

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE GÁS LIQUEFEITO RENOVÁVEL NO BRASIL: TOMADA DE DECISÕES POR MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

AUTORES:

LARISSA THAÍS BRUSCHI; NATÁLIA DE ALMEIDA MENEZES; LUIZ ALEXANDRE KULAY; MOISÉS TELES DOS SANTOS

INSTITUIÇÃO:

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO; COPA ENERGIA

PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE GÁS LIQUEFEITO RENOVÁVEL NO BRASIL: TOMADA DE DECISÕES POR MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

Resumo

O Brasil apresenta um grande potencial de desenvolvimento de uma economia de baixo carbono baseada em recursos renováveis. Devido à disponibilidade de biomassa, mercado consumidor expressivo e grande extensão territorial, o país desempenha papel de destaque na transição energética. No entanto, existem desafios técnicos, econômicos e logísticos que precisam ser tratados a fim de que o uso destes recursos renováveis leve a sistemas com efetivos ganhos ambientais e econômicos. Com essas premissas, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de exploração de gás liquefeito renovável (GLR) no Brasil, composto por propano, por meio de uma parceria público-privada. Os modelos técnicos de processos para as rotas de produção (hidrotratamento de óleos vegetais, gaseificação e conversão de glicerol) foram obtidos por meio de simulação computacional estacionária, enquanto as decisões estratégicas são modeladas segundo quatro camadas de decisões: matéria-prima (tipo e origem), centros de produção (localidade e tecnologia adotada), centros de armazenamento (localidade) e mercado consumidor (volume e localidade). As camadas de decisões são interconectadas por meio de balanços de fluxos materiais e o problema é formulado como um modelo de programação linear inteira mista, com função objetivo de maximização do Valor Presente Líquido (VPL) para 20 anos. São apresentados dois estudos de caso: exploração de GLR nos estados de São Paulo e Paraná considerando todas as rotas tecnológicas disponíveis e exploração de GLR nos estados da região Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) adotando unicamente a rota via glicerol. Os resultados para a exploração de GLR nos estados de São Paulo e Paraná mostraram a necessidade de aumento de preço de venda do combustível renovável em comparação com o equivalente fóssil para obtenção de um VPL positivo. A tecnologia de conversão ótima foi a conversão do glicerol, com a instalação de um centro de produção em cada estado. Para exploração de GLR na região Sul os resultados apresentaram a instalação de dois centros de produção, com transferência interestadual de produto para suprir os mercados, devido a influência do regime tributário nos custos do sistema. O modelo de otimização desenvolvido para representação da exploração de GLR no cenário brasileiro demonstrou a importância de se expandir a oferta e diversificação de matérias-primas para melhorar a viabilidade econômica da produção de GLR e o impacto do regime tributário interestadual na topologia ótima dos sistemas obtidos.

Palavras-chave: gás liquefeito renovável, decisão estratégica, modelagem, otimização.

Abstract

Brazil has great potential for developing a low-carbon economy based on renewable resources. Due to the availability of biomass, significant consumer market and large territorial extension, the country plays a prominent role in the energy transition. However, there are technical, economic and logistical challenges to be addressed to the use of these renewable resources leads to efficient environmental and economic systems. Considering these assumptions, this work presents the development of a renewable liquefied gas (RLG) exploration model in Brazil, composed of propane, through a public-private partnership. The technical process models for the production routes (hydrotreatment of vegetable oils, gasification and glycerol conversion) were obtained through stationary computer simulation, while the strategic decisions are modeled according to four decision layers: raw material (type and origin), production centers (location and technology adopted), storage centers (location) and consumer market (volume and location). The decision layers are interconnected through material flow balances and the problem is formulated as a mixed integer linear programming

model, with an objective function of maximizing the Net Present Value (NPV) for 20 years. Two case studies are presented: exploration of RLG in the states of São Paulo and Paraná considering all the technological routes available and exploration of RLG in the states of the South region (Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul) considering only the glycerol route. The results for the exploration of RLG in the states of São Paulo and Paraná showed the need to increase the sales price of the renewable fuel compared to its fossil equivalent to obtain a positive NPV. The optimal production technology was the conversion of glycerol, with the installation of a production center in each state. For the exploration of RLG in the South region, the results showed the installation of two production centers, with interstate transfer of product to supply the markets, due to the influence of the tax regime on system costs. The optimization model developed to represent RLG exploration in the Brazilian scenario presented the importance of expanding the supply and diversification of raw materials to improve the economic viability of RLG production and the impact of the interstate tax regime on the optimal topology of the systems obtained.

Keywords: renewable liquefied gas, strategic decision, modeling, optimization.

Introdução

Devido à sua grande extensão territorial, diferentes zonas climáticas estão presentes no Brasil, implicando na sua grande biodiversidade e consequente variedade de matérias-primas com potencial para produção de químicos e energia renováveis. No entanto, o desenvolvimento de sistemas de exploração de fontes renováveis enfrenta desafios relacionados à logística. Além das grandes distâncias existentes entre as regiões de disponibilidade de matéria-prima, centros de conversão e zonas de consumo dos produtos finais, impostos incidentes sobre as vendas também representam um fator importante na determinação de um sistema logístico robusto e resiliente do ponto de vista econômico. Diante desses desafios, a exploração de combustíveis renováveis no Brasil exige uma gestão técnica e logística para garantir sua viabilidade econômica e ambiental. A oferta interna de energia do Brasil ainda é 50,9% derivada de fontes não renováveis (EPE, 2024), o que representa um potencial de crescimento de novas matrizes energéticas renováveis. Em 2023, a quantidade de gás liquefeito de petróleo (GLP) comercializado no Brasil foi de 7,4 milhões de toneladas, representando 2,9% da matriz de energia do país (EPE, 2024). Uma alternativa promissora ao GLP é o gás liquefeito renovável (GLR), que pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas, como materiais lignocelulósicos, resíduos orgânicos, óleos vegetais e glicerol (JOHNSON, 2019). A composição do GLR depende da tecnologia de conversão e da matéria-prima utilizada, mas basicamente é formada por butano e propano, moléculas idênticas ao GLP, seu equivalente fóssil.

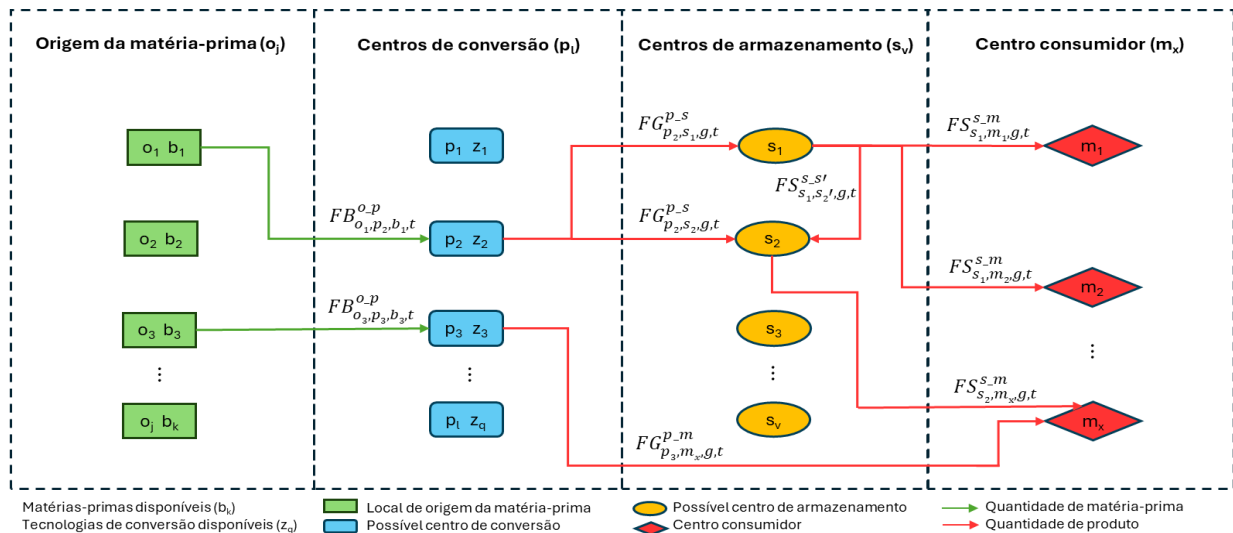
A exploração do GLR no Brasil depende de decisões estratégicas que contornem os desafios particulares do país, buscando as melhores matérias-primas, localidades para instalação de centros, tecnologias de produção, volumes e mercados a serem atendidos. A modelagem e otimização por programação matemática tem sido utilizada em problemas desse tipo. Em trabalho anterior (Theozzo e Teles dos Santos, 2021) avaliou-se a cadeia de suprimentos de biorrefinaria de base florestal no Brasil e demonstrou-se que além de fatores tecnológicos, a implementação de projetos renováveis no Brasil depende de fatores externos, como políticas tributárias, logísticas e de taxas de juros. Considerando as particularidades do cenário brasileiro e a sua representação por modelos de otimização para tomada de

decisões, o presente estudo propõe um modelo de exploração de GLR no Brasil, abordando as camadas de decisão de matéria-prima, produção, armazenamento e mercado, a fim de avaliar, por meio de dois estudos de caso, a produção e distribuição do GLR como um substituto ao GLP. Os estudos de caso abordam as tecnologias de produção de GLR pela rota de hidrotratamento de óleos vegetais, gaseificação e rota via glicerol; as matérias-primas estudadas são soja, girassol, glicerol, bagaço de cana, palha de soja e casca de arroz e a abrangência geográfica do modelo são os estados de São Paulo (SP), Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS).

Metodologia

O modelo de otimização desenvolvido para exploração de GLR no Brasil constitui um problema linear inteiro misto multi-período, baseado em modelo proposto por Theozzo e Teles dos Santos (2021) e composto por quatro camadas de decisão: matéria-prima, centro de produção, centro de armazenamento e mercado consumidor, representadas na Figura 1. O modelo é composto por 60 equações, 48 variáveis (44 variáveis contínuas e 4 variáveis binárias) e 37 parâmetros. Todos os fluxos materiais do modelo são anuais, avaliados em um horizonte temporal de 20 anos.

Figura 1 – Superestrutura do modelo de otimização com quatro camadas de decisão



A camada de decisão da matéria-prima representa os fluxos materiais de compra e transporte do material do tipo b (conjunto **B**), da localidade de origem o (conjunto **O**), considerando sua disponibilidade anual. A equação (1) apresenta a quantidade de material comprada em cada período t (conjunto **T**) ($FB_{o, b, t}^{compra}$), que deve ser inferior a quantidade disponível no período ($B_{o, b, t}$), parâmetro fornecido ao modelo.

$$FB_{o, b, t}^{compra} \leq B_{o, b, t} \quad \forall (o \in O, b \in B, t \in T) \quad (\text{equação 1})$$

A matéria-prima comprada do local o é transferida para um centro de produção p (conjunto **P**), resultando em um custo de transporte, além do seu custo de compra. Os custos de transporte têm dependência de um custo fixo e da distância entre os locais de origem o e destino p da matéria-prima. Na camada de decisão de produção são apresentadas as relações de conversão de matéria-prima b em

produtos ou coprodutos g (conjunto $\mathbf{G}$), além da decisão da instalação do centro de produção em p , empregando a tecnologia z (conjunto $\mathbf{Z}$), representado pela variável binária $ypz_{p,z}$. A matéria-prima processada em p ($FPZ_{p,z,b,t}^{processada}$) depende da instalação do centro de produção, segundo equação (2), restringida superiormente pelo parâmetro $M_{z,b}^{tec}$.

$$FPZ_{p,z,b,t}^{processada} \leq M_{z,b}^{tec} \cdot ypz_{p,z} \quad \forall (p \in P, z \in Z, b \in B, t \in T) \quad (\text{equação 2})$$

A quantidade de produto g produzida pelo centro de produção p , por meio da tecnologia z , no período t depende de fator de conversão da matéria-prima pela tecnologia. As conversões das matérias-primas pelas tecnologias de hidrotreatamento de óleos vegetais, gaseificação e rota via glicerol foram baseadas no trabalho de Ramirez (2023), desenvolvido no âmbito deste mesmo projeto de pesquisa. Ramirez (2023) utilizou simulação estacionária para estimar os rendimentos de cada tecnologia e cada matéria-prima, considerando suas composições e avaliando os parâmetros operacionais. A conversão da matéria-prima envolve também consumo de utilidades (conjunto $\mathbf{U}$), insumos (conjunto $\mathbf{I}$) e geração de resíduos (conjunto $\mathbf{R}$), adicionados aos custos operacionais de um dado centro de produção.

Na camada de armazenamento, os centros de armazenamento s (conjunto $\mathbf{S}$) são definidos por uma variável binária (ys_s). Uma restrição de balanço de massa (equação 3) representa o armazenamento do GLR em cada período t ($ms_{s,g,t}$), considerando a quantidade de produto recebida do centro de produção ($FG_{p,s,g,t}^{p,s}$), a transferência entre centros de armazenamento ($FS_{s',s',g,t}^{s,s'}$ e $FS_{s',s,g,t}^{s',s}$), a quantidade vendida aos mercados m (conjunto $\mathbf{M}$) ($FS_{s,m,g,t}^{s,m}$) e a quantidade estocada do período anterior ($ms_{s,g,t-1}$).

$$ms_{s,g,t} = \sum_{p \in P} FG_{p,s,g,t}^{p,s} + \sum_{s' \in S} FS_{s',s',g,t}^{s,s'} - FS_{s,s',g,t}^{s,s'} - \sum_{m \in M} FS_{s,m,g,t}^{s,m} + ms_{s,g,t-1} \quad \forall (s \in S, g \in G, t > 1 \in T) \quad (\text{equação 3})$$

A camada de decisão de mercado consumidor descreve como a demanda de GLR de cada mercado m deve ser atendida pelo total do produto enviado para o mercado, vindo direto do centro de produção ou dos centros de armazenamento. O modelo contabiliza impostos relativos à origem e destino do produto, que refletem no preço de venda, como o ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços). O lucro (L_t) representa a receita menos o custo de cada período, além de ser descontada uma taxa sobre os lucros. Na função objetivo (equação 4), o lucro é descontado por uma taxa de juros ($taxa_{real}$). Os custos de investimento dos centros de produção ($C^{investimento_p}$) e armazenamento ($C^{investimento_s}$) são incidentes apenas no primeiro período de operação.

$$VPL = \sum_{t \in T} \frac{L_t}{(1 - taxa_{real})^t} - (C^{investimento_p} + C^{investimento_s}) \quad (\text{equação 4})$$

O modelo de otimização foi implementado em linguagem Python, usando a biblioteca Pyomo. Para resolução do problema, o solver Gurobi (GUROBI OPTIMIZATION, 2023) foi utilizado, em computador com Intel i7-1165G7, processador de 2.80 GHz e memória RAM de 12 GB.

Resultados e Discussão

Com o modelo desenvolvido foram avaliados dois estudos de caso: 1) Exploração de GLR nos estados de São Paulo e Paraná considerando todas as rotas tecnológicas disponíveis e 2) Exploração de GLR

nos estados da região Sul: Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, adotando unicamente a rota via glicerol. Para ambos os estudos de caso, a demanda de mercado a ser atendida foi adotada como sendo a demanda doméstica de GLP a ser substituída por GLR. De mesmo modo, o preço de venda do GLR foi correspondente ao preço de venda do GLP, com impostos inclusos, correspondendo a R\$8.000/t (ANP, 2023). Um resumo dos estudos de caso é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos estudos de caso avaliados

Estudo de caso		1	2
Matérias-primas (custo compra R\$/t)		Soja (2.520) Girassol (2.030) Glicerol (1.300) Palha de Soja (140) Casca de Arroz (45) Bagaço de Cana (30)	Glicerol (1.300)
Tecnologias		Hidrotratamento Gaseificação Rota glicerol	Rota glicerol
Abrangência geográfica (estados)		São Paulo Paraná	Paraná Santa Catarina Rio Grande do Sul
Mercado (cidades)		São Paulo Curitiba	Curitiba Florianópolis Porto Alegre
Substituição do GLP		10%	5% (ano 1) – 100% (ano 20)
Localidades por conjunto (nº cidades)	O	33	12
	P	8	23
	S	6	23

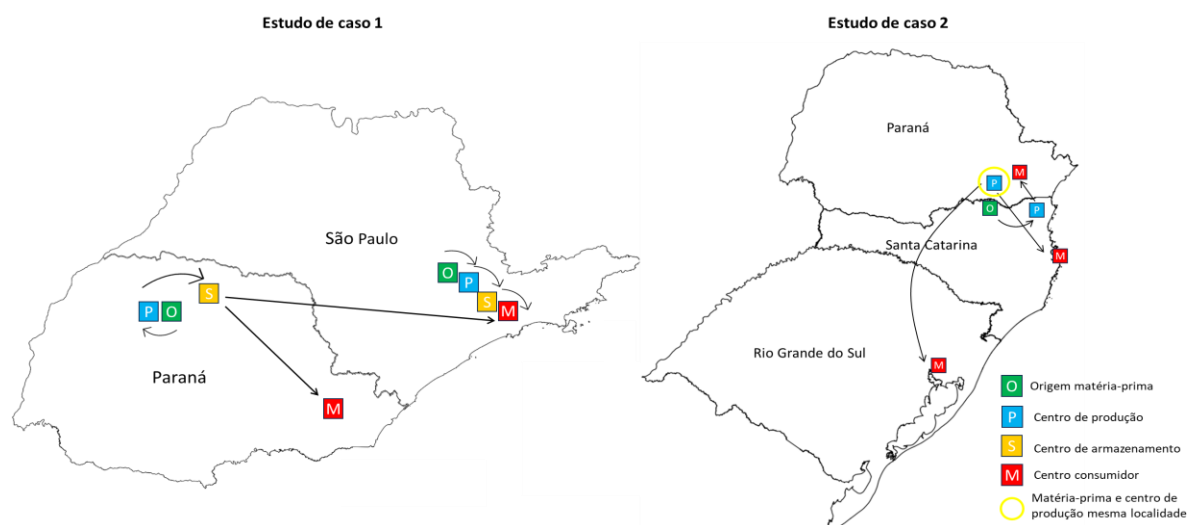
O: conjunto de localidades de origem da matéria-prima; P: conjunto de localidades para instalação do centro de produção; S: conjunto de localidades para instalação do centro de armazenamento.

Estudo de caso 1

O resultado da otimização para o estudo de caso 1 demonstrou a não viabilidade econômica de exploração de GLR, com um sistema de VPL nulo, considerando os preços e custos adotados. Para avaliar os impactos dos custos de compra das matérias-primas e do preço de venda do GLR no VPL, foi realizada uma análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade demonstrou que mantendo-se os custos das matérias-primas no valor base e alterando apenas o preço de venda do GLR, o sistema apresenta VPL positivo apenas quando o preço assume valores a partir de 130% do valor base (R\$10.400/t). Para implementação de projetos viáveis de produção e distribuição de GLR no cenário avaliado, o preço de venda do combustível renovável deve ser superior ao do combustível empregado atualmente. Para a análise de sensibilidade nos custos da matéria-prima, a exploração de GLR se tornou viável para custos inferiores a 60% do valor base. Em todos os cenários obtidos na análise de sensibilidade em que o VPL foi positivo, a tecnologia de conversão ótima definida foi a rota via glicerol. Dentre as tecnologias de conversão incluídas na otimização, a rota via glicerol é a que possui maior fator de conversão de matéria-prima em GLR, composto por propano, correspondendo a 30% massa (Ramirez, 2023). Adotando o preço de venda do GLR como sendo R\$10.400/t, obteve-se a topologia ótima apresentada na Figura 2. A rede otimizada apresenta a instalação de dois centros de produção e dois centros de armazenamento, resultando em um VPL de R\$50,6 milhões. A rede para atender a demanda paulista recebe o GLR do centro de armazenamento de São Paulo e do Paraná, em vez de

transportar a matéria-prima de locais distantes ou instalar outro centro de produção dentro da região. Isso ocorre porque o GLR produzido em São Paulo é insuficiente para atender o mercado local, demandando o transporte de outra região. A instalação de uma nova unidade de produção não é viável, pois no modelo foram adotados capacidade máxima fixa e investimentos fixos, indicando que mesmo instalando uma unidade de produção que não opere na capacidade máxima, os custos de investimento representariam um impacto financeiro negativo desnecessário. Os impostos sobre vendas de produtos também influenciam a decisão das instalações na topologia, pois a taxa de ICMS entre Paraná e São Paulo é de 12%, enquanto a taxa de ICMS no interior de São Paulo é de 18%, tornando o transporte de GLR do Paraná mais vantajoso que o transporte interno em São Paulo.

Figura 2 – Topologia ótima para exploração de GLR para os estudos de caso 1 e 2



Estudo de caso 2

No estudo de caso 2, a demanda de GLP a ser substituída por GLR é de 5% no primeiro ano, aumentando progressivamente até atingir 100% de substituição no último ano do horizonte avaliado. Embora seja um cenário ainda não existente no Brasil, planos estratégicos de países europeus, como o Reino Unido, já preveem a substituição total do GLP por equivalentes renováveis até 2040 (LIQUID GAS UK, 2023). A topologia ótima (Figura 2) representa uma rede com VPL de R\$109 milhões e demonstrou a instalação de dois centros de produção, um em Joinville (SC), outro na Lapa (PR). O centro da Lapa recebe glicerol da própria cidade, enquanto o centro de produção de Joinville recebe glicerol de Mafra. Nenhum centro de armazenamento foi instalado nessa topologia. Devido aos altos custos para instalar e operar um centro de armazenamento, a topologia ótima apresenta a produção de um determinado período igual a demanda a ser atendida, não estocando GLR em períodos diferentes. A transferência de GLR do centro de produção para o mercado consumidor é interestadual, demonstrado pela transferência de Joinville (SC) para Curitiba (PR), de Lapa (PR) para Florianópolis (SC) e de Lapa (PR) para Porto Alegre (RS). Esse comportamento, que também foi observado no estudo de caso 1, ocorre devido aos impostos sobre a venda dos produtos, que são menores nas transferências entre estados. As taxas de ICMS entre PR e RS, e entre PR e SC são de 12%, enquanto transações dentro do mesmo estado são taxadas em valores maiores: 18% (RS e PR) e 17% (SC). Em ambos os estudos de caso, o maior componente negativo do VPL é o custo com compra de glicerol, matéria-prima definida pela otimização. No estudo de caso 1, os custos de compra de glicerol convertidos para valor presente correspondem a 66% da parcela negativa

do VPL (custos operacionais, investimentos e taxas), enquanto para o estudo de caso 2 esse valor é de 70%. Isso se deve a conversão de matéria-prima em GLR, que exige grandes quantidades de matéria-prima para suprir a demanda de produto estabelecida.

Conclusões

Um modelo preliminar de otimização linear inteira mista foi desenvolvido para representar a exploração de GLR no Brasil, abordando fatores como disponibilidade de matéria-prima, tecnologias de conversão, armazenamento, demanda de mercado e custos associados. Os estudos de caso avaliados mostraram que os preços do GLR e os custos das matérias-primas tem influência significativa no VPL e por consequência na viabilidade nos projetos de exploração do GLR. Os resultados mostraram a rota via glicerol como a tecnologia de conversão ótima para os estudos de caso avaliados, devido ao seu maior rendimento de conversão de matéria-prima em GLR em comparação com outras tecnologias. Apesar disso, os custos de compra de matéria-prima ainda representam o maior impacto negativo no VPL, determinando a necessidade de ampliar a oferta e disponibilidade de matérias-primas avaliadas no modelo. O regime tributário interestadual mostrou impactar nas decisões de transferência de produtos entre os centros, evidenciando que não apenas fatores tecnológicos influenciam nas decisões e ressaltando a necessidade de modelos de otimização que abordem essas relações. Trabalhos futuros incluem a ampliação do modelo para diferentes regiões e matérias-primas e inclusão das incertezas dos parâmetros no modelo de otimização, tais como preço, custos e demandas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Copa Energia (projeto FUSP 3871).

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Tabela de Margens de Preços - 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/arq-precos/tabelas/2023-margens-p13-tabela.pdf>. Acesso em: 08 out. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional: Relatório Síntese 2024 Ano base 2023**. Empresa de Pesquisa Energética, 2024. 70 p.

GUROBI OPTIMIZATION, LLC. Gurobi Optimizer Manual. 2023. Disponível em: <https://www.gurobi.com>.

JOHNSON, Eric. Process technologies and projects for BioLPG. **Energies**, v. 12, n. 2, p. 250, 2019.

LIQUID GAS UK. 2040 **Vision: Industry pathway to Net Zero and beyond**. Disponível em: <https://www.liquidbiofuels.org.nz/documents/resource/2040-vision.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2023.

RAMIREZ, Bruno Bee. **Modelagem de processos de produção de bioGLP**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

THEOZZO, B.; TELES DOS SANTOS, M. A MILP framework for optimal biorefinery design that accounts for forest biomass dynamics. **Computers & Chemical Engineering**, v.146, p. 107201, 2021.