelle do DEM e à minha coorientadora, professora Ana Rosa.

Gostaria de agradecer também ao Luis Fernando Pires, do SIMDUT, por ter ajudado para que este trabalho fosse realizado.

ABSTRACT

Analysis of Technical feasibility of Ammonia Transport in Pipelines

This work aims to evaluate, based on technical and operational requirements, the transport of liquefied ammonia using the pipelines installed in the Country. This possible solution would be in line with some questions that occur today in Brazil, and that could be minimized, such as: The waste of part of the natural gas produced, due to lack of demand, the idleness of pipelines Brazilians and the external dependence on fertilizers. In this context studied here, part of the natural gas currently wasted could supply the ammonia manufacturing industry, which is the main input for the production of fertilizers. Throughout the work, an overview of the natural gas sector in Brazil and the world will be presented, as fertilizers, as well the potential for using idle pipelines to transport ammonia. The investigation of the possibility of transporting ammonia will be carried out through a study on the compatibility of API 5L steel pipelines, which constitute the oil pipelines in Brazil, for the transport of liquefied ammonia. The study also presents a simulation through an integral analysis of the ammonia flow in a stretch of a known pipeline, for the purpose of process adequacy.

Keywords : Ammonia, Pipeline, Natural Gas, API 5L Steels, Flow, Integral Analysis, Simulation.

RESUMO

Análise da Viabilidade técnica do transporte de amônia em oleodutos

Este trabalho tem por objetivo avaliar, com base nos requisitos técnicos e operacionais, o transporte de amônia liquefeita utilizando os oleodutos instalados no País. Essa possível solução estaria em consonância com algumas questões que ocorrem hoje no Brasil e que poderiam ser minimizadas, tais como: O desperdício de parte do gás natural produzido, por falta de demanda, a ociosidade dos oleodutos brasileiros e a dependência externa por fertilizantes. Nesse contexto aqui estudado, parte do gás natural atualmente desperdiçado, poderia atender a indústria de fabricação de amônia, que é o principal insumo da produção de fertilizantes. Ao longo do trabalho será apresentado um panorama do setor de gás natural no Brasil e no Mundo, assim como de fertilizantes, e também o potencial do uso dos oleodutos ociosos para o escoamento de amônia. A investigação da possibilidade do transporte de amônia será feita através de um estudo sobre a compatibilidade dos dutos de aço API 5L, que constituem os oleodutos do Brasil, para o transporte da amônia liquefeita. O estudo também apresenta uma simulação através de uma análise integral do escoamento de amônia em um trecho de um oleoduto conhecido, para fins de adequação do processo.

Palavras-chave : Amônia, Oleoduto, Gás Natural, Aços API 5L, Escoamento, Análise Integral, Simulação.

Conteúdo

1	Introdução	8
2	Revisão Bibliográfica	9
2.1	Mercado de gás natural	9
2.1.1	Mundo	9
2.1.2	Brasil	12
2.2	Fertilizantes	19
2.2.1	Produção de fertilizantes a partir do GN	21
2.2.2	Panorama da utilização de fertilizantes no Brasil	22
2.3	Transporte destes <i>commodities</i>	26
2.3.1	Gás Natural	26
2.3.2	Amônia	29
2.4	Potencial do uso de oleodutos para o transporte de Amônia	29
3	Análise Teórica	31
3.1	Características gerais da Amônia	31
3.2	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga	32
3.2.1	Aços API 5L 33	
3.2.2	Corrosão pela Amônia dos Aços API 5L	34
3.3	Revisão de Mecânica dos Fluidos	36
3.3.1	Conservação de Energia 36	
3.3.2	Linha de Energia	39
3.3.3	Número de Reynolds	40
3.3.4	Região de Entrada	40
4	Metodologia	41
4.1	Adequação da malha dos dutos	41
4.1.1	Hipóteses e considerações	43
4.1.2	Validação do Programa (Escoamento de Gasolina)	43
4.1.3	Simulação do escoamento de Amônia	45
4.2	Avaliação do volume a ser Transportado	49
5	Resultados e discussões	50
5.1	Compatibilidade dos Materiais	50
5.2	Validação do Programa	50
5.3	Simulação do Escoamento de Amônia	54
5.3.1	Volume a Ser Transportado	60
6	Conclusões	61
7	Referências Bibliográficas	62

Lista de Figuras

1	Reservas provadas de gás natural em trilhões m ³ . Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3] . . .	9
2	Produção mundial de gás natural em bilhões de m ³ por região . Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]	10
3	Histórico da produção mundial de gás natural de 1970 até 2019, em Twh . Fonte: IEA [5]	11
4	Percentual da produção demandada por setor da economia de 1990 a 2018 em Tj-gross Fonte: IEA [5]	11
5	Percentual de reservas provadas de gás natural, por região do Brasil, referente à 2019. Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]	12
6	Evolução das reservas provadas de gás natural no Brasil de 2010 a 2019, em bilhões de m ³ .Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]	13
7	Áreas de exploração de gás natural no Brasil. Fonte: webmap EPE [7] . . .	14
8	Previsão de produção de gás natural no Brasil em MMm ³ /d até 2030 Fonte: Estudo sobre o aproveitamento do gás do pré-sal [6]	15
9	Previsão de produção de gás natural associado no pré-sal no Brasil em MMm ³ /d até 2030. Fonte: Estudo sobre o aproveitamento do gás do pré-sal [6]	15
10	Produção nacional de gás natural por operador no ano de 2019, em bilhões de m ³ Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]	16
11	Histórico do valor arrecadado por <i>royalts</i> pelos beneficiários em milhões de R\$ de 2010 a 2019. Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]	17
12	Campos de produção de gás natural no Brasil Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]	18
13	Demanda nacional de GN por setor da economia. Fonte: iea.org [5]	19
14	Fluxograma produção NPK. Fonte: [8]	21
15	Histórico da produção grãos e da área plantada de grãos, de 1977 a 2017. Fonte: Adaptado de Conab [19]	24
16	Histórico do rendimento médio das lavouras de grãos brasileiras em toneladas por hectare, de 1977 a 2017. Fonte: Adaptado de Conab [19]	24
17	Consumo interno de fertilizantes em milhões de toneladas entre 2013 e 2020. Fonte: Adaptado de ANDA [20]	25
18	Histórico do PIB e do PIB do agronegócio do Brasil em bilhões de R\$ correntes de 1996 a 2020. Fonte: Adaptado de Ipeadata e ANDA [20, 21] .	26
19	Gasodutos de Transporte. Fonte: Webmap EPE[7]	28
20	Gasodutos de distribuição. Fonte: Webmap EPE [7]	28
21	Grau de Saturação dos principais oleodutos do Brasil. Fonte: EPE [23] . .	30
22	Vazamento em um duto de transporte de amônia líquida Fonte: [28]	35
23	Soldagem circunferencial de um duto. Fonte: esab [31]	35

24	Diagrama de Moody. Fonte:[33]	38
25	Perfil de Elevação do oleoduto, em metros, e PMOA, medido em metros de coluna de líquido	41
26	Potência e <i>head</i> da bomba, em função da vazão volumétrica de gasolina. .	42
27	<i>Head</i> da bomba em função da vazão mássica de fluido	44
28	Potência da bomba em função da vazão mássica de fluido	45
29	Pressão de saturação amônia em função da temperatura	46
30	Densidade da água em kg/m ³ em função da temperatura em °C. Fonte: Adaptado de [32]	48
31	Viscosidade dinâmica da água em função da temperatura em °C. Fonte: Adaptado de [32]	48
32	Perfil de pressão ao longo do escoamento de gasolina à 200 m ³ /h e 25°C . .	51
33	Perfil de pressão ao longo do escoamento de gasolina à 100 m ³ /h e 25°C . .	52
34	Perfil de pressão ao longo do escoamento de gasolina à 50 m ³ /h e 25°C . .	53
35	Linha de Energia do escoamento de gasolina para diferentes vazões vo- lumétricas a 25°C	53
36	Perfil de pressão ao longo do escoamento de amônia anidra e gasolina . . .	55
37	Linha de energia para diferentes vazões volumétricas para o escoamento de amônia e de gasolina a 25°C	56
38	Potência empregada pela bomba no escoamento de amônia e de gasolina a 25°C	57
39	Perfil de pressão para o escoamento de uma mistura de e amônia água a 100 m ³ / h e 25°C para diferentes frações volumétricas de água.	58
40	Perfil de pressão para o escoamento de amônia anidra e de uma mistura de e amônia água a 100 m ³ / h e 25°C	58
41	Linha de Energia para o escoamento de amônia anidra e de uma misturas de amônia e água a 100 m ³ / h e 25°C	59

Lista de Tabelas

1	Nutrientes essenciais para as plantas Fonte: Nutrição Mineral de Plantas [8]	20
2	Pressão de Vapor da Amônia para algumas temperaturas.	31
3	Efeito da exposição à amônia ao ser humano Fonte: Adaptado de [26] . . .	32
4	Alguns aços da classe API 5L com seus limites de resistência medidos em kpsi Fonte: Adaptado de Engenharia de Dutos [27]	33
5	Compatibilidade de alguns materiais com a amônia. A: Excelente, B: Boa, C: Razoável, D: Baixíssima, N/A: Informação não disponível. Fonte: Adaptado de Cole-Parmer [29]	34
6	Erro calculado para o escoamento de gasolina a 25°C e 190m ³ /h	50
7	Pressão na saída da bomba,para um escoamento com Gasolina	50
8	Pressão na saída da bomba para o escoamento com amônia anidra	54
9	Vazão a partir da qual há formação de gás	54
10	Variação percentual da pressão entre início e fim da linha 25°C	55
11	Potência exigida da bomba para manter o escoamento a uma dada vazão volumétrica e à 25°C.	56
12	Estimativa do volume transportado de amônia anidra em m ³ /dia	60

1 Introdução

O Brasil é um país que tem no agronegócio uma importante fonte de receita para o seu produto interno bruto, PIB. O agronegócio apresentou um crescimento significativo ao longo das últimas décadas. Além do mercado interno brasileiro, o mercado mundial depende dos produtos gerados pela agroindústria nacional.

Grande parte do sucesso dessa indústria é devido à utilização de fertilizantes nas lavouras, que, quando empregados corretamente, aumentam a capacidade de produção por área cultivada. Apesar do país ser um dos grandes protagonistas do setor agropecuário, a demanda por fertilizantes requerida pelo setor é atendida principalmente via importação, o que gera uma dependência externa num setor tão importante para a economia brasileira.

O país apresenta, também, uma produção de óleo e gás que atende principalmente o mercado interno. Os oleodutos utilizados para escoamento dos produtos líquidos desse setor, não têm a sua capacidade utilizada em todo tempo, de modo a gerar ociosidade nos oleodutos. No mercado de gás natural, GN, por outro lado, há um desperdício da produção por falta de demanda.

Um estudo da viabilidade técnica do transporte de amônia em oleodutos é interessante para a conjuntura da indústria nacional. Em primeiro lugar, se isso for possível, a ociosidade dos oleodutos diminuiria. A amônia, por sua vez, seria produzida com parte do GN que hoje é desperdiçado pela indústria de óleo e gás e atenderia a indústria nacional de fertilizantes, visto que amônia é o principal insumo para fabricação de fertilizantes.

Este trabalho terá como objetivo o estudo da viabilidade técnica do transporte de amônia em oleodutos. Isso será feito analisando-se tanto a compatibilidade do material dos dutos com a amônia como por meio da simulação do escoamento de amônia em um trecho de duto conhecido.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Mercado de gás natural

2.1.1 Mundo

A primeira companhia a explorar o GN teve origem na Inglaterra, em 1785. Nos Estados Unidos, em 1816, a cidade de Baltimore se tornou a primeira no país a ser iluminada pelo GN. Até o final do século XIX, GN era usado majoritariamente para iluminação, mas esse cenário viria mudar com a invenção de Robert Bunsen, que ficou conhecida como bico de Bunsen. Essa criação possibilitou muitos outros usos e aplicações do GN. [1, 2]

Com os avanços na área de metalurgia e soldagem, no início do século XX, foi possível um incremento significativo no número de gasodutos, tornando o escoamento do GN, do produtor ao setor consumidor, muito mais fácil e barato, de modo que, nos dias atuais, a produção de GN é tão difundida que é indispensável para diversos setores. [1, 2]

No ano de 2019, o total de reservas provadas no mundo - isto é, reservas nas quais é comprovada a existência de GN - somou 198,8 trilhões de m³. Os países pertencentes a OPEP (Organização dos países exportadores de petróleo) detinham 33,5% do total, enquanto o *ranking* seguiu sendo liderado pela Rússia, seguida de Irã e Catar, que juntos somavam 47,46% de toda reserva mundial. Em relação às regiões, o Oriente Médio, representou a região maior reserva provada, seguido da Comunidade dos Estados Independentes. O Brasil ocupou a 32^a posição no *ranking*. [3]

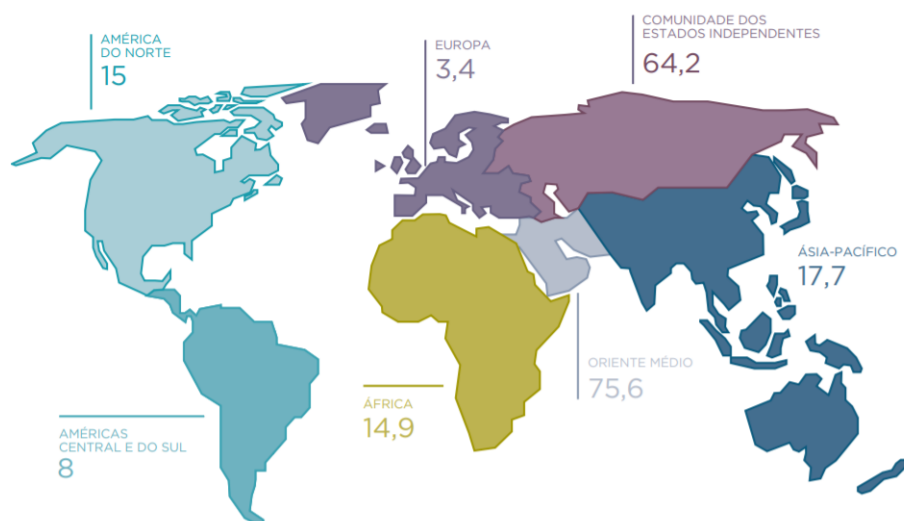


Figura 1: Reservas provadas de gás natural em trilhões m³.

Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]

A produção mundial em 2019 foi liderada pelos Estados Unidos, que produziram 23,1% do total de 4 trilhões de m³. A Rússia, embora com a maior reserva, entregou uma produção que representou 17% do total mundial, ficando em segundo lugar. Em relação às regiões, a América do norte foi a maior produtora, seguida de Oriente Médio e Comunidade dos Estados Independentes. O Brasil, ocupou a 31^a posição, produzindo 25,8 bilhões de m³ (0,6% da produção mundial no período), que representou 2,6% a mais do que foi produzido em 2018. Vale ressaltar que os cálculos feitos pela entidade, que são utilizados em toda seção 2.1.1, não levam em conta o excedente de Gás queimado, nem a perda e nem a reinjeção, apenas considera o que de fato foi consumido, diferente da metodologia do cálculo realizado no Brasil, que leva em conta esses fatores. Logo, os números que aparecerão na seção 2.1.2 serão diferentes dos valores da seção 2.1.1. Não se trata de um erro, mas foram gerados por diferentes metodologias de cálculo. [3]

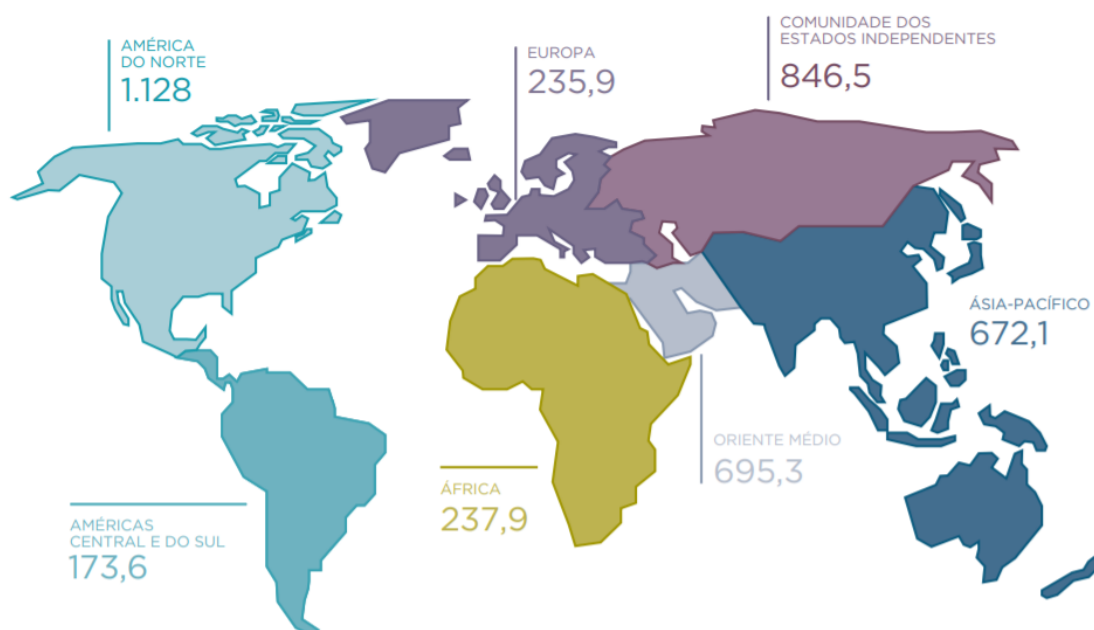


Figura 2: Produção mundial de gás natural em bilhões de m³ por região .

Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]

O histórico de produção mundial apresenta-se numa curva ascendente, com cada vez mais gás sendo produzido. Em 2019, por exemplo, houve um incremento de 3,4% na produção em relação ao ano de 2018. Em relação ao ano de 2010, esse aumento foi de 26,8%. [3, 4]

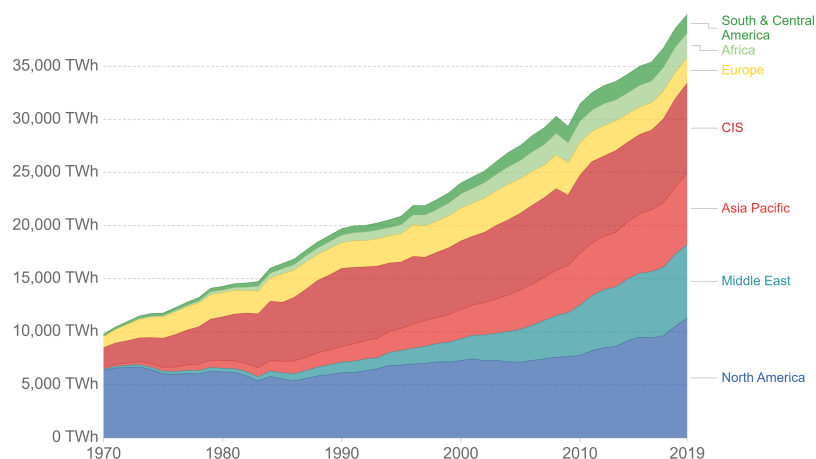


Figura 3: Histórico da produção mundial de gás natural de 1970 até 2019, em Twh .
Fonte: IEA [5]

A produção atende uma demanda que se dá por diversas necessidades, tanto energéticas como não energéticas. A primeira, seria aproveitar o calor liberado na queima do GN, já a segunda engloba qualquer processo que não envolva a utilização do calor liberado na queima do gás. No ano de 2018, como nos anos anteriores, a maior demanda se deu por meio das indústrias, seguido do uso residencial e de transporte, respectivamente. [5]

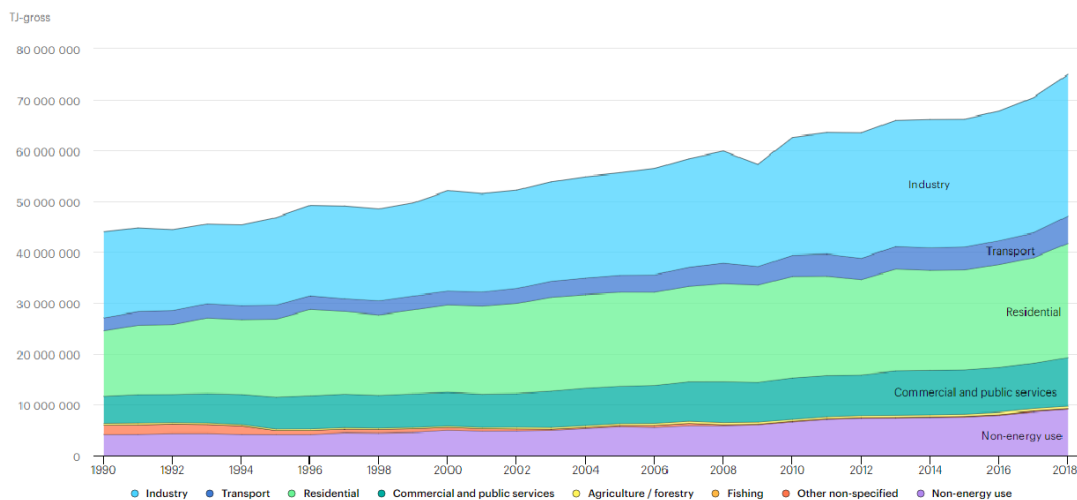


Figura 4: Percentual da produção demandada por setor da economia de 1990 a 2018 em Tj-gross
Fonte: IEA [5]

2.1.2 Brasil

O mercado de hidrocarbonetos no Brasil teve início na década de 1940, no campo de Candeiras, no Recôncavo. Na década de 70, a produção de GN iniciou um processo de crescimento lento, mas contínuo, de modo que, atualmente, a produção nacional é de cerca de 140 milhões m^3/dia , incluindo contaminantes. Segundo dados que constam na ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), em 2019, o número de reservas provadas atingiu um volume de 364 bilhões de m^3 , enquanto que as reservas totais - que levam em conta as reservas provadas, possíveis e prováveis - somaram um volume de 549 bilhões de m^3 . [3, 6]

Do total de reservas provadas, a maior parte encontra-se no estado do Rio de Janeiro, que no ano de 2019, representou 64,3% de toda reserva nacional, com 233,896 bilhões m^3 . Todas as reservas fluminenses são de origem *offshore*, o que não vale necessariamente para os outros estados. [3]

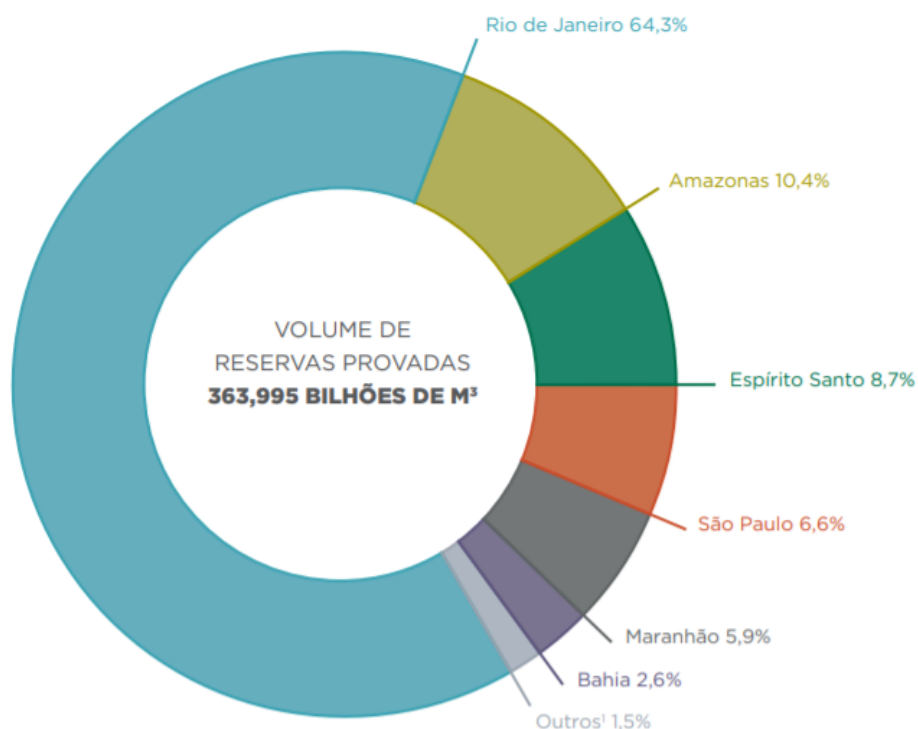


Figura 5: Percentual de reservas provadas de gás natural, por região do Brasil, referente à 2019. Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]

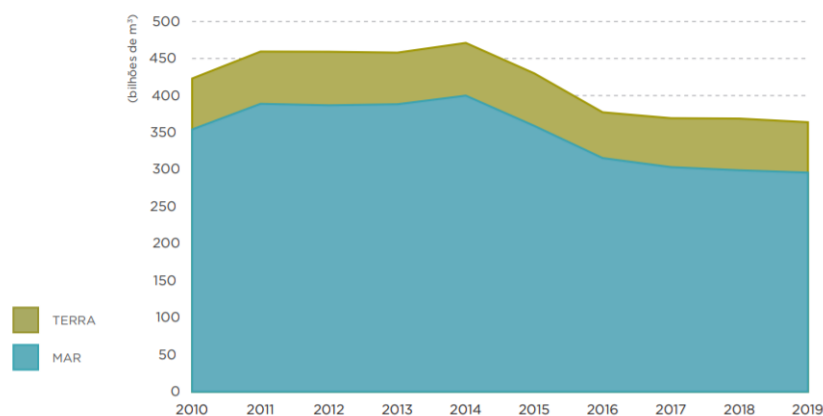


Figura 6: Evolução das reservas provadas de gás natural no Brasil de 2010 a 2019, em bilhões de m³. Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]

A produção de GN manteve-se em crescimento pelo nono ano consecutivo, com a produção de 2019 sendo 44,7 bilhões de m³ (Esse número leva em conta o excedente, a queima, o volume reinjetado e o consumo próprio das unidades). [3]

A maior parte do GN produzido no Brasil também é proveniente de campos *offshore*, com produção associada de óleo. Em 2019, 81,4% do total produzido teve origem *offshore*, um aumento de 10,9% em relação a 2018 e de 115,3% no acumulado desde 2010. As principais bacias de gás associado são as bacias de Santos e de Campos, enquanto que as de gás não associado são as bacias de Parnaíba e de Solimões. [3, 6]

Desses 81,4%, o Rio de Janeiro, foi o que teve a maior contribuição, produzindo 68,6% desse total, que representou 55,9% da produção nacional do período. [3]

A produção do pré-sal teve um crescimento de 23,3% em relação ao ano anterior, representando 57,9% da produção total. [3]

A queima e o volume perdido representou 3,6% da produção total e 35,3% foi reinjetado no poço. Em comparação esses valores aumentaram 17% e 23,1%, respectivamente, em comparação com a ano anterior, 2018. O aproveitamento do GN extraído foi 61,1%. [3]

A figura a seguir apresenta as regiões de exploração de GN do Brasil.

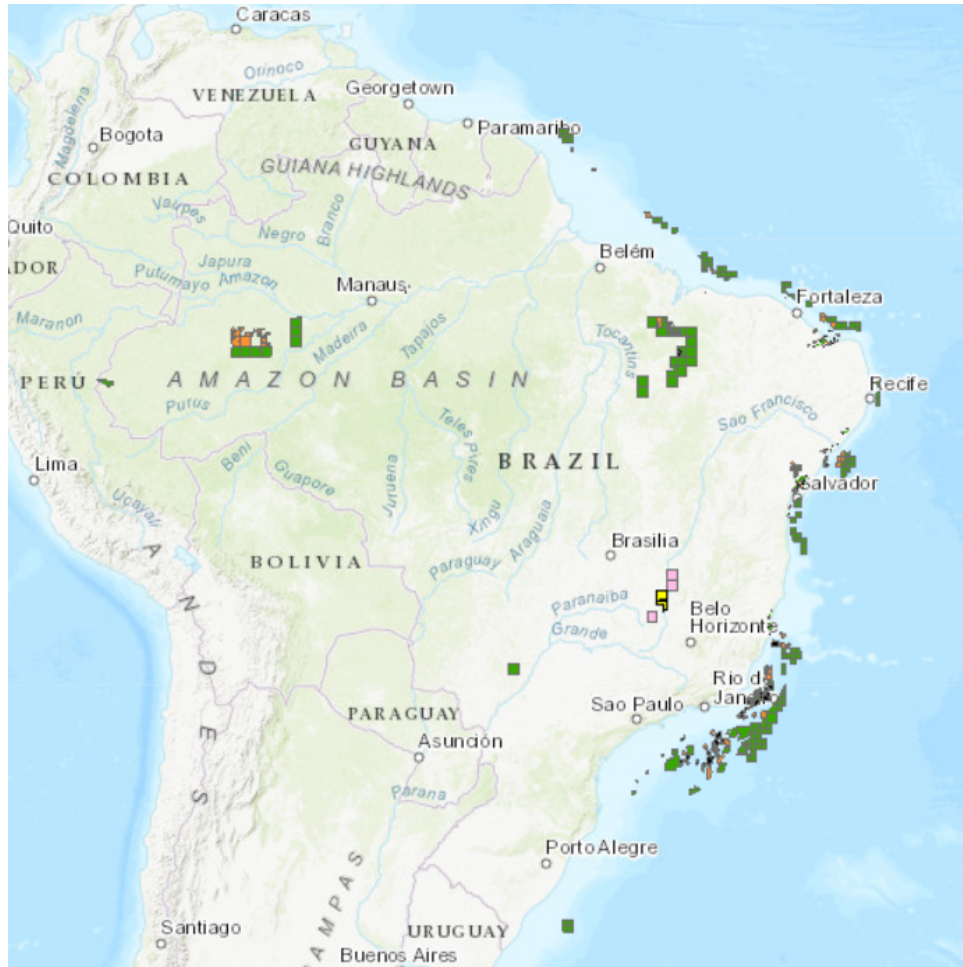


Figura 7: Áreas de exploração de gás natural no Brasil.
Fonte: webmap EPE [7]

Estima-se que nos próximos anos, a produção de GN estará fortemente associada a exploração das regiões do pré sal, como pode ser observado nas figuras a seguir. As reservas do pré sal possuem uma alta razão de GN associada ao óleo, ou seja, a quantidade de gás encontrada nesses reservatórios é alta, se comparadas aos reservatórios do pós sal. [6]

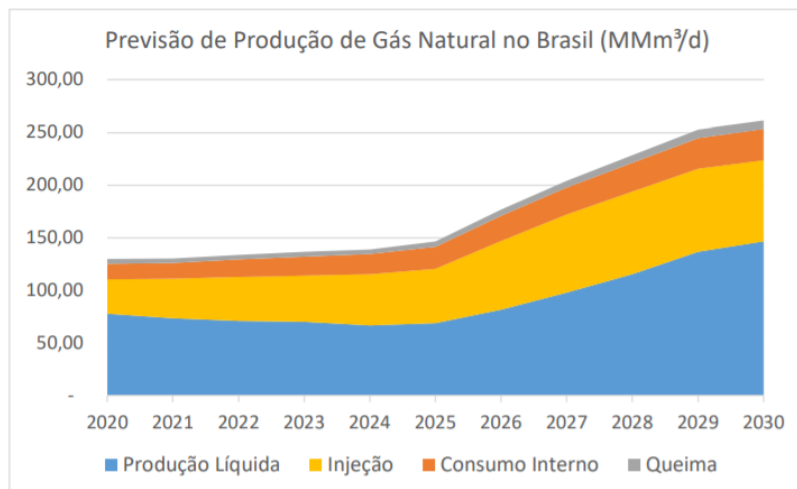


Figura 8: Previsão de produção de gás natural no Brasil em MMm³/d até 2030
 Fonte: Estudo sobre o aproveitamento do gás do pré-sal [6]

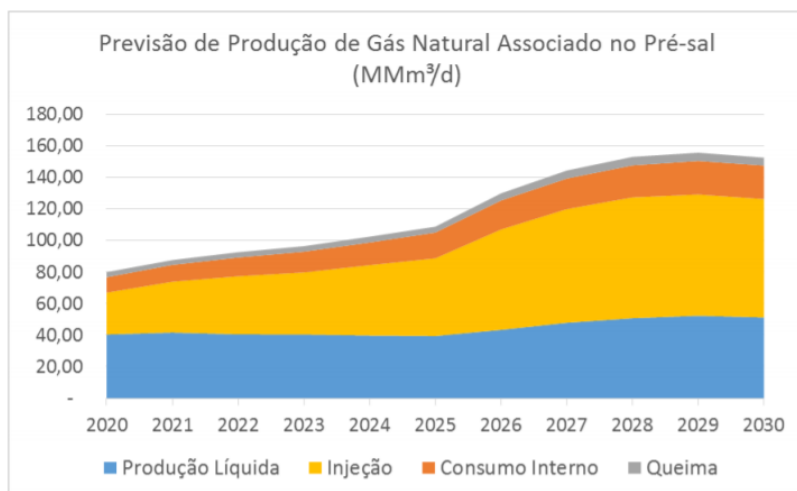


Figura 9: Previsão de produção de gás natural associado no pré-sal no Brasil em MMm³/d até 2030. Fonte: Estudo sobre o aproveitamento do gás do pré-sal [6]

A produção líquida, que é apresentada nas figuras acima, é o volume de GN que de fato chega às unidades de processamento de gás, UPGNs. À produção líquida, somam-se o volume queimado, perdido e reinjetado, para dar origem à produção bruta. [3, 6]

A queima do GN é uma alternativa que, em uma cadeia de processos bem esquematizada, não deveria existir pois ele é queimado pela impossibilidade de ser escoado até o

destino final. Trata-se de uma prática que não apresenta benefício à empresa exploradora. A queima e a perda de GN, em 2019, totalizaram 1589,7 milhões de m³, um aumento de 17% em relação a 2018. Encontrar uma alternativa para esse desperdício é um desafio que se faz presente, dado o cenário atual e às previsões, que estimam que no ano de 2030, ainda haverá esse problema. [3, 6]

A reinjeção do gás é, em parte, uma decisão que acontece, também, pela impossibilidade do transporte. Porém, essa impossibilidade não explica todo o volume reinjetado. Por exemplo, olhando as figuras acima, é perceptível - mais ainda no caso do pré sal - que o volume reinjetado é alto se comparado ao volume da produção líquida. Acontece que a reinjeção é um meio pelo qual se recupera a produção de óleo. Em outras palavras, reinjetar o fluido no poço, aumenta a pressão de saída do reservatório, fazendo com que mais óleo seja extraído. A reinjeção do GN também tem como objetivo evitar a emissão de gás carbônico, CO₂, que é um gás em abundância em alguns reservatórios, principalmente nos do pré sal. Logo, fica evidente o dilema entre a disponibilização comercial do produto e a disponibilização para reinjeção. Se houvesse meios para se gerar uma maior demanda pelo GN, o volume reinjetado poderia ser diminuído. [6]

O mercado de produção no Brasil é dominado pela Petrobras, que em 2019, respondeu por 75% do volume do GN produzido. Outros operadores desse mercado, com participações ainda tímidas, vem ganhando cada dia mais espaço no mercado. [3]

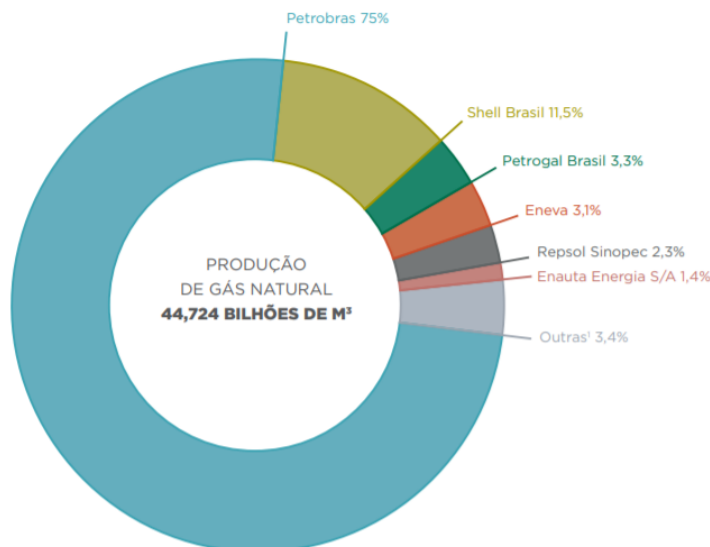


Figura 10: Produção nacional de gás natural por operador no ano de 2019, em bilhões de m³
Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]

A Lei de número 9.478/1997 (Lei do Petróleo) estabeleceu às fatias recebidas pelos governos federais, estaduais e municipais. Os concessionários de exploração e produção têm o dever de arcar com uma série de tributos, desde a promulgação da lei, tais como *royaltes*, bônus de assinatura, pagamento pela retenção da área e participação especial. Na figura a seguir pode ser observado o total de *royaltes* arrecadado entre os anos de 2010 e 2019 pelos beneficiários. [3]

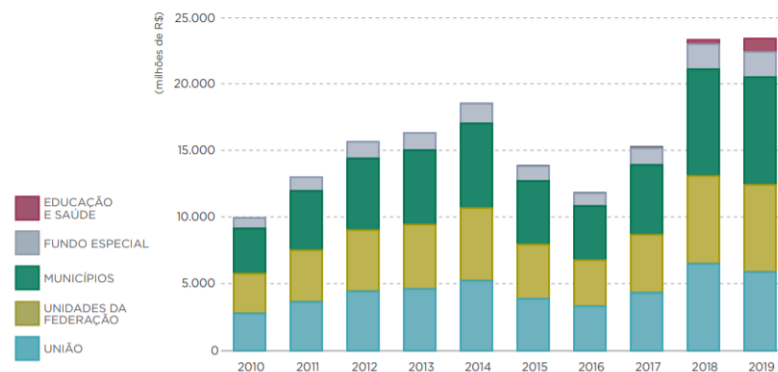


Figura 11: Histórico do valor arrecadado por *royaltes* pelos beneficiários em milhões de R\$ de 2010 a 2019. Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]

No ano de 2019, o GN foi processado em 14 polos de produção, que somaram 107,2 milhões de m³/dia de capacidade nominal de processamento, 12,1% a mais em relação a 2018. Em 2019, o total processado foi de 22,9 bilhões de m³, uma média de 61,4 milhões de m³/dia, representando 57% da capacidade instalada. [3]

Os produtos do processamento do GN foram 21 bilhões de gás seco, 3,3 milhões de m³ de GLP (gás liquefeito de petróleo), 1,2 milhão de m³ de C₅ (gasolina natural), 289,9 milhões de m³ de etano e 783,3 milhões de m³ de propano. O destaque é o polo de Reduc, que respondeu por 100% da produção de etano e 97,3% de propano. [3]

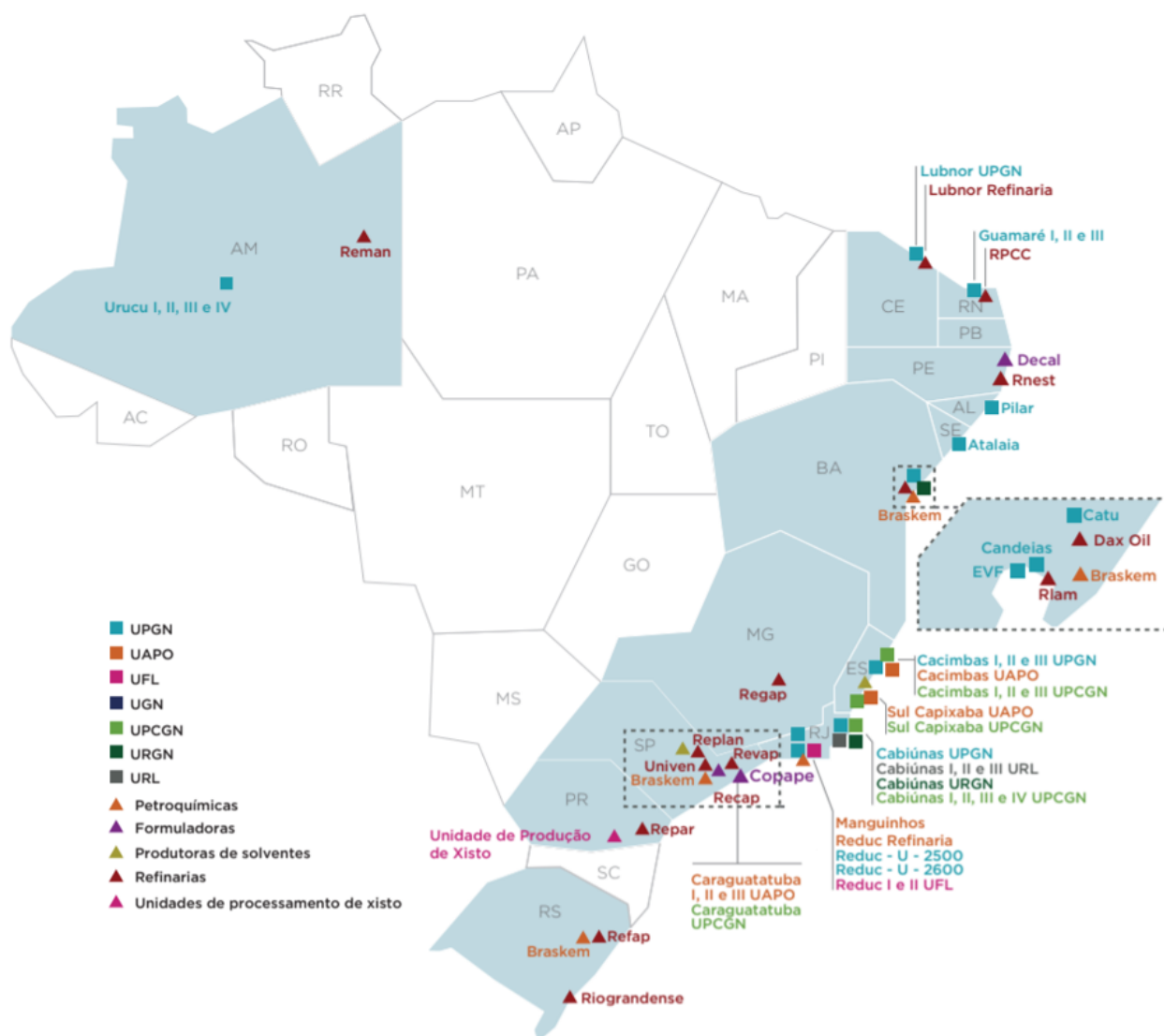


Figura 12: Campos de produção de gás natural no Brasil

Fonte: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020 [3]

No que diz respeito ao consumo de gás no Brasil, a demanda pelos setores é um diferente do quadro global. O país não o utiliza em larga escala para aquecimento residencial e comercial. Destaca-se que a partir dos anos 2000 houve um uso muito mais acentuado na utilização do gás natural veicular, GNV, como combustível alternativo e mais barato, inclusive com incentivos por parte dos governos federais e estaduais, por meio da diminuição de tarifas de impostos para proprietários de veículos movidos a GNV. [5]

A figura a seguir apresenta um histórico do consumo de GN por setor da economia no Brasil, de 1990 até 2019.

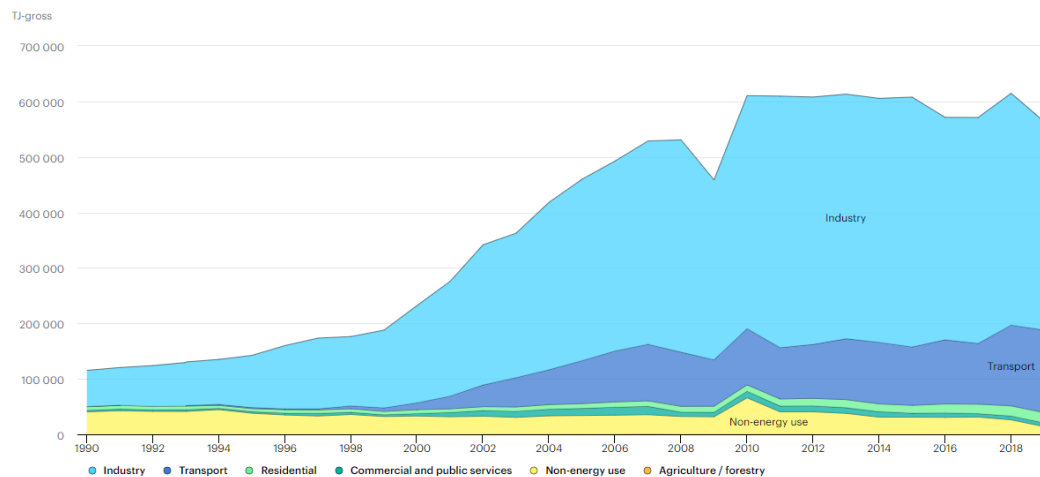


Figura 13: Demanda nacional de GN por setor da economia. Fonte: iea.org [5]

2.2 Fertilizantes

As Plantas são seres capazes de sintetizar o próprio alimentos através de fontes inorgânicas, e por isso, são ditas seres autotróficos. Da atmosfera, as plantas extraem principalmente CO_2 , embora algumas espécies também consigam fixar o Nitrogênio, N_2 , transformá-lo em nitrogênio amoniacal e, em seguida, em nitrogênio das proteínas. Do solo elas obtêm água e outros nutrientes essenciais à sua sobrevivência, como nitrogênio, fósforo, potássio etc., por meio do seu sistema radicular. Os nutrientes absorvidos são considerados essenciais se atenderem a três requisitos: [8, 9, 10]

- 1 - O nutriente tem de estar ligado diretamente ao metabolismo da planta.
- 2 - A planta não é capaz de crescer e se desenvolver sem a presença desse nutriente.
- 3 - O elemento tem uma função específica, que não pode ser substituída pela de nenhum outro nutriente.

Os elementos essenciais são classificados entre macro e micronutrientes, comumente de acordo com as concentrações relativas encontradas nos tecidos das plantas ou de acordo com a concentração requerida para o seu crescimento. Segundo Hopkins (2000), os nutrientes essenciais podem ser subdivididos conforme indica a figura a seguir: [11]

Tabela 1: Nutrientes essenciais para as plantas
Fonte: Nutrição Mineral de Plantas [8]

Elemento	Símbolo Químico	Forma Disponível	Concentração na matéria seca (mmol/kg)
Macronutrientes			
Hidrogênio	H	H ₂ O	60.000
Carbono	C	CO ₂	40.000
Oxigênio	O	O ₂ , CO ₂	30.000
Nitrogênio	N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1000
Potássio	K	K ⁺	250
Cálcio	Ca	Ca ²⁺	125
Magnésio	Mg	Mg ²⁺	80
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	60
Enxofre	S	SO ₄ ²⁻	30
Silício	Si	SiO ₂	30
Micronutrientes			
Cloro	Cl	Cl ⁻	3,0
Boro	B	BO ₃ ³⁻	2,0
Ferro	Fe	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	2,0
Manganês	Mn	Mn ²⁺	1,0
Sódio	Na	Na ⁺	0,4
Zinco	Zn	Zn ²⁺	0,3
Cobre	Cu	Cu ⁺ , Cu ²⁺	0,1
Níquel	Ni	Ni ²⁺	0,05
Molibdênio	Mo	MoO ₄ ²⁻	0,001

Desses nutrientes, hidrogênio, carbono e oxigênio, são obtidos através da absorção do CO₂, do oxigênio, O₂, e de água, H₂O. Os demais, de origem mineral, são absorvidos em maior parte do solo por meio das raízes das plantas.

Não é comum, os solos conterem os nutrientes minerais em suas concentrações ideais para o pleno desenvolvimento das culturas. Para isso, a indústria desenvolveu os chamados fertilizantes sintéticos, que são uma alternativa para proporcionar aos solos, a quantidade necessária dessas substâncias.

Os principais macronutrientes, são Nitrogênio, fósforo e potássio. Dentre esses, o nitrogênio é o requerido em maior quantidade ao longo da vida de uma planta, sendo constituinte de todas as proteínas e ácidos nucleicos, de modo sua falta nos tecidos das plantas inibe rapidamente o seu crescimento.

Podem ser adicionados ao solo através dos fertilizantes orgânicos, que são provenientes da mineralização de resíduos vegetais e animais, por meio da ação efetiva dos micro organismos que habitam o solo. São exemplos de fertilizantes orgânicos o esterco bovino, o esterco suíno, borra de café e etc.

O nitrogênio também pode ser depositado no solo por meio dos fertilizantes sintéticos, que são assim chamados por serem fabricados pelo homem. Estes são divididos nos quatro grupos a seguir: [8, 9, 10, 12]

1 - Amoniacais. São os fertilizantes sintéticos que apresentam o nitrogênio na forma amoniacal, NH₄⁺. Se encaixam nessa categoria a amônia anidra (82%N), as soluções amoniacais (20%N), o sulfato de amônio (21%N), o cloreto de amônio (25%N), o fosfato

monoamônio-MAP (9%N), o fosfato diamônio-DAP (16%N) e o fosfossulfato de amônio (13%N).

2 - Nítricos. O nitrogênio está presente na forma nítrica, NO_3^- . O nitrato de sódio (16%N), o nitrato de potássio (1%N), o nitrato de cálcio (16%N), o nitrofosfato (14%N).

3 - Nítrico-amoniacaais. Apresentam o nitrogênio em ambas as formas. Nitrato de amônio (32%N), nitrato de amônio e cálcio (20%N), o nitrossulfocálcio (25%N), o sulfonitrato de amônio (25%N), o sulfonitrato de amônio e magnésio (19%N)

4 - Amídicos $CO(NH_2)_2$. São fertilizantes desse grupo a ureia (44%N), a ureia formaldeído (35%N), a ureia revestida com enxofre (39%N) e a crotonilidina diureia (28%N).

2.2.1 Produção de fertilizantes a partir do GN

Na figura a seguir, está representada a rota de sintetização mais comum para cada grupo dos NPKs:

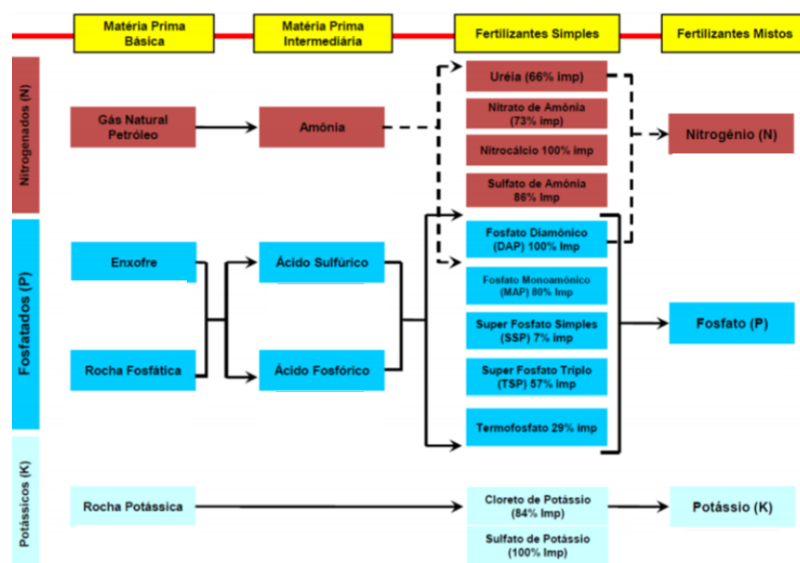


Figura 14: Fluxograma produção NPK. Fonte: [8]

A principal matéria prima para produção dos nitrogenados é o gás natural. O processo industrialmente utilizado hoje na produção de Amoníaco, NH_3 , teve sua origem um pouco antes da primeira guerra mundial e foi desenvolvido pela químico alemão Fritz Haber e aprimorado por outro químico de mesma nacionalidade, Karl Bosch. [10, 13]

Até o início do século XX, era o Nitrato de Sódio, $NaNO_{3(s)}$, que atendia o mercado de produção mundial de fertilizantes, além de ser um dos reagentes para fabricação de

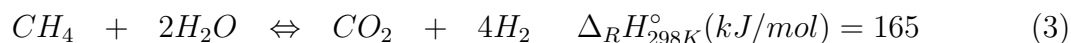
ácido nítrico, HNO_3 , de que se precisava para fazer explosivos, muito necessários na época da primeira guerra mundial. Visto que as jazidas que continham o $NaNO_{3(s)}$ eram raras (quase a totalidade do nitrato era extraído do Chile), a corrida por tentar achar um processo industrialmente viável para fabricação de amoníaco se fazia necessária. [13, 14]

Em 1913 surge a primeira fábrica na Alemanha capaz de sintetizar amoníaco pelo processo Haber-Bosch. Logo em seguida, com o bloqueio naval por parte da marinha britânica, impedindo que navios de salitre-do-chile (como ficou conhecido o nitrato de sódio) chegassem à Alemanha, houve uma necessidade imediata de expansão do número de indústrias produzindo amoníaco por meio do desenvolvido processo Haber-Bosch. [13]

A reação de produção do amoníaco, via processo Haber-Bosch pode ser observada a seguir e consiste da reação do Nitrogênio, N_2 , com o Hidrogênio, H_2 , sob altas pressão e temperatura, além da utilização de aço e alumínio, como catalisadores do processo. [15, 16]



O N_2 contido na reação é obtido da atmosfera, que é composta de aproximadamente 80% desse gás. A rota mais comumente utilizada para obtenção do H_2 industrialmente é via processo de reforma vapor do GN. O processo, que é realizado num reator químico sob condições de temperatura e pressão controladas, necessita de aporte térmico, visto que a reação é altamente endotérmica. As duas reações parciais, tendo como base metano puro, podem ser observadas a seguir: [17]



A amônia, NH_3 , produzida no processo é então manipulado pela indústria química a fim de originar os diversos tipos fertilizantes nitrogenados, além de ser utilizado em diversos outros campos de aplicação, como em sistemas de refrigeração. [10, 15]

2.2.2 Panorama da utilização de fertilizantes no Brasil

Até meados do século passado, a agricultura no Brasil era algo rudimentar, exercida apenas por pequenos produtores e sem o emprego de tecnologia e conhecimentos. Menos de 2% das propriedades rurais contavam com máquinas agrícolas. [18]

Um estudo sobre a agricultura do Brasil, publicado em 1971, evidenciou a maneira arcaica na qual se dava os plantios. Nas palavras dos autores: *"Muito pouco se sabe sobre a resposta destes solos às aplicações de fertilizantes. A capacidade de gerar e desenvolver*

novas variedades de altos rendimentos é limitada. Pouca pesquisa tem sido feita sobre a resposta dos rebanhos à aplicação de níveis crescentes de ração, ou sobre quais são as rações ótimas. Ignora-se quais as combinações de atividades mais lucrativas nas fazendas, e pouca pesquisa tem sido feita sobre as doenças tropicais dos rebanhos e lavouras". [18]

Essa combinação de simplicidade com falta de técnica resultava num péssimo rendimento por hectare das lavouras, de modo que áreas grandes tinham de ser utilizadas para plantios, e mesmo assim, não se produzia o necessário para atender a população do país. [18]

Esse cenário, unido ao crescente processo de industrialização, que gerava um maior poder aquisitivo da população e aumento da população exigiam uma modernização do agronegócio, para atender a demanda por alimentos, cada vez mais crescente. Uma reportagem do jornal *O Estado de São Paulo* publicada em abril de 1968, deixa claro o problema da escassez de alimentos: [18]

"O Brasil terá de multiplicar por dez a sua atual produção de alimentos, ou será forçado a parar o surto de industrialização por falta de divisas para pagar o crescente volume de importação de alimentos, segundo relatório apresentado pelos delegados brasileiros à IV Conferência Latino-Americana de produção alimentar, que se realizou em Buenos Aires.

O encontro, patrocinado pela Internacional Mineral Chemical Corporation, reuniu representantes do Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, República Dominicana, México, Venezuela e Argentina, visando principalmente estabelecer uma política coordenada a fim de deter a escassez de alimentos desta região do mundo, considerada uma das áreas mais famintas do globo.

A dieta alimentar do homem brasileiro é uma das mais baixas do mundo e o surto de industrialização dos Estados do Centro-Sul e do Nordeste brasileiro só virão agravar o problema, ao proporcionar um aumento das rendas da população urbana e uma demanda cada vez maior de gêneros alimentícios, a não ser que a produção agrícola acompanhe esse desenvolvimento." [18]

O governo, então, instituiu políticas para aumentar a produção agrícola. Essas medidas incluíam investimentos públicos em pesquisa e desenvolvimento, extensão rural e crédito farto. Isso marcou o início de um intenso processo de modernização na agricultura brasileira. Como fruto de todo esse processo que se iniciou na década de 70, hoje, o Brasil é um dos mais importantes ofertantes do agronegócio para o mundo. Esse processo, incluiu, dentre várias outras medidas, o desenvolvimento de pesquisas para melhor aproveitamento dos solos. [18]

A figura a seguir apresenta um dos indicadores mais interessantes para se entender o efeito das pesquisas na área da agricultura nacional. A maior parte desse aumento de produção por área cultivada é explicada pela pesquisa e consequente emprego correto dos fertilizantes, que como visto, maximizam o potencial dos solos. Enquanto a produção de grãos, que era de 38 milhões de toneladas em 1975, cresceu mais de seis vezes no período, enquanto a área plantada somente dobrou. [18]

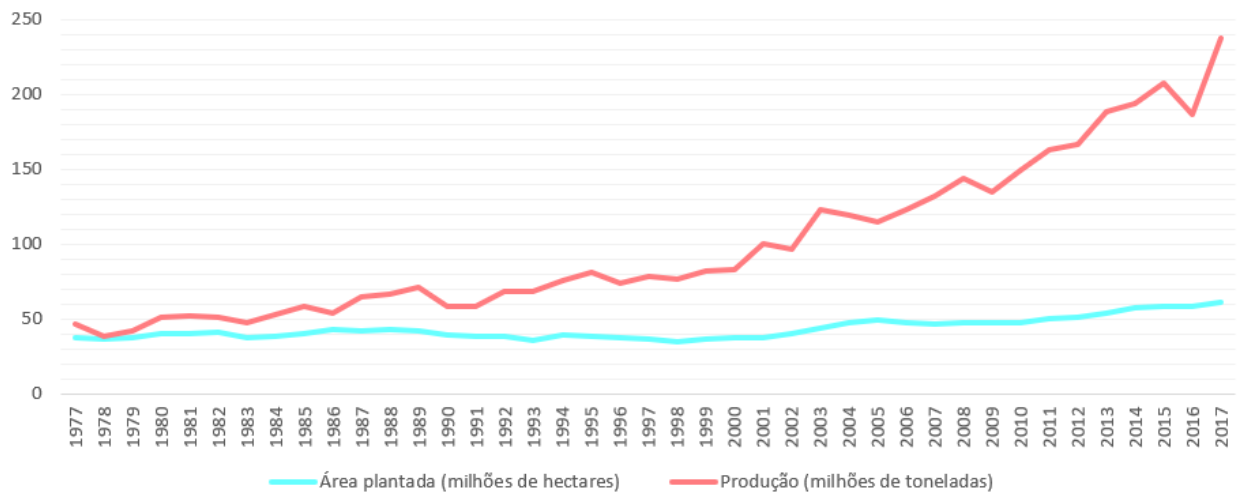


Figura 15: Histórico da produção grãos e da área plantada de grãos, de 1977 a 2017.
Fonte: Adaptado de Conab [19]

Um outro indicador bem explicativo é a produção frente à área cultivada, que pode ser observado por meio da evolução do rendimento médio, em quilogramas por hectare, das lavouras de arroz, feijão soja, trigo e milho dentre os anos de 1975 e 2017. [18]

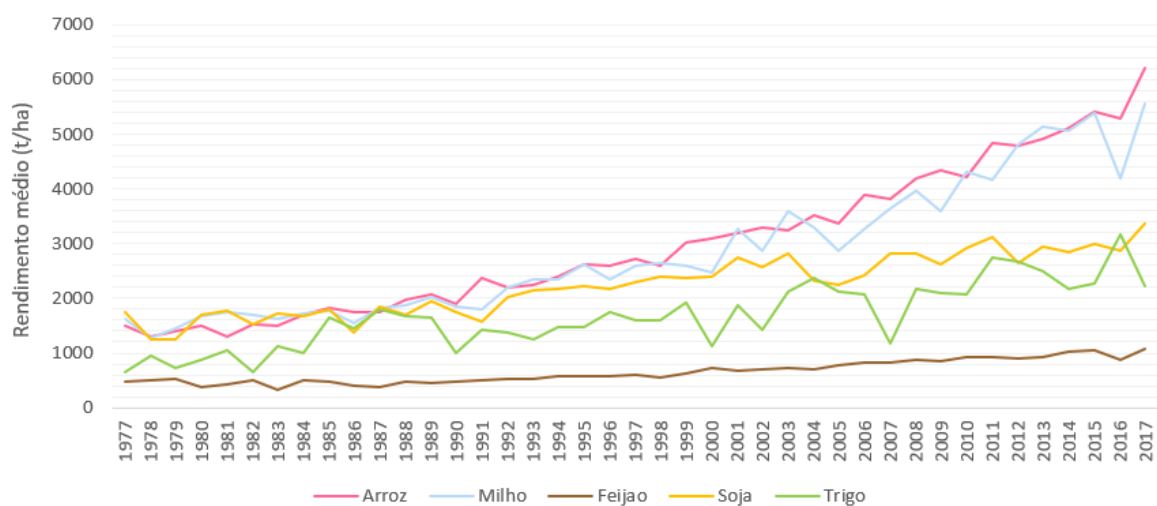


Figura 16: Histórico do rendimento médio das lavouras de grãos brasileiros em toneladas por hectare, de 1977 a 2017. Fonte: Adaptado de Conab [19]

Apesar de toda essa evolução na agricultura, grande parte do sucesso das safras brasileiras está condicionada à importação de fertilizantes. O Brasil é um dos maiores participantes do agronegócio mundial e também é um dos maiores importadores de fertilizantes. A figura a seguir apresenta essa dependência dos insumos estrangeiros, entre 2013 e 2020. [20]

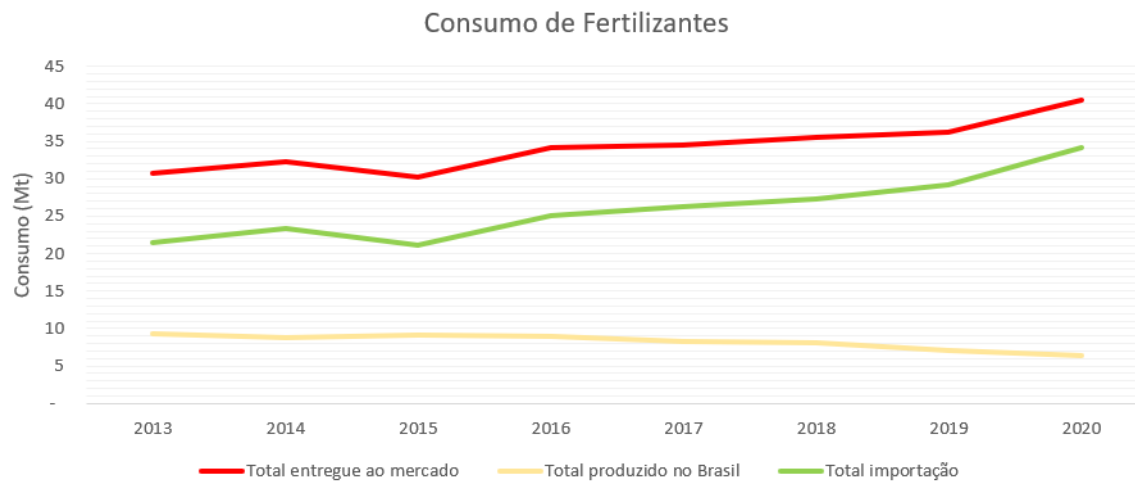


Figura 17: Consumo interno de fertilizantes em milhões de toneladas entre 2013 e 2020.
Fonte: Adaptado de ANDA [20]

O incremento da produção nacional de fertilizantes seria uma forma de se diminuir a dependência externa em um setor da economia que é crucial para o Brasil. Como é possível observar na figura abaixo, o PIB do agronegócio, representa uma parcela significativa do PIB total do país. Portanto, desenvolver a indústria interna de fertilizante é um desafio que deve ser analisado e que pode impactar de maneira positiva o setor do agronegócio e a economia como um todo.

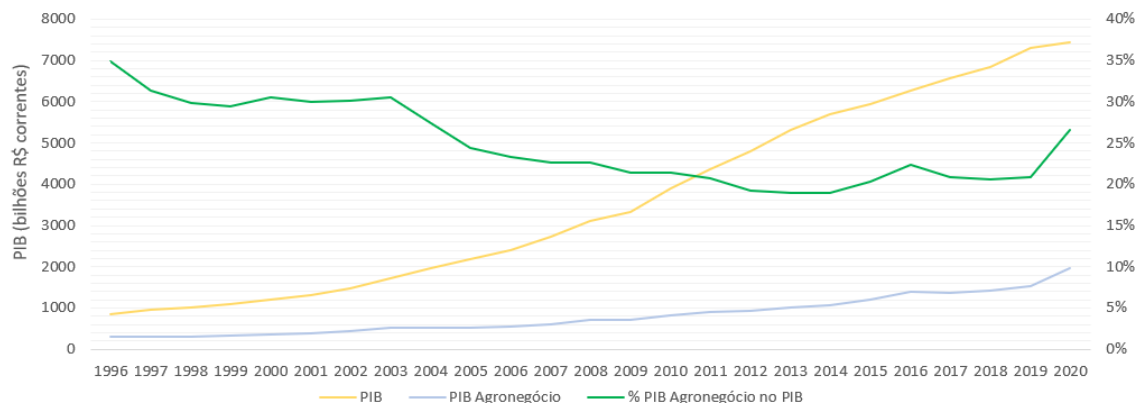


Figura 18: Histórico do PIB e do PIB do agronegócio do Brasil em bilhões de R\$ correntes de 1996 a 2020. Fonte: Adaptado de Ipeadata e ANDA [20, 21]

2.3 Transporte destes *commodities*

2.3.1 Gás Natural

Após a extração, o transporte desse gás até o consumidor final pode se dar de algumas maneiras: [22, 23]

1 - Via redução do volume do gás.

Nessa classe encontram-se o gás natural comprimido, GNC, que é o nome que recebe o gás no estado gasoso, quando comprimido por volta de 270 vezes do seu volume e transportado em cilindros até o consumidor final; gás natural liquefeito, GNL, que é o gás resfriado a uma temperatura de -123 Celcius, que o transforma em líquido e reduz seu volume em 700 vezes e é transportado por câmaras criogênicas tanto em carretas como em navios. Esse tipo de transporte é mais utilizado para grandes volumes e grandes distâncias, quando não há gasodutos; por fim, o hidrato de gás natural, é a outra maneira de se reduzir o volume do GN, sendo amostras solidificadas de uma combinação de água e GN, que são transportadas à pressão atmosférica e sob temperatura de 15 Celsius.

2 - Conversão do gás em outros hidrocarbonetos líquidos estáveis (*gas to liquid*, GTL) por meio de processos químicos.

3 - Conversão da energia do gás em energia elétrica (*gas to wire*, GTW).

Essa tecnologia produz energia elétrica na boca do poço e a transporta por meio de cabos de alta tensão.

4 - Por último, a tecnologia GTC (*gas to commodity*) converte o GN em potência térmica ou elétrica para produção de alguma *commodity* que requeira grande quantidade de energia na sua produção, como alumínio, aço, vidro e etc.

5 - Dos tipos de transporte do gás, o por meio de gasodutos é o mais usual.

No Brasil, o transporte de gás natural é um monopólio natural. Isso significa que o agente prestador de serviço de transporte será um monopolista e que deve ser regulado. Fica a cargo da agência nacional de petróleo, gás natural e biocombustíveis (ANP), a regulação da atividade de transporte do GN. Esse transporte é realizado no Brasil por meio de gasodutos. No site da ANP, é possível observar a relação dos gasodutos em operação. Eles se dividem em gasodutos de transporte e gasodutos de distribuição. [23, 24]

Os gasodutos de transporte são aqueles que levam o GN desde instalações de processamento, estocagem, outros gasodutos de transporte e pontos de entrega aos grandes consumidores e aos concessionários estaduais, ou seja, aos responsáveis pela distribuição do GN ao consumidor final. Os gasodutos de distribuição são os gasodutos administrados pelas concessionárias estaduais, ou seja, são os que levam GN aos consumidores. [23, 24]

As 5 empresas que fazem o transporte de GN do Brasil, tem sob sua disponibilidade, 11500 km de tubulação.

O Brasil, conta hoje com aproximadamente 12000km de tubulação que carrega GN. Esses dutos, são classificados, de acordo com a legislação vigente, em cinco classes distintas. Desses grupos, listados a seguir, os quatro primeiros estão sob jurisdição federal, enquanto que o último tem sua regulação feita por cada estado responsável. São eles: [23, 24]

1- Gasodutos de escoamento de produção

São aqueles que conectam as instalações de produção às estações de tratamento e processamento do gás ou a unidades de liquefação.

2- Gasodutos de transferência

Podem desempenhar a mesma função que os primeiros. Contudo, a diferença está no fato destes serem de uso exclusivo do proprietário, conectando suas próprias instalações entre si.

3- Gasodutos integrantes de terminais de GNL

São os gasodutos que são usados exclusivamente para conectar os terminais GNL à malha de gasodutos. Caso contrário, são considerados gasodutos de transporte.

4- Gasodutos de transporte

São os dutos que movimentam o GN desde instalações de processamento, estocagem ou outros gasodutos de transporte, instalações de estocagem ou pontos de entrega a concessionários de distribuição. Segundo a ANP, o Brasil conta com 9486km de tubulação de transferência, divididos em 48 dutos.



Figura 19: Gasodutos de Transporte. Fonte: Webmap EPE[7]

5- Gasodutos de distribuição

São os gasodutos que conectam os *city gates* (pontos de entrega) ligados à malha de transporte ao consumidor final ou outras fontes de fornecimento de GN, direto ao consumidor final. A malha de distribuição é bem maior, de cerca de 35000 km e dividida entre várias companhias.



Figura 20: Gasodutos de distribuição. Fonte: Webmap EPE [7]

2.3.2 Amônia

O transporte de Amônia Anidra é geralmente realizado com o fluido na fase líquida, que é conseguido sob condições específicas de temperatura e pressão. Esse transporte pode se dar de diversas maneiras:

1-Via rodovias.

Caminhões são equipados com tanques pressurizados e com controle de temperatura, o que garante que a amônia estará sob as condições desejadas. Nos Estados Unidos, por exemplo, os caminhões carregam amônia numa pressão de 2,1MPa, comumente com até 27 toneladas de Amônia. [25] No Brasil, o transporte desse insumo é realizado apenas por esse meio, que se enquadra na categoria de transporte de carga perigosa e é altamente regulado e controlado pelo governo através de normas da agencia nacional de transportes terrestres (ANTT). Além de ser mais custoso, o transporte rodoviário coloca em risco a vida de muito mais pessoas, visto que acidentes nas estradas podem ocorrer.

2-Via trilhos.

Esse tipo de transporte também é utilizado ao redor do mundo. Nesse tipo de transporte a Amônia é pressurizada entre 1,5 - 1,6MPa e armazenada em tanques. [25]

3-Via embarcações.

O transporte geralmente é feito em câmaras sob pressão atmosférica, mas com temperaturas entre 221 e 240 K. [25]

4- Via dutos.

Nesse caso, amônia é bombeada como pressões que variam entre 0,2 e 10 MPa e temperaturas de no máximo 302 K. É um tipo de transporte que depende de uma infraestrutura de dutos construída. As três maiores linhas de dutos de Amônia dos Estados Unidos, somam aproximadamente 5000 km de extensão. O maior amonioduto do mundo, liga a Rússia à Ucrânia. Com um total de 2417 km, ligando uma grande planta de produção em Togliate até Odessa, no Mar Negro. Nesse tipo de transporte, a amônia pode ser escoada tanto na forma gasosa como na forma líquida, dependendo das características do duto. [25]

2.4 Potencial do uso de oleodutos para o transporte de Amônia

O Brasil conta com cerca de 8000 km de oleodutos de transporte disponíveis. Da mesma forma que os gasodutos, os dutos de óleo podem ser classificados em oleodutos de transporte, de transferência, ou ainda, oleodutos portuários. Dados da EPL mostram que os oleodutos de transporte, os que movimentam óleo bruto e líquidos derivados do petróleo, têm sua capacidade de utilização não atendida, gerando uma ociosidade. No primeiro semestre de 2013, por exemplo, foi transportado um total de cerca de 39,0 milhões de m³, enquanto no mesmo período de 2019, um volume de 28,8 milhões foi movimentado. [3, 23]

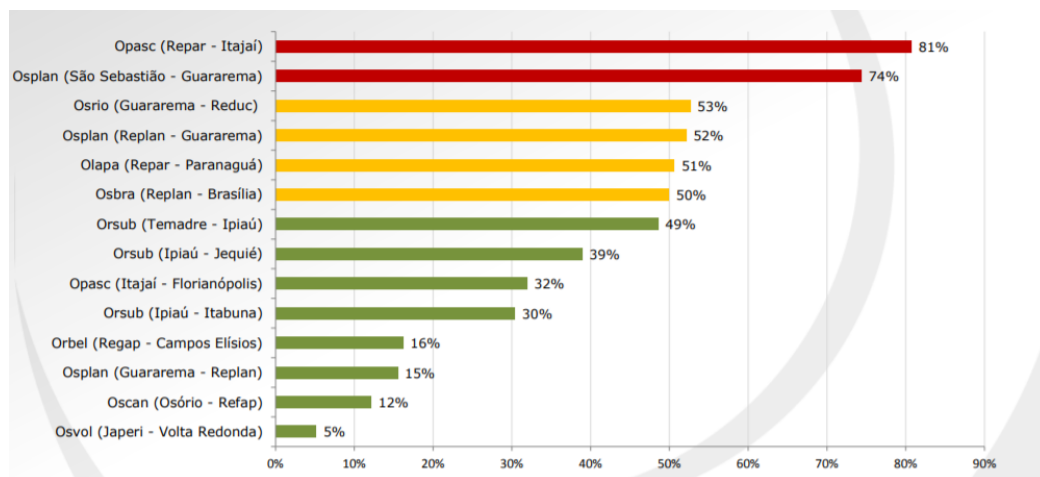


Figura 21: Grau de Saturação dos principais oleodutos do Brasil.

Fonte: EPE [23]

Para que um duto seja apto a fazer transporte de óleo, ele tem que atender à especificação de diversas normas técnicas, que no Brasil, são estabelecidos pelo regulamento técnico da ANP 2/2011.

Além de ser necessário investigar a compatibilidade dos aços dos oleodutos com a amônia, é preciso estudar as características do escoamento. Amônia, a temperatura e pressões ambientes, é um gás, mas se pressurizada, é encontrada em fase líquida, gerando a possibilidade de que seu transporte possa ser efetuado por meio de oleodutos, que são dotados de estações com bombas, que por construção só são possibilitadas de pressurizar fluidos na fase líquida.

No Brasil, a associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, é a responsável pela elaboração da norma que dá a diretriz para o projeto de dutos. A ABNT NBR 15280-1 (Dutos Terrestres - Parte 1) em seu anexo E, faz menção à norma API 5L. Desta forma, fica evidenciado que também no Brasil, no que diz respeito a especificação dos dutos para indústria de óleo e gás, as a norma API 5L é seguida.

3 Análise Teórica

3.1 Características gerais da Amônia

Nas condições normais de temperatura e pressão, CNTP, a amônia anidra, NH_3 , é um gás incolor que apresenta um odor pujante e característico, com densidade de $0,73 \text{ kg/m}^3$. A substância possui, à pressão ambiente, ponto de ebulição de $-33,35^\circ\text{C}$, ponto de fusão de $-77,65^\circ\text{C}$, e temperatura de ignição de $656,85^\circ\text{C}$. Nessas condições, é uma substância que pode reagir quimicamente com diversos materiais, gerando corrosões severas.[26]

A pressão de vapor da amônia pode ser observada na tabela a seguir para diversas temperaturas.

Pressão de Vapor da Amônia	
15°C	0,7311 MPa
20°C	0,8681 MPa
25°C	1,0251 MPa
30°C	1,2021 MPa

Tabela 2: Pressão de Vapor da Amônia para algumas temperaturas.

A molécula de amônia é composta por três átomos de hidrogênio e um átomo de nitrogênio, unidos numa estrutura piramidal. É uma molécula polar com ligações muito fortes. A constante dielétrica da amônia é menor que a da água, sendo, por isso, um solvente orgânico melhor que a água. [26]

A NFPA, *National Fire Protection Association*, dos Estados Unidos classifica a amônia como uma substância tóxica, sendo de alto risco para a saúde. No entanto, devido a sua reatividade, os riscos envolvendo acidentes com incêndios e explosões são bem menores quando comparado com outras substâncias, como gasolina e gás natural, por exemplo. [26]

O limite de exposição para os humanos à amônia, depende do tempo ao qual estarão expostos e também é característica da legislação de cada lugar. Esse limite varia entre 25 e 50 ppm (partes por milhão). Exposição a ambientes com concentrações acima de 300 ppm oferece consequências graves. A tabela a seguir apresenta algumas concentrações de amônia e os seus efeitos para o ser humano, de acordo com a NFPA. [26]

Tabela 3: Efeito da exposição à amônia ao ser humano
Fonte: Adaptado de [26]

Efeito ao ser humano da exposição à amônia	ppm
Odor detectável	20 - 50
Odor detectável, mas ainda sem nenhuma dano á saúde	50 - 100
Irritação severa dos olhos, ouvidos, ouvidos e garanta. Nenhum efeito permanente para um curto tempo de exposição	400 - 700
Perigoso. Uma exposição de até meia hora pode ser fatal	2000 - 3000
Rapidamente fatal. Gera edemas e morte por asfixia	5000 - 10000

Segundo a Agência de Proteção á Saúde, da Inglaterra, a amônia apresenta as características a seguir: [26]

- 1 - A amônia anidra não é inflamável. O vapor de amônia acima de determinadas concentrações é inflamável e pode explodir, na presença de uma fonte de ignição.
- 2 - Quimicamente estável em condições ambientes de temperatura e pressão.
- 3 - Emite vapores venenosos quando aquecida.
- 4 - Seu manuseio exige o uso de equipamentos de proteção.

3.2 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga

O desenvolvimento dos aços de alta resistência mudou bastante desde o início do século passado. Esses aços eram baseados apenas no critério de alta resistência, não se consideravam os níveis de soldabilidade e tensão de escoamento. Porém, a substituição das linhas rebatadas por linhas soldadas, chamou atenção para o problema de fratura frágil, que acontecia principalmente pelo elevado nível de carbono dos aços utilizados até então, o que impossibilita bons níveis de soldabilidade. Isso fez com que a indústria começasse a desenvolver os aços ARBL, que não atenderiam apenas ao critério de resistência mecânica elevada, mas também a tenacidade e soldabilidade. Isso foi alcançado mudando tanto a composição química dos aços, como as rotas termomecânicas de processamento que eram utilizadas para obtenção dos dutos. Os aços ARBL são aços de baixo carbono com a presença de elementos microligantes, como o nióbio e o vanádio, por exemplo, que são elementos que, se adicionados em teores muito baixos nos aços (de 0,01% a 0,10%) podem elevar suas propriedades. Esses teores baixíssimos têm de ser respeitados pois esses elementos apresentam baixa solubilidade no aço e, se forem adicionados numa quantidade além da possível, geram carbonetos e nitretos, prejudiciais às propriedades dos aços. Os processos de laminação passaram, também, a ser utilizados não apenas como meios de redução da espessura dos aços, mas, ao serem realizados em temperaturas controladas, transformaram-se em tratamentos termomecânicos, que contribuem para as propriedades finais desejadas. Hoje em dia, os aços ARBL atingem níveis de resistência de até 690 MPa. [27]

Os aços ARBL podem ter diversas composições químicas. Os teores de carbono estão

entre 0,05% e 0,12%, a fim de não se prejudicar a soldabilidade, e os teores de manganês encontram-se até 2,0%. Os microligantes são empregados em várias combinações distintas. Os aços ARBL utilizados em dutos podem ser divididos em três tipos principais: [27]

1 - Aços microligados ferríticos-perlíticos

São os que contém elementos formadores de carbeto e carbonitretos, como o nióbio e o vanádio.

2 - Aços ferríticos, bainíticos de baixo carbono, ou de ferrita acicular

Possuem o teor de carbono abaixo dos 0,05% e alta tensão de escoamento, soldabilidade e boa tenacidade.

3 - Aços multifásicos

Possuem matriz ferrítica, com regiões martensíticas, bainíticas e possuem carbonetos precipitados, o que gera alta resistência e tenacidade considerável.

3.2.1 Aços API 5L

A principal norma de especificação dos aços ARBL para aplicação em dutos é a norma API 5L (*Specification for Line Pipe*), do Instituto Americano do Petróleo (API).

A API 5L trata de tubos com costura (costura é como é conhecida a solda longitudinal dos dutos) e sem costura (alguns processos de fabricação de dutos não geram soldas). A norma versa sobre dois níveis de especificação para os aços (*Product Specification Levels*), PSL1 e PSL2. No primeiro nível, apenas limites mínimos são especificados, no segundo, são especificados limites mínimos e máximos de tensão de escoamento e de limite de resistência. [27]

A tabela a seguir, apresenta alguns graus dos aços da classe API 5L.

Tabela 4: Alguns aços da classe API 5L com seus limites de resistência medidos em kpsi
Fonte: Adaptado de Engenharia de Dutos [27]

API	Resistência mínima especificada [PSL 1 e PSL 2]		Resistência máxima especificada [PSL 2]	
	Escoamento (kpsi)	Tração (kpsi)	Escoamento (kpsi)	Tração (kpsi)
A25	25	45	-	-
A25	25	48	-	-
B	35	60	65	110
X42	42	60	72	110
X46	46	63	76	110
X52	52	66	77	110
X56	56	71	79	110
X60	60	75	82	110
X65	65	77	87	110
X70	70	82	90	110
X80	80	90	100	120

3.2.2 Corrosão pela Amônia dos Aços API 5L

Os aços, de maneira geral, seriam compatíveis com um ambiente que contenha amônia anidra. O único problema é que o fluido pode causar severos danos, incluindo aos da classe API 5L, através da corrosão sob tensão, CST, que é um tipo específico de corrosão que acontece pela combinação de três fatores: um material suscetível a CST, um meio que cause CST nesse material e níveis suficientes de tensão. [25, 28]

A tabela a seguir apresenta a compatibilidade de alguns materiais com a amônia anidra.

Tabela 5: Compatibilidade de alguns materiais com a amônia. A: Excelente, B: Boa, C: Razoável, D: Baixíssima, N/A: Informação não disponível. Fonte: Adaptado de Cole-Parmer [29]

ABS plastic	D	CPVC	A	Polycarbonate	D
Acetal (Delrin ®)	D	EPDM	A	PEEK	A
Aluminium	A	Epoxy	A	Polypropylene	A
Brass	D	Fluorocarbon (FKM)	D	Polyurethane	D
Bronze	D	Hastelloy-C ®	B	PPS (Ryton ®)	A
Buna N (Nitrile)	B	Hypalon ®	D	PTFE	A
Carbon graphite	A	Hytrel ®	D	PVC	A
Carbon Steel	B	Kalrez	A	PVDF (Kynar ®)	A
Carpenter 20	A	Kel-F ®	A	Silicone	C
Cast iron	A	LDPE	B	Stainless Steel 304	A
Ceramic Al2O3	N/A	Natural Rubber	D	Stainless Steel 316	A
Ceramic magnet	N/A	Neoprene	A	Titanium	C
ChemRaz (FFKM)	B	NORYL ®	B	Tygon ®	A
Copper	D	Nylon	A	Viton ®	D

CST é considerada como sendo a principal causa das falhas mecânicas nos metais. É uma falha considerada catastrófica pelo fato de geralmente ser difícil de detectar os danos na superfície do material causados por CST. Ela age, gerando e propagando trincas na superfície do material, de forma intergranular ou transgranular. Quando elas atingem o seu tamanho crítico, a propagação se dá de forma muito rápida, de modo a gerar a falha catastrófica do componente, que no caso de dutos, pode ser, por exemplo, uma fissura que provoque vazamento do fluido. Em relação aos aços, quanto maior a sua dureza e resistência, mais suscetíveis estão a CST. [28, 30]

Na figura a seguir, é possível observar uma dessas fissuras em um duto de escoamento de amônia líquida.



Figura 22: Vazamento em um duto de transporte de amônia líquida
Fonte: [28]

As tensões necessárias para que os aços sofram CST em meio de amônia são tensões altas, acima do limite de escoamento. Porém a presença de oxigênio pode fazer com que tensões muito mais baixas, que podem ser de trabalho ou mesmo tensões residuais, causem CST. As tincas se originam geralmente em regiões com maior tensão residual, como as regiões termicamente afetadas pelas soldas, por exemplo. Para que esse nível de tensão residual seja diminuído, é necessário que, tanto nos processos de fabricação dos dutos, como nas instalações em campo, sejam realizados tratamentos térmicos de alívio de tensões, TTAT. Durante o processo de fabricação, esses tratamentos térmicos são realizados durante a etapa de laminação dos dutos, que é realizada em temperaturas controladas, a fim de garantir o efeito desejado nas propriedades dos materiais. Na instalação, onde são realizadas soldas circunferenciais para união dos tubos, os tratamentos térmicos são realizados em campo. [27, 28]



Figura 23: Soldagem circunferencial de um duto.
Fonte: esab [31]

A adição de, pelo menos, 0,2% de água na amônia anidra, é suficiente para transformar a mistura num meio não danoso aos aços. Isso é prática difundida nos Estados Unidos, o país com maior número de dutos que transportam amônia na fase líquida. Sendo assim, o transporte dessa mistura, amônia e água, não apresenta risco de comprometer a integridade dos dutos, via CST, o que poderia acontecer caso o transporte se desse pela amônia anidra. [25, 28, 30]

3.3 Revisão de Mecânica dos Fluidos

3.3.1 Conserva o de Energia

Aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica (Equa o da Energia) a um volume de controle, com as devidas hipóteses, pode-se reduzir a equa o da seguinte maneira: [27, 32]

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eixo} - \dot{W}_{cisalhamento} - \dot{W}_{outros} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho dV + \int_{SC} (e + pv) \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (4)$$

$$e = \hat{u} + \frac{V^2}{2} + gz \quad (5)$$

Hipóteses:

- 1 - $\dot{W}_{cisalhamento} = 0$
- 2 - Escoamento Permanente e plenamente desenvolvido
- 3 - Escoamento incompressível
- 4 - Energia interna e pressão uniformes através das seções 1 e 2.

De posse das hipóteses, equa o se reduz a:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{eixo} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m}\left(\frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho}\right) + \dot{m}g(z_2 - z_1) + \int_{A_2} \frac{V_2^2}{2} \rho V_2 dA_2 - \int_{A_1} \frac{V_1^2}{2} \rho V_1 dA_1 \quad (6)$$

Para se eliminar a necessidade das integrais,   necessário se trabalhar com a velocidade média. Para isso, é necessário se introduzir um coeficiente chamado de Coeficiente de Energia Cinética, α , que é definido como:

$$\alpha = \frac{\int_A \rho V^3 dA}{\dot{m} \bar{V}^2} \quad (7)$$

O coeficiente α pode ser entendido como um fator de correção que permite usar a velocidade média na equação da energia ao invés de usar a velocidade em cada ponto. Uma boa notícia é que para escoamentos em dutos, pode-se aproximar o valor de α como sendo igual a um. Usando a definição de α e dividindo a equação da energia na forma simplificada pela vazão mássica, se obtêm:

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2\right) = (u_2 - u_1) - \frac{\partial Q}{dm} \quad (8)$$

O termo $\left(\frac{P}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz\right)$ representa a energia mecânica por unidade de massa em uma seção transversal. Já o termo $(u_2 - u_1) - \frac{\partial Q}{dm}$ representa o decréscimo da energia mecânica entre os pontos 1 e 2, tanto em energia térmica como em perda por transferência de calor. Esses dois termos representam a perda total de energia por unidade de massa h_{l_T} . Logo:

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2\right) = h_{l_T} \quad (9)$$

Pode-se introduzir o termo $\dot{W}_s/\dot{m} = \Delta h_{bomba}$ na equação a fim de se considerar um escoamento em que há atuação de uma bomba ou um compressor, por exemplo. Se a bomba ou compressor, estiver instalado no início do trecho, a sua atuação no sistema pode ser analisada junto com p_1 . A equação fica representada por:

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2\right) = h_{l_T} + \Delta h_{bomba} \quad (10)$$

A equação da energia escrita como a equação 14 é muito importante para a mecânica dos fluidos e permite calcular diferença de pressão, entre duas seções de uma tubulação, desde que a perda de carga, h_{l_T} , seja conhecida. O termo Δh_{bomba} é conhecimento como altura de carga da bomba e representa a energia, por unidade de massa que a bomba produz.

A perda de carga é dividida entre perda de carga distribuída, h_l , e perdas localizadas, h_{l_m} , de modo que $h_{l_T} = h_l + h_{l_m}$.

As perdas localizadas acontecem nas mudanças abruptas de geometria da linha na qual o fluido está escoando, como joelhos, entrada da tubulação, reduções de diâmetro e etc.. Cada "acidente" desse na tubulação converte de maneira irreversível, parte da energia mecânica do sistema em energia térmica.

A perda distribuída acontece em toda a linha. É devida à interação do fluido, viscoso, com a superfície sobre a qual acontece o escoamento. A equação da perda de carga, que

é deduzida em [32], é escrita da seguinte forma:

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad [m^2/s^2] \quad (11)$$

O coeficiente f , é um número adimensional, chamado de Fator de Atrito de Darcy e é um parâmetro calculado experimentalmente. Nos escoamentos laminares, $f = 64/Re$. [27, 32]

Nos escoamentos sob regime turbulento, o fator de atrito não depende apenas do número de Reynolds, Re , mas também da rugosidade, ϵ , e do diâmetro, no caso dos escoamentos em dutos. Além disso, f , nestes casos não pode ser calculado analiticamente, e é conseguido por meio de resultados experimentais. [27, 32]

O diagrama de *Moody* apresenta vários fatores de atrito, calculados experimentalmente, para dados números de Reynolds e rugosidades relativas, ϵ/D .

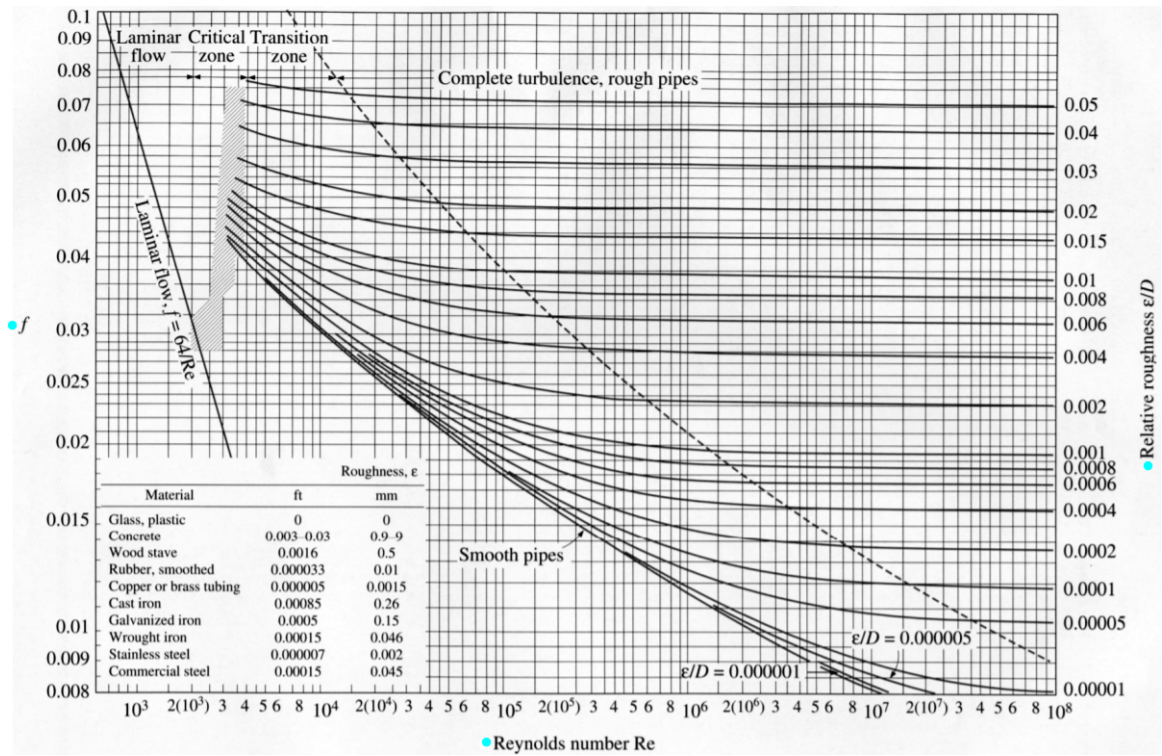


Figura 24: Diagrama de Moody. Fonte:[33]

A seguir é possível observar algumas equações que aproximam o cálculo do fator de atrito f : [27, 32]

$$\text{Colebrook :} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log\left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (12)$$

$$\text{Prandtl :} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -0,80 + 0,869 \ln(Re\sqrt{f}) \quad (13)$$

$$\text{Zagarola e Smits :} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -0,3577 + 0,820 \ln(Re\sqrt{f}) \quad (14)$$

$$\text{Blasius :} \quad f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (15)$$

3.3.2 Linha de Energia

Se a equação da energia, 14, for dividida pela aceleração da gravidade, g , os quatro termos da equação passam a ter dimensão de comprimento. Dessa forma, os termos passam a representar alturas nos gráficos. [27, 32]

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2\right) = H_{l_T} + H_{bomba} \quad (16)$$

Onde os termos H_{bomba} e H_{l_T} representam, respectivamente, a altura correspondente ao trabalho realizado sobre o fluido, ou o *head* da bomba, e a perda de altura devido ao atrito viscoso e as perdas localizadas entre as seções 1 e 2. [27, 32]

A linha de energia, h_0 , representa a altura da energia total, $h_0 = z + p/\rho g + V^2/2$. Nos escoamentos que são aproximados como sendo não viscosos, h_0 se mantém constante ao longo de todo o escoamento. Nos escoamentos em que as perdas por atrito viscoso são consideradas, h_0 terá um aspecto decrescente, com uma taxa próxima de uma constante, e nas regiões de perdas localizadas h_0 apresentará quedas abruptas nos gráficos. h_0 só apresentará regiões de crescimento ao longo do escoamento, se a linha contiver bombas, tomando como base um escoamento de um líquido, ao longo do trecho, ou seja, se energia for adicionada ao sistema. [27, 32]

3.3.3 Número de Reynolds

O número de Reynolds tem como significado físico a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas. [27, 32]

É definido da seguinte maneira:

$$Re = \rho \frac{\bar{V}L}{\mu} \quad [adimensional] \quad (17)$$

Quanto maior o número de Reynolds, maior a importância das forças viscosas no escoamento.

Para escoamentos internos, devido ao significativo atrito entre o fluido e a superfície interna do duto, a viscosidade quase nunca pode ser desprezada, de modo que esses escoamentos são em quase sua totalidade, escoamentos viscosos. Para os escoamentos internos, o número de Reynolds pode ser calculado da seguinte maneira:

$$Re = \rho \frac{\bar{V}D}{\mu} \quad [adimensional] \quad (18)$$

Os escoamentos viscosos podem ser classificados como laminares ou turbulentos. Nos escoamentos internos, números de Reynolds abaixo de 2300, definem os escoamentos sob regime laminar e acima desse valor escoamentos sob regime turbulento. Nos escoamentos laminares, as partículas de fluido se movem em camadas lisas, sem interação com a vizinhança. Os escoamentos turbulentos são aqueles nos quais há uma constante mistura nas partículas de fluido. A turbulência, geralmente é um fenômeno indesejado pois cria uma maior resistência ao escoamento.

3.3.4 Região de Entrada

Nos escoamentos incompressíveis, a conservação de massa exige que, à medida que a velocidade na proximidade da parede é reduzida, a velocidade na região central deve ser incrementada. [27, 32]

A região de entrada de um escoamento interno é definida como sendo a região na qual o escoamento não é totalmente desenvolvido ainda. É a região na qual as camadas limites ainda não se encontraram. Nessa região o perfil de velocidades ainda não é constante, como acontece na parte plenamente desenvolvida do escoamento. [27, 32]

Experimentos mostram que em escoamentos turbulentos em dutos, a região de entrada pode se estender por um comprimento de até 80 vezes o diâmetro interno da tubulação, embora o mais comum seja esse comprimento ser de 40 vezes o diâmetro. [32]

4 Metodologia

4.1 Adequação da malha dos dutos

A fim de avaliar a possibilidade do escoamento da amônia nos oleodutos, é preciso simular um escoamento desse fluido, numa linha de duto existente. Será construído um programa que seja capaz de calcular o perfil de pressão ao longo da linha a partir da aplicação da equação de energia.

A análise foi feita com base em uma representação simplificada de um trecho de oleoduto do Brasil. A linha analisada, fabricada do aço API 5L X46, possui extensão de 99km, diâmetro nominal de 10 polegadas e transporta derivados de petróleo, como óleo diesel e gasolina.

O perfil de elevação e pressão recebido é um perfil discretizado em 41 pontos. Obteve-se também a pressão máxima admissível de operação, PMOA, da linha e o *Head* do escoamento de gasolina a 25°C e 190 m³/h. O trecho estudado é uma representação cedida pelo SIMDUT.

O objetivo do programa será gerar o perfil de pressão ao longo da linha. Isso será feito com o emprego da equação de energia (14) ao longo de cada par de pontos consecutivos do perfil de elevação, primeiro para validação do programa, que será feita com a simulação do escoamento de gasolina e posteriormente com a simulação do escoamento da amônia.

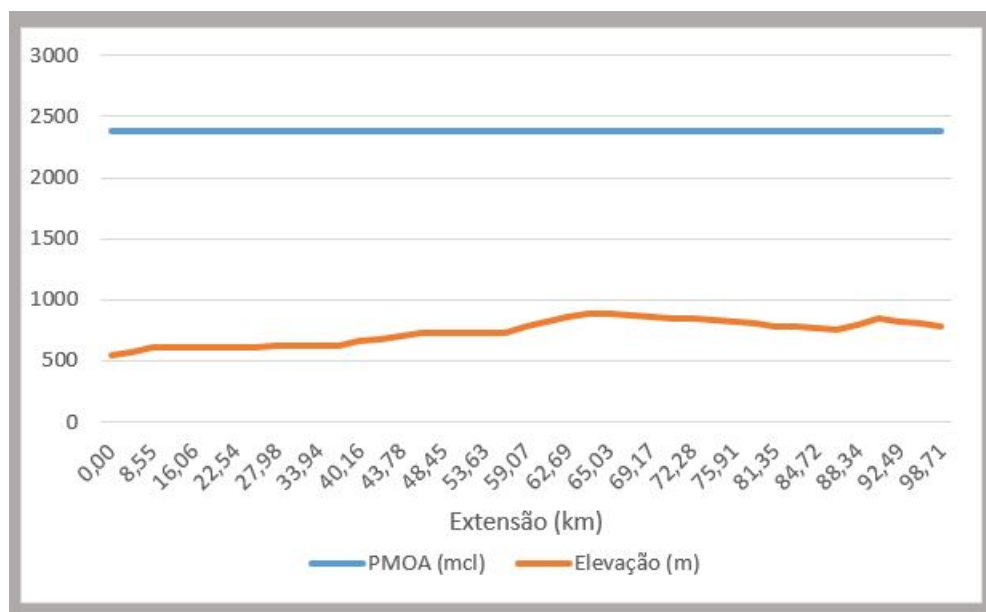


Figura 25: Perfil de Elevação do oleoduto, em metros, e PMOA, medido em metros de coluna de líquido

Como se observa na figura anterior, a região na qual se encontra o duto não é plana, de modo que há trechos em auge e em declive. No início da linha, a altitude se encontra

em torno de 590 metros e no quilômetro final por volta de 790 metros, atingindo regiões de altitudes ainda maiores no meio do percurso.

O trecho escolhido é munido de apenas uma bomba, instalada na entrada da linha. O perfil de potência da bomba, bem como seu *head* são conhecidos, para um escoamento de gasolina.

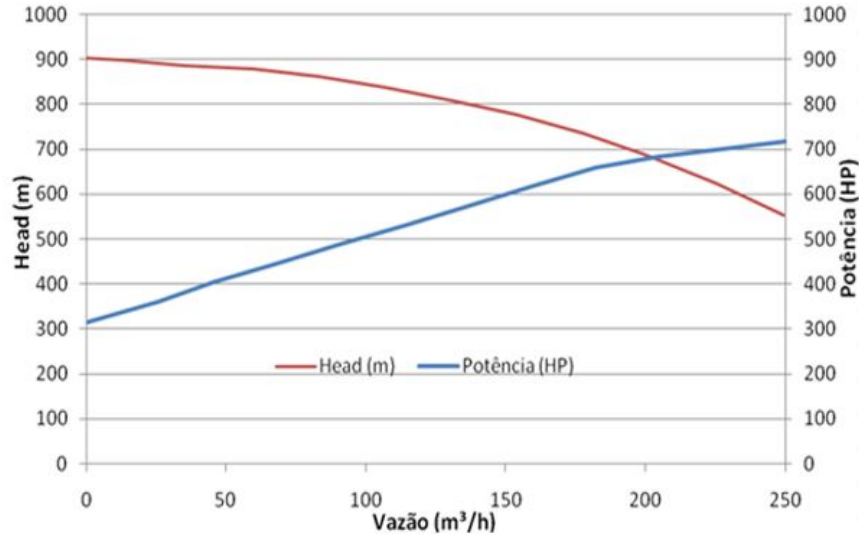


Figura 26: Potência e *head* da bomba, em função da vazão volumétrica de gasolina.

De posse dessas informações, é necessário implementar uma simulação em algum software com intuito de investigar se é possível escoar a amônia no oleoduto em questão. O programa escolhido para se fazer a simulação foi o *Microsoft Excel* além da linguagem VBA, utilizada no próprio *Excel*.

As aproximações dos fatores de atrito disponíveis para a simulação, podem ser observados a seguir: [27, 32]

$$\text{Colebrook :} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log\left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (19)$$

$$\text{Prandtl :} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -0,80 + 0,869 \ln(Re\sqrt{f}) \quad (20)$$

$$\text{Zagarola e Smits :} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -0,3577 + 0,820 \ln(Re\sqrt{f}) \quad (21)$$

$$\text{Blasius :} \quad f = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (22)$$

Com intuito de ser mais conservador, sempre que o fator de atrito for utilizado em alguma conta, será utilizado, dentre os fatores acima, o que tiver o maior valor.

4.1.1 Hipóteses e considerações

Hipóteses simplificadoras são cruciais nos problemas de engenharia, possibilitando que os problemas sejam simplificados na medida do necessário. A seguir são listadas as hipóteses e considerações sobre o escoamento para realização deste trabalho.

1 - Escoamento Monofásico e com a Linha Cheia.

Essa hipótese afirma que o líquido escoar no duto de maneira a não deixar espaço vazio para que haja, também fluxo de ar, como acontece nos dutos de esgoto, por exemplo.

2 - Escoamento Plenamente Desenvolvido.

Esta hipótese desconsidera a existência da região de entrada. Apesar desta existir, varia de até 80 vezes o valor do diâmetro. Esse comprimento pode ser desprezado para o fim deste trabalho e seus efeitos podem ser desprezíveis, principalmente, dado à sua extensão em relação ao comprimento do duto.

3 - Escoamento em Regime Permanente.

Considera que as características do escoamento em cada seção da tubulação é constante. Essa hipótese é possível pelo fato do escoamento estar plenamente desenvolvido.

4 - Escoamento Incompressível.

A vazão mássica não varia ao longo do escoamento. Como a densidade dos líquidos varia pouco com a pressão e temperatura, essa é uma hipótese plausível.

5 - Escoamento Isotérmico.

6 - Viscosidade invariante com a pressão.

7 - Pressão na entrada da bomba igual a pressão atmosférica ao nível do mar, 101,325 KPa. Apesar da pressão atmosférica variar com a altitude, essa variação é bem baixa para os valores de altitude do perfil de elevação.

4.1.2 Validação do Programa (Escoamento de Gasolina)

Antes de utilizar o programa implementado para simular o escoamento da Amônia, é preciso validar o código com o escoamento da gasolina, que foi o fluido utilizado na obtenção dos dados recebidos.

O objetivo desta etapa será comparar o *head* gerado pela simulação do escoamento com o *head* recebido. Caso o erro seja pequeno, temos uma comprovação de que o programa criado atendeu as expectativas.

A vazão volumétrica utilizada na plotagem do gráfico de perfil de potência da bomba, foi a vazão volumétrica de gasolina. Como o objetivo é que o programa valha para gasolina e pra amônia, é preciso que seja feita uma adaptação nos dados para gerar outro gráfico. Como as bombas mantêm uma vazão mássica constante, é preciso que a vazão volumétrica seja multiplicada pela densidade da gasolina a fim de que o novo perfil de *head da bomba* possa ser utilizado para qualquer escoamento de líquido.

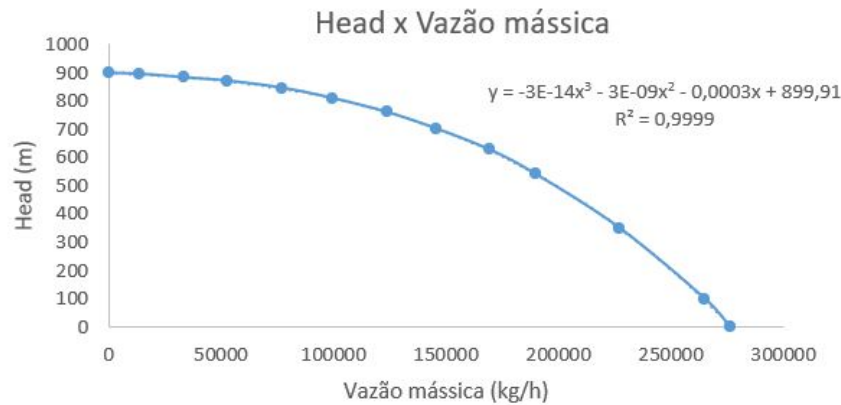


Figura 27: *Head* da bomba em função da vazão mássica de fluido

$$head = -3.10^{-14}\dot{m}^3 - 3.10^{-9}\dot{m}^2 - 0,0003\dot{m} + 899,91 \quad [mcl] \quad (23)$$

De posse dessa função, pode-se calcular a pressão na saída da bomba. O *Head*, multiplicado pela densidade do fluido e pela aceleração da gravidade, representa o diferencial de pressão. Somando esse valor com a pressão atmosférica, pode-se obter a pressão de saída na bomba $P1$.

$$P1 = head.\rho.g + P_{atm} \quad [Pa] \quad (24)$$

É preciso ser feito o mesmo procedimento para a potência do bomba. Ou seja, é preciso que se tenha um gráfico, e consequentemente uma função, que devolva a potência da bomba, dada uma vazão mássica e não uma vazão volumétrica.

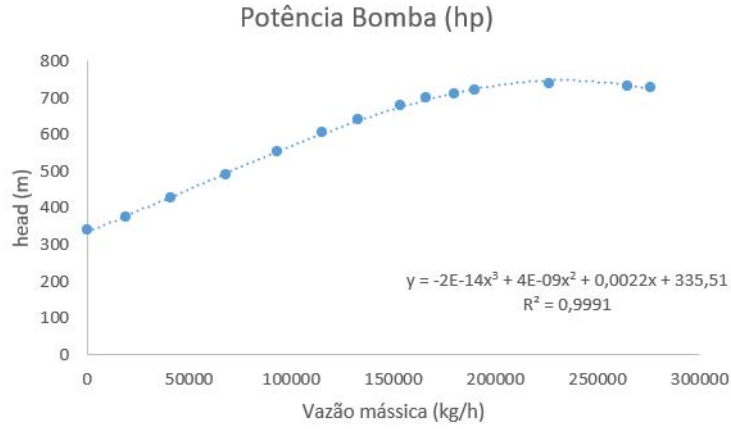


Figura 28: Potência da bomba em função da vazão mássica de fluido

$$Pot = -2.10^{-14}\dot{m}^3 + 4.10^{-9}\dot{m}^2 + 0,0022\dot{m} + 335,51 \quad [hp] \quad (25)$$

É necessário utilizar a densidade e a viscosidade da gasolina de forma analítica, para generalizar a análise. Deve-se escolher aproximações para essas duas propriedades.

A seguir, pode ser observada a aproximação da massa específica, ρ_{gasol} , e da viscosidade dinâmica, μ_{gasol} , usadas para o escoamento de gasolina. [34]

$$\rho_{gasol} = 842,8.e^{-0,0003653.T} \quad [kg/m^3] \quad (26)$$

$$\mu_{gasol} = 2,785.10^{-3}.e^{-0,005277.T} \quad [kg/m.s] \quad (27)$$

na qual T sendo a temperatura absoluta na qual se encontra o fluido.

4.1.3 Simulação do escoamento de Amônia

Após a validação do programa, é possível simular o escoamento da Amônia. O fato da amônia ser um fluido gasoso à temperatura e pressão ambiente é um fator a mais de preocupação. Há que se garantir que, ao longo do escoamento, a amônia esteja na fase líquida. Para que isso seja garantido, é necessário que a pressão, em cada um dos 41 pontos, seja, maior que a pressão de saturação da Amônia.

O programa a ser desenvolvido, será capaz de simular o escoamento para quaisquer temperatura e vazão volumétrica desejadas. A simulação será realizada para algumas temperaturas e vazões volumétricas.

Nessa etapa, novamente, as propriedades como massa específica, ρ_a , e viscosidade dinâmica, μ_a , têm de ser introduzidas de maneira analítica. [35]

$$\rho_a = 17,031 \cdot \frac{3,5383}{0,25443^{(1+(1-\frac{T}{405,65})^{0,2888})}} \quad [kg/m^3] \quad (28)$$

$$\mu_a = e^{T + \frac{598,3}{T} - \ln T - (-3,69 \cdot 10^{-27} T)^{10}} \quad [kg/m.s] \quad (29)$$

onde T é a temperatura absoluta na qual se encontra o fluido.

A pressão de saturação da amônia foi obtida através de um conjunto de dados experimentais do site do NIST [38]. Com esses dados, é necessário se traçar um gráfico e traçar uma função que aproxime esses pontos de maneira satisfatória.

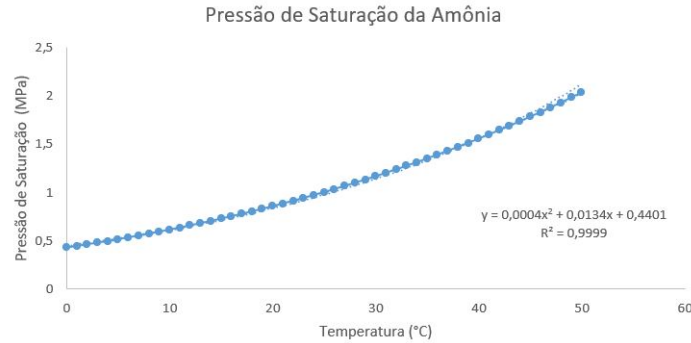


Figura 29: Pressão de saturação amônia em função da temperatura

$$P_{amo} = 0,0004.T^2 + 0,0134.T + 0,4401 \quad [MPa] \quad (30)$$

Com a temperatura, T, da amônia sendo medida em graus Celcius.

Além da simulação do escoamento da amônia anidra, será realizada, também, a simulação do escoamento da mistura amônia e água, para algumas frações volumétricas de água na mistura.

Para isso, há que se calcular tanto a massa específica da mistura, ρ_{mis} , como a sua viscosidade dinâmica, μ_{mis} .

O ρ_{mis} pode ser calculado facilmente pela lei da mistura, que pode ser observada abaixo, já para o caso estudado. [39]

$$\rho_{mis} = \rho_a f_a + \rho_{ag} f_{ag} \quad [kg/m^3] \quad (31)$$

Onde ρ_a e ρ_{ag} representam, respectivamente a masa específica da amônia e da água e f_a e f_{ag} representam respectivamente, a fração volumétrica de amônia e de água na mistura.

A viscosidade cinemática da mistura, η_{mis} , não pode ser calculada como foi calculada a massa específica. Para isso, será utilizada a equação proposta por Gruenberg-Nissan, que pode ser observada a seguir, já aplicada ao caso específico: [36]

$$\ln \eta_{mis} = f_a \ln \eta_a + f_{ag} \ln \eta_{ag} + f_a f_{ag} G_{a-ag} \quad (32)$$

onde G_{a-ag} é um termo que representa o grau de interação entre as duas substâncias e pode ser calculado da seguinte forma, para uma mistura amônia água: [37]

$$G_{a-ag} = 0,00011235T^2 - 0,093324T + 21,459 \quad (33)$$

onde T é a temperatura absoluta na qqual se encontra a mistura.

De posse da viscosidade cinemática da mistura, basta multiplicá-la pela massa específica da mistura para se obter a viscosidade dinâmica, μ_{mis} .

$$\mu_{mis} = \eta_{mis} \rho_{mis} \quad [kg/m.s] \quad (34)$$

Para os cálculos, ρ_{ag} e μ_{ag} serão calculados de maneira numérica com equações geradas no *Excel*, que aproximam os dados da tabela presente no apêndice A do livro do Fox. [32]

A seguir, é possível observar os dois gráficos usados para gerar aproximações para a densidade, ρ_{ag} e para viscosidade dinâmica da água, μ_{ag} .

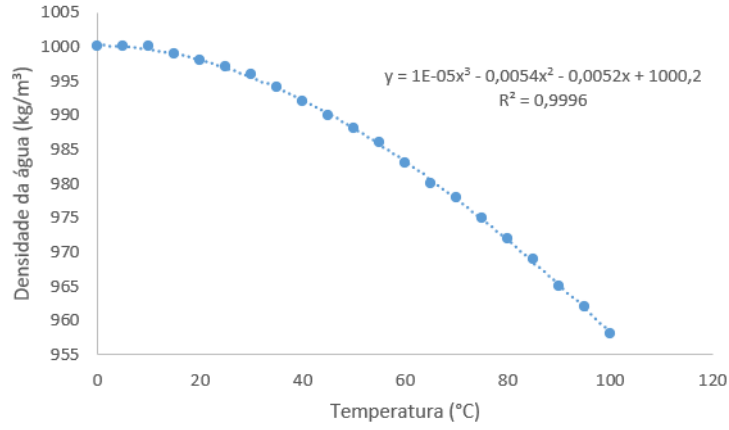


Figura 30: Densidade da água em kg/m^3 em função da temperatura em $^{\circ}\text{C}$. Fonte: Adaptado de [32]

$$\rho_{ag} = 10^{-5}T^3 - 0,0054T^2 + 1000,2 \quad (35)$$

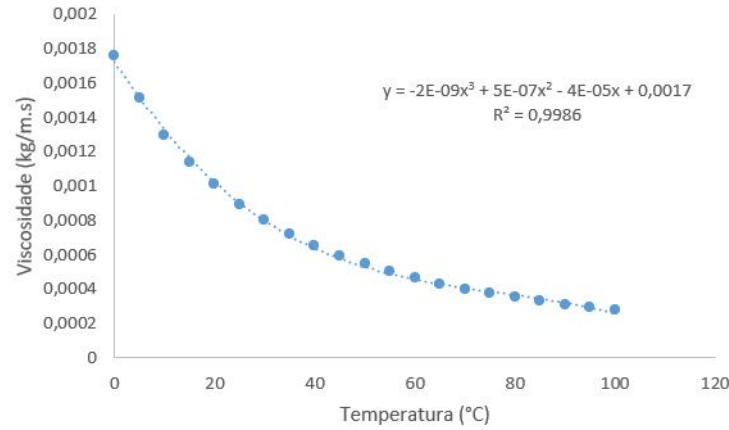


Figura 31: Viscosidade dinâmica da água em função da temperatura em $^{\circ}\text{C}$. Fonte: Adaptado de [32]

$$\mu_{ag} = -2.10^{-9}T^3 + 5.10^{-7}T^2 - 4.10^{-5}T + 0,0017 \quad (36)$$

4.2 Avaliação do volume a ser Transportado

As características do fluido, da tubulação e da bomba, impõe as restrições para o volume de fluido a ser transportado. Como as bombas mantêm uma vazão mássica constante, conversões simples de vazão mássica para vazão volumétrica serão utilizadas para avaliação do volume a ser transportado.

Além disso, há que se levar em conta o grau de saturação do oleoduto em questão. Como essa informação não é conhecida, os cálculos serão apresentados para diferentes graus de saturação.

5 Resultados e discussões

5.1 Compatibilidade dos Materiais

Pode-se observar que os aços de que são feitos os oleodutos podem ser utilizados para o transporte de amônia. O problema da corrosão sob tensão pode estar presente se a amônia for escoada na forma anidra. Porém, caso o transporte seja realizado com uma solução de, pelo menos, 0,2% de água, CST não é considerado mais um fator de preocupação. Como será visto no próximo item, as características da linha permitiram que o escoamento se desse sob pressões acima da pressão de saturação da amônia, garantindo assim que o fluido permanecesse na fase líquida durante todo o escoamento. A adição de água e a permanência da amônia na fase líquida asseguram a condição propícia para o não aparecimento de CST.

5.2 Validação do Programa

A validação do programa foi feita de maneira satisfatória. Foi calculado o *head* para o escoamento de gasolina a 25°C e 190 m³/h e comparado com o *head* recebido. Foi calculado um erro relativo.

Tabela 6: Erro calculado para o escoamento de gasolina a 25°C e 190m³/h

km	head gasolina 25	simulador	Erro
0,223643	1204,88	1269,953838	●0,05
99,452200	863,441	821,2771862	●0,05

Como o erro foi de 5%, fica comprovada a possibilidade de se utilizar o programa para simular o escoamento de amônia.

A pressão de saída na bomba é o ponto de partida do escoamento. A seguir é possível observar a pressão na saída da bomba para algumas vazões e temperaturas.

Tabela 7: Pressão na saída da bomba, para um escoamento com Gasolina

Pressão na Saída da Bomba - Gasolina			
	P (kgf/cm ²) - 20°C	P (kgf/cm ²) - 25°C	P (kgf/cm ²) - 30°C
50 m ³ /h	67,855	67,736	67,618
100 m ³ /h	65,156	65,052	64,949
250 m ³ /h	41,324	41,372	41,419

É possível observar que a pressão de saída da bomba é inversamente proporcional tanto à temperatura como à vazão volumétrica. Além disso, observa-se que, de fato, pressões na saída da ordem de 100 kgf/cm^2 não são alcançadas nem em vazões mássicas e temperaturas mais baixas, comprovando, assim, a afirmação que foi feita de que o perfil se trata de uma aproximação teórica.

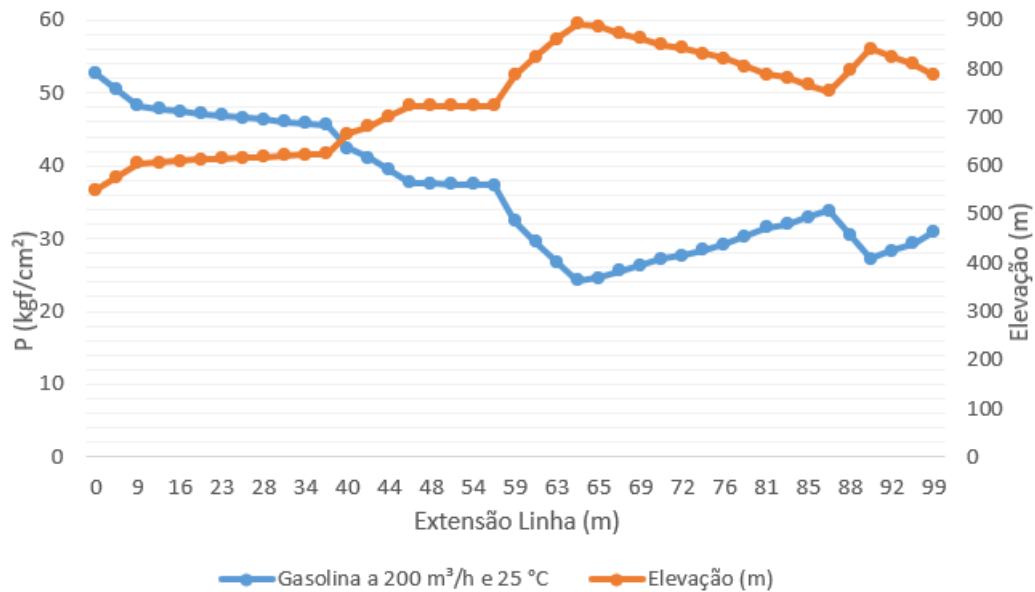


Figura 32: Perfil de pressão ao longo do escoamento de gasolina à $200 \text{ m}^3/\text{h}$ e 25°C

À 25°C com uma vazão volumétrica de $200 \text{ m}^3/\text{h}$, a pressão de saída na bomba é de $52,60 \text{ kgf/cm}^2$ e a pressão no quilômetro 99 é de $30,98 \text{ kgf/cm}^2$. Isso representa um decréscimo de 41,10%. Isso mostra, que mantendo-se todos os outros parâmetros constantes, quanto menor a velocidade média do escoamento (consequência do decréscimo da vazão), menores são as perdas ao longo do escoamento, como mostra a teoria (equação 15).

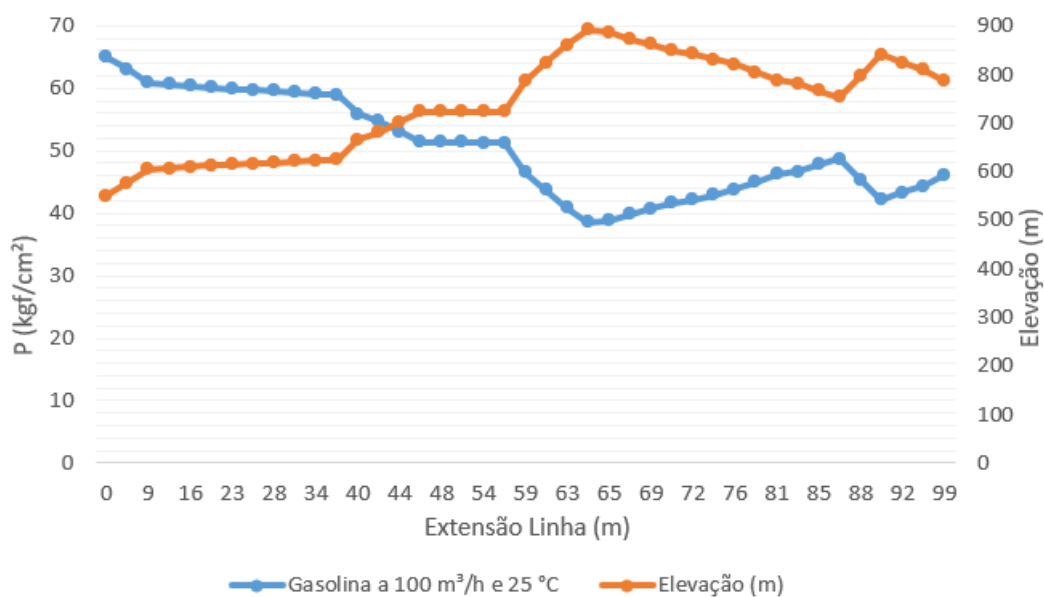


Figura 33: Perfil de pressão ao longo do escoamento de gasolina à 100 m³/h e 25°C

É possível notar que a curva azul é mais achatada, ou seja, há uma queda de pressão menor do que no escoamento com vazão volumétrica de 200 m³/h. Se a vazão for analisada em números ainda mais baixos, essa curva se torna mais achatada ainda, como é possível observar no gráfico a seguir, para uma vazão de 50 kgf/cm² de gasolina à 25°C. Neste caso, o decréscimo é de 26,79%.

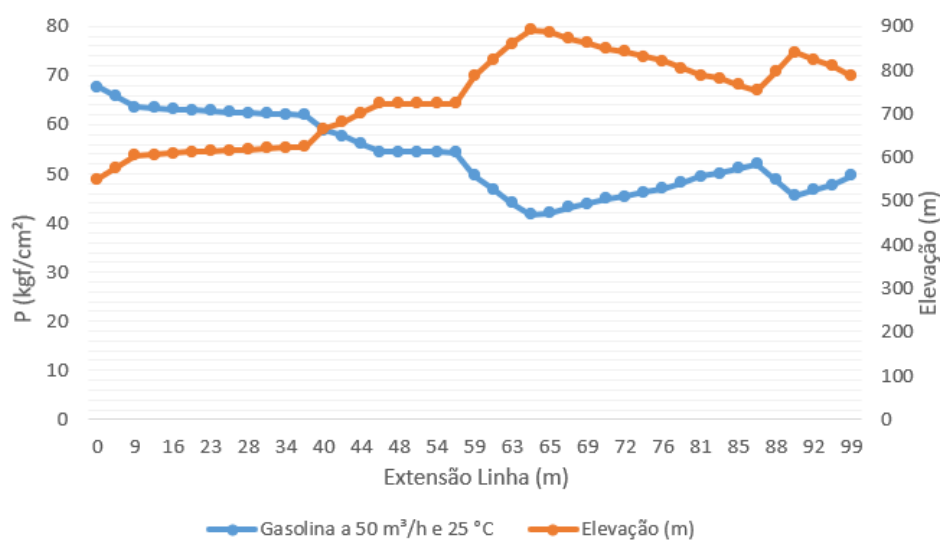


Figura 34: Perfil de pressão ao longo do escoamento de gasolina à 50 m³/h e 25°C

Obteve-se também as linhas de energia h_0 do escoamento a 25°C para diversas vazões volumétricas.

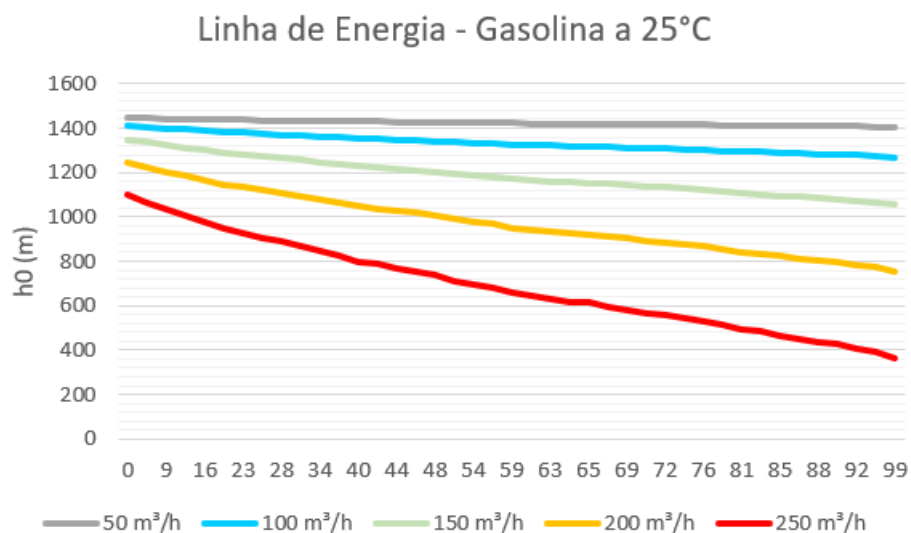


Figura 35: Linha de Energia do escoamento de gasolina para diferentes vazões volumétricas a 25°C

5.3 Simulação do Escoamento de Amônia

Com a validação do programa concluída, foi possível simular o escoamento da amônia anidra. Neste caso, observou-se também, a pressão de vapor da amônia, que deve ser menor que a pressão em cada ponto do duto, garantindo a presença apenas de líquido.

Pelo fato da densidade da amônia, para uma dada temperatura, ser levemente menor que a densidade da gasolina, a pressão na saída da bomba para um escoamento de amônia anidra foi levemente menor que a pressão calculada no escoamento de gasolina, para uma dada vazão volumétrica.

Tabela 8: Pressão na saída da bomba para o escoamento com amônia anidra

Pressão na Saída da Bomba - Amônia Anidra			
	P (kgf/cm ²) - 20°C	P (kgf/cm ²) - 25°C	P (kgf/cm ²) - 30°C
50 m ³ /h	55,091	54,441	53,778
100 m ³ /h	53,663	53,052	52,448
250 m ³ /h	42,376	42,238	42,079

Várias combinações de temperatura e vazão foram testadas de modo a se observar o comportamento do escoamento. Com as características do duto e do escoamento, conseguiu-se de maneira satisfatória manter a amônia na fase líquida para uma ampla faixa de combinações.

Na tabela a seguir, é possível observar algumas vazões volumétricas limite, para determinadas temperaturas. Isto é, vazão a partir da qual há formação de amônia na fase gasosa. Dado que a temperatura do escoamento, de maneira geral, não é uma variável controlada, sendo uma característica das condições nas quais a linha está instalada, o parâmetro que poderia ser variado fim de se adequar o escoamento, seria a vazão volumétrica, e por isso, na prática se houvesse formação de amônia na fase gasosa, diminuir a vazão volumétrica seria uma primeira alternativa para se contornar o problema.

Tabela 9: Vazão a partir da qual há formação de gás

Vazão limite de Amônia anidra			
	Q (m ³ /h)	Psat (MPa)	Pmín (Mpa)
20°C	310	0,868	3,17
25°C	305	1,025	3,14
30°C	298	1,202	3,11

O perfil de pressão pode ser observado a seguir. Ele é bastante similar ao perfil do escoamento de gasolina, com suas particularidades. Para uma mesma vazão volumétrica, por exemplo, o escoamento de amônia se dá a pressões menores que o escoamento de

gasolina. Isso deve-se ao fato de tanto a viscosidade dinâmica da amônia como sua massa específica ser menor que os da gasolina, dada uma mesma temperatura.

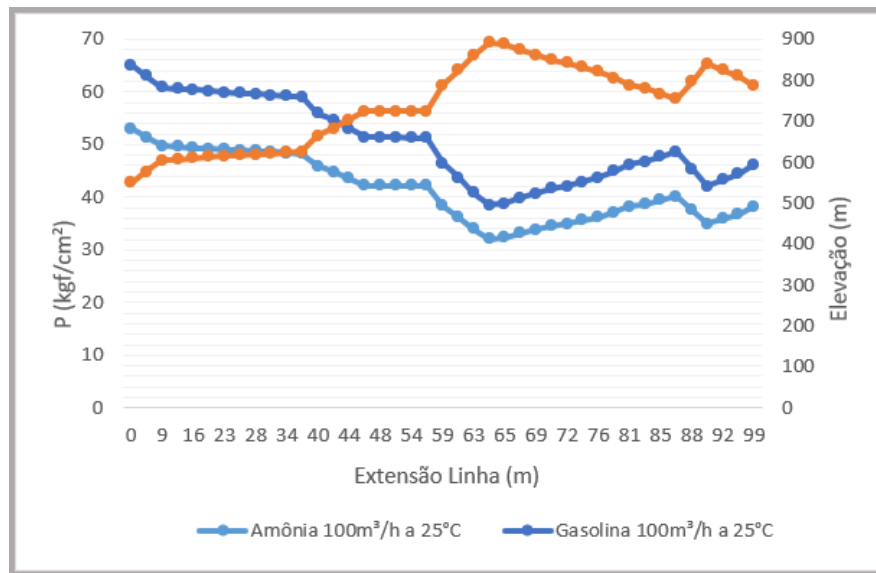


Figura 36: Perfil de pressão ao longo do escoamento de amônia anidra e gasolina

A tabela a seguir apresenta a variação percentual da pressão para dados valores de vazão volumétrica a 25°C, tanto do escoamento da gasolina como do escoamento da amônia anidra.

Tabela 10: Variação percentual da pressão entre início e fim da linha 25°C

Variação percentual da pressão - 25°C		
Q (m³/h)	Gasolina	Amônia Anidra
50	26,79%	26,44%
100	29,09%	28,05%
250	56,81%	42,20%

É bem interessante notar que o escoamento de amônia apresenta uma variação percentual da pressão entre a entrada e saída do duto sempre menor que o valor dessa variação no caso do escoamento de gasolina, para uma mesma vazão volumétrica. Isso significa que ao transportar o mesmo volume de ambos os fluidos, a pressão de saída no escoamento da

amônia é maior que a pressão da gasolina. Ou, em outras palavras, significa dizer que a amônia poderia ser escoada por um trecho maior do que a gasolina para uma dada pressão final. Ou, ainda, do ponto de vista do consumo energético, o escoamento de amônia, exige menos da bomba, como indica a tabela a seguir.

Tabela 11: Potência exigida da bomba para manter o escoamento a uma dada vazão volumétrica e à 25°C.

Q (m³/h)	Potência (hp)	
	Amônia	Gasolina
50	404,8	423,27
100	478,07	519,99
250	689,00	759,07

Isso acontece pelas características da amônia. A sua densidade e sua viscosidade, dada uma temperatura, são menores que as da gasolina, e, por isso, o escoamento de amônia exige menos da bomba.

Isso também pode ser observado pelo gráfico da linha de energia do escoamento de gasolina e de amônia. A inclinação das linhas de um escoamento de gasolina, para mesma vazão Q e temperatura, é levemente maior. Ou seja, há uma perda de carga maior no escoamento de gasolina se comparado ao escoamento de amônia. A figura a seguir apresenta a linha de energia, h_0 , para alguns valores de vazão volumétrica.

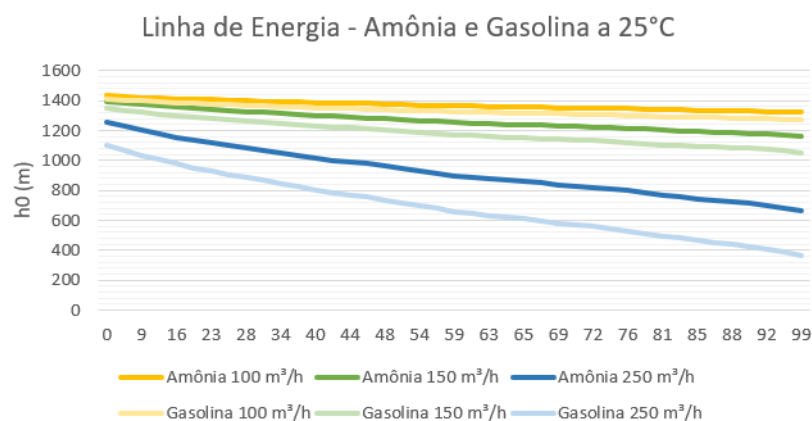


Figura 37: Linha de energia para diferentes vazões volumétricas para o escoamento de amônia e de gasolina a 25°C

A figura a seguir apresenta mais uma maneira da informação ser apresentada. Fica explícito na figura que para uma mesma potência entregue pela bomba, a vazão volumétrica de amônia é maior que vazão volumétrica de gasolina. Se a bomba entrega uma potência de 605 hp, por exemplo, ela mantém um escoamento de gasolina a 25°C a 152 m³/h enquanto que para um escoamento de amônia, na mesma temperatura, essa vazão é de quase 200m³/h.

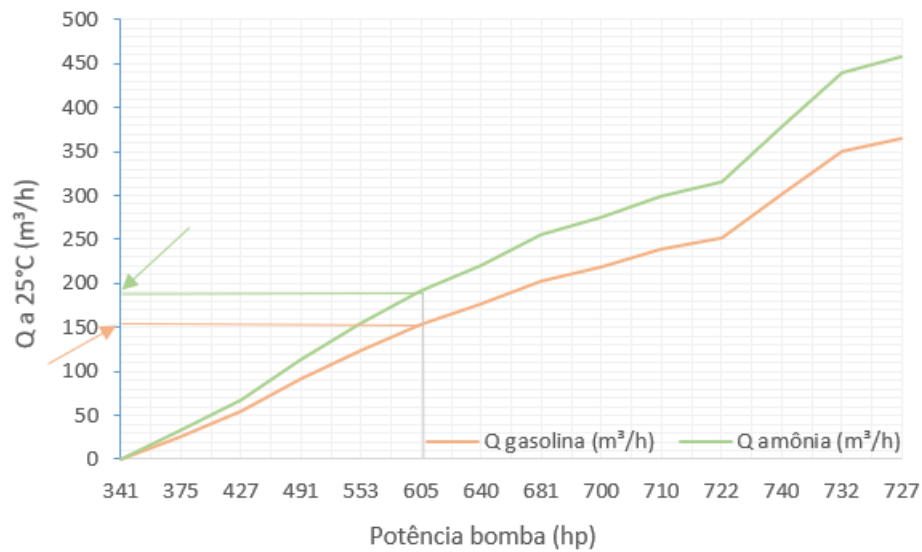


Figura 38: Potência empregada pela bomba no escoamento de amônia e de gasolina a 25°C

As simulações dos escoamentos da mistura amônia e água também foram realizadas de maneira satisfatória. Como a água é mais viscosa e mais densa que a amônia para uma dada temperatura, misturas dessas natureza, serão mais densas e viscosas que a amônia anidra e menos densas e viscosas que a água.

A figura a seguir apresenta o perfil de pressão para escoamentos de misturas de amônia e água. É possível observar que para misturas com baixa fração volumétrica de água, o perfil de pressão pouco varia. Quanto mais água é adicionada à mistura, mais se exige da bomba. Isso pode ser observado na pressão de saída da bomba (pressão no ponto 0 km), que cresce com o percentual de água na mistura.

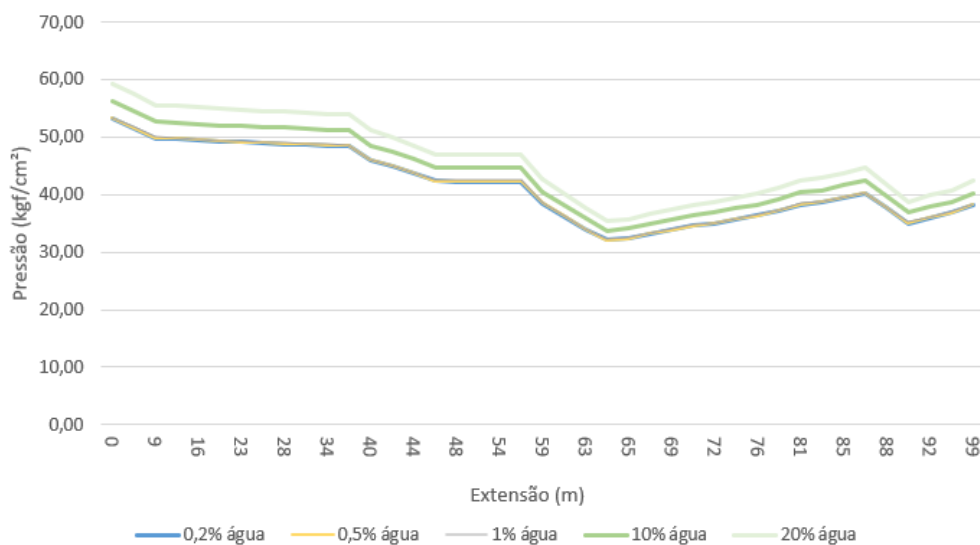


Figura 39: Perfil de pressão para o escoamento de uma mistura de e amônia água a $100 \text{ m}^3/\text{h}$ e 25°C para diferentes frações volumétricas de água.

A próxima figura apresenta a comparação do perfil de pressão do escoamento para o escoamento de amônia anidra e de uma mistura de 0,2% de água e o restante de amônia, a $100 \text{ m}^3/\text{h}$ e 25°C . Fica claro que para misturas com pouca água, a influência no escoamento é quase imperceptível.

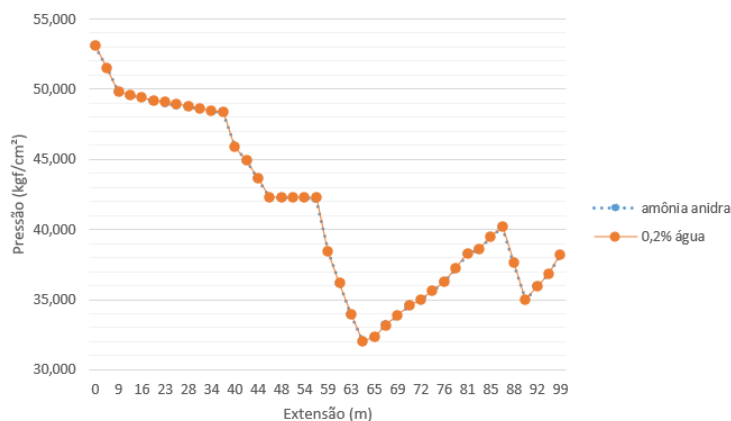


Figura 40: Perfil de pressão para o escoamento de amônia anidra e de uma mistura de e amônia água a $100 \text{ m}^3/\text{h}$ e 25°C .

O escoamento de uma mistura com baixo percentual de água, é bastante similar ao

escoamento da amônia anidra. O gráfico a seguir apresenta a linha de energia para 4 percentuais de água na mistura. É possível perceber que para misturas com baixos percentuais de água, a linha energia é praticamente similar à linha de energia do escoamento de amônia anidra, indicando a similaridade desses escoamentos com o escoamento de amônia anidra.

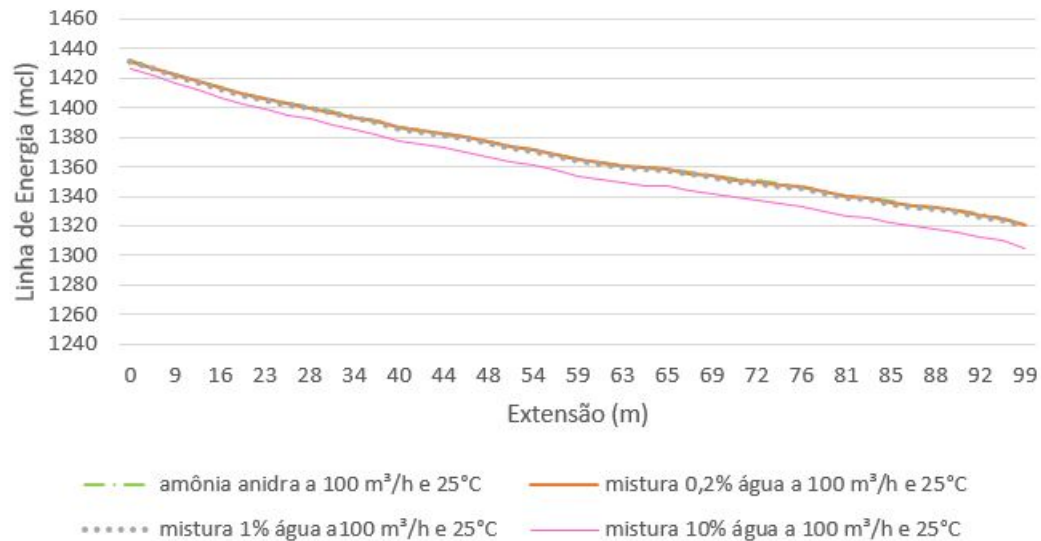


Figura 41: Linha de Energia para o escoamento de amônia anidra e de uma misturas de amônia e água a 100 m³/ h e 25°C .

Importante ressaltar que não foi calculada uma pressão de saturação da mistura, utilizou-se para avaliação do escoamento, a pressão de saturação da amônia anidra. Essa aproximação não gera um impacto negativo na simulação. Na verdade, a pressão de saturação da mistura seria um valor entre a pressão de saturação de saturação da amônia e a da água. Aproximar a pressão de saturação da mistura pela pressão da amônia anidra significa ser mais conservador.

5.3.1 Volume a Ser Transportado

A tabela a seguir apresenta uma estimativa do volume, em m^3 , de amônia anidra que poderia ser transportado por dia na linha estudada para algumas vazões volumétricas e diferentes níveis de saturação dos oleodutos. As estimativas foram feitas para um escoamento a 25°C . Por exemplo, se a linha analisada tiver uma ociosidade de 80% (que equivale a um grau de saturação de 20%), poderia ser transportado por dia 1920 m^3 de amônia, se esse escoamento se desse a 25°C .

Tabela 12: Estimativa do volume transportado de amônia anidra em m^3/dia

Q (m^3/h)	Grau Saturação Oleodutos			
	20%	30%	50%	80%
100	1.920	1.680	1.200	480
150	2.880	2.520	1.800	720
200	3.840	3.360	2.400	960

6 Conclusões

O estudo foi desenvolvido a fim de avaliar uma alternativa comercial para o uso do GN, reduzindo assim seu nível de queima e reinjeção, na medida em o gás seria absorvido pela indústria para fabricação de amônia. O uso da infra estrutura dutoviária já disponível, e apresentado ociosidade, foi avaliada a fim de escoar amônia ate uma possível indústria de fertilizantes, diminuindo, assim, a dependência externa desse insumo, que é crucial para a economia do país, fortemente agroexportadora.

Foi possível observar que escoar amônia em oleodutos algo viável. A amônia anidra poderia apresentar riscos aos aços API 5L, mas como visto, uma solução composta de amônia e, pelo menos, 0,2% de água poderia ser uma alternativa para que esse problema seja contornado. Além disso, foi visto que as características da linha estudada foram suficientes para manter a amônia anidra, e misturas de amônia e água, na fase líquida durante todo o escoamento, ponto crucial para que o escoamento fosse possível. Interessante notar também que o escoamento da amônia exige menos da bomba em termos energéticos do que o escoamento da gasolina.

A amônia escoada seria um produto da indústria de base nacional, que atenderia a indústria de fertilizantes, diminuindo, assim, a dependência externa desse insumo, que é crucial para a economia do país, fortemente agroexportadora. Além disso, uma alternativa comercial seria dada aos produtores de GN, reduzindo seu nível de queima e reinjeção, na medida em o gás seria absorvido pela indústria para fabricação de amônia. O problema da ociosidade dos oleodutos também seria mitigado, visto que estariam sendo utilizados pra escoar a amônia produzida.

Sendo assim, estudos nessa área têm muito potencial para contribuir para o desenvolvimento do Brasil, avaliando alternativas para se mitigar o desperdício de GN, com consequentes decréscimos da ociosidade dos dutos de óleo e incremento da oferta nacional de fertilizantes.

Dentro desse contexto, o simulador desenvolvido para realização desse trabalho, pode ser de imensa contribuição para avaliação desse tipo de escoamento. Além disso, com uso do simulador, pode-se avaliar o impacto que os diversos parâmetros têm sobre o escoamento. Isso porque ele está preparado para que a simulação seja feita para qualquer temperatura de escoamento, qualquer diâmetro de tubulação, qualquer rugosidade da superfície interna do duto, qualquer vazão volumétrica, além de permitir que seja o escoamento seja simulado para outro perfil de elevação e uma outra bomba, por exemplo.

Como sugestão para trabalhos futuros, poderia ser aconselhado os temas a seguir:

- 1 - Impacto do resíduo de amônia nos oleodutos sobre a utilização do óleo.
- 2 - Impacto do resíduo de óleo nos oleodutos sobre a utilização da amônia.
- 3 - Estudo sobre o impacto econômico da substituição de escoamento de óleo, nos dutos mais ociosos, por escoamento de amônia.

7 Referências Bibliográficas

- [1] THOMAS, José Eduardo (org.). **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001
- [2] APGA. **History of Natural Gas**. Disponível em: <https://www.apga.org/apgamainsite/aboutus/facts/history-of-natural-gas>. Acesso em: 22 jun. 1994
- [3] ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: ANP, 2020
- [4] (EPE), Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. Rio de Janeiro: Epe, 2019
- [5] IEA. **Gas**. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/gas>. Acesso em: 18 abr. 2020
- [6] ANP. **Estudo sobre o aproveitamento do gás natural do pré-sal**. Rio de Janeiro, 2020.
- [7] EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Webmap**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/webmap>. Acesso em: 05 dez. 2020
- [8] FEITOSA, Claudivan; ENÉAS, Joaquim; BARBOSA, Camila. **Nutrição Mineral de Plantas**. Disponível em: <http://www.fisiologiavegetal.ufc.br/>. Acesso em: 20 jan. 2021
- [9] MESSIAS, Arminda; SILVA, Davi; FREIRA, Fernando; LEMOS, Maria. **Fertilizantes**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/161219>.. Acesso em: 28 maio 2021
- [10] REETZ, Harold F. **Fertilizantes e seu Uso Eficiente**. São Paulo: Anda, 2017
- [11] HOPKINS, William G. **Introduction to Plant Physiology**. 2. ed. USA: John Wiley And Sons, 1999
- [12] CAMARGO, M s de. A Importância do uso de fertilizantes para o meio ambiente. **Pesquisa e Tecnologia**. São Paulo, p. 1-4. dez. 2012
- [13] MAY, Paul. **The Haber Process**. Disponível em: <http://www.chm.bris.ac.uk/paul-may/haber/haber.htm>.. Acesso em: 22 jun. 1994
- [14] BURRESON, J; COUTEUR, Lp. **Os Botões de Napoleão: as 17 moléculas que mudaram a história**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor Ltda, 2006
- [15] ERISMAN, Jan Willem et al. How a century of ammonia synthesis changed the world. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 10, p. 636-639, 2008.

- [16] RIBEIRO, Daniel. Processo de Haber-Bosch. **Revista de Ciência Elementar**, v. 1, n. 1, 2013
- [17] HEINZEL, Angelika; VOGEL, B.; HÜBNER, P. Reforming of natural gas—hydrogen generation for small scale stationary fuel cell systems. **Journal of Power Sources**, v. 105, n. 2, p. 202-207, 2002.
- [18] EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília: Embrapa, 2018
- [19] CONAB. **Trajetória da Agricultura Brasileira**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 22 jun. 2020
- [20] ANDA. **Pesquisa Setorial**. Disponível em: <https://anda.org.br/pesquisasetorial/>. Acesso em: 05 dez. 2020
- [21] IPEADATA. **Default**. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 28 maio 2020
- [22] PUC-RIO. **Estudo das tecnologias de transporte de gás natural**. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/13793/13793_3.PDF. Acesso em: 28 maio 2021.
- [23] EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **A Relevância da Infraestrutura Dutoviária para o Abastecimento de Derivados de Petróleo no Brasil**. Disponível em: www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents. Acesso em: 28 maio 2021
- [24] FGV. **Transporte de gás natural no Brasil**. Disponível em: [https://ceri.fgv.br/sites/default/files/publicacoes/2019-01/cartilha-transporte-de-gas-natural-no-brasil-aspectos-regulatorios-fgv-ceri-jun 2016.pdf](https://ceri.fgv.br/sites/default/files/publicacoes/2019-01/cartilha-transporte-de-gas-natural-no-brasil-aspectos-regulatorios-fgv-ceri-jun%202016.pdf). Acesso em: 22 jun. 2020
- [25] ELISHAV, Oren et al. Progress and prospective of nitrogen-based alternative fuels. **Chemical Reviews**, v. 120, n. 12, p. 5352-5436, 2020.
- [26] VALERA-MEDINA, Agustin; BANARES-ALCANTARA, Rene. **Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector**. Academic Press, 2020.
- [27] FREIRE, José Luiz (org.). **Engenharia de Dutos**. Rio de Janeiro: Abcm, 2009
- [28] MORA-MENDOZA, José Luis et al. Evaluation of Stress Corrosion Cracking Damage to an API 5L X52 Pipeline Transporting Ammonia: A Case Study. **Materials Sciences and Applications**, v. 7, n. 10, p. 610-622, 2016.

- [29] PARMER, Cole. **Chemical Resistance**. Disponível em: <https://www.coleparmer.com/chemical-resistance..> Acesso em: 22 jun. 2021.
- [30] EUROPE, Fertilizers. **Guidance for Inspection of and Leak Detection in Liquid Ammonia Pipelines**. Europe: Fertilizers Europe, 2012
- [31] ESAB. **Petrochemical**. Disponível em: <https://www.esab.com.ar/br/pt/industries/petrochemical/index.cfm..> Acesso em: 22 abr. 2021
- [32] FOX, Robert W; MCDONALD, Alan T; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. São Paulo: Ltc, 2014
- [33] RESEARCHGATE. **Diagrama de Moody**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-113-Diagrama-de-Moody-Rousefi-g1343858524>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- gasolina [34] TROST, Daniel et al. Temperature Dependence of Density and Viscosity of Biobutanol-Gasoline Blends. **Applied Sciences**, v. 11, n. 7, p. 3172, 2021.
- [35] GREEN, Don W.; SOUTHARD, Marylee Z. **Perry's chemical engineers' handbook**. McGraw-Hill Education, 2019.
- [36] LIN, Jiefeng; GAUSTAD, Gabrielle; TRABOLD, Thomas A. Profit and policy implications of producing biodiesel-ethanol-diesel fuel blends to specification. **Applied energy**, v. 104, p. 936-944, 2013.
- [37] FIGUEIREDO, J. R.; FERNANDES, B. L.; SILVERIO, R. J. R. Nonequilibrium modeling of an ammonia-water rectifying column via fundamental thermodynamic and transport relations. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 23, n. 4, p. 540-553, 2006.
- [38] (NIST), National Institute Of Standards And Technology. **NIST**. Disponível em: <https://www.nist.gov/>. Acesso em: 18 abr. 2020.
- [39] ESCOLA, Brasil. **Lei de Dalton**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/lei-de-dalton.htm>. Acesso em: 12 jun. 2020