

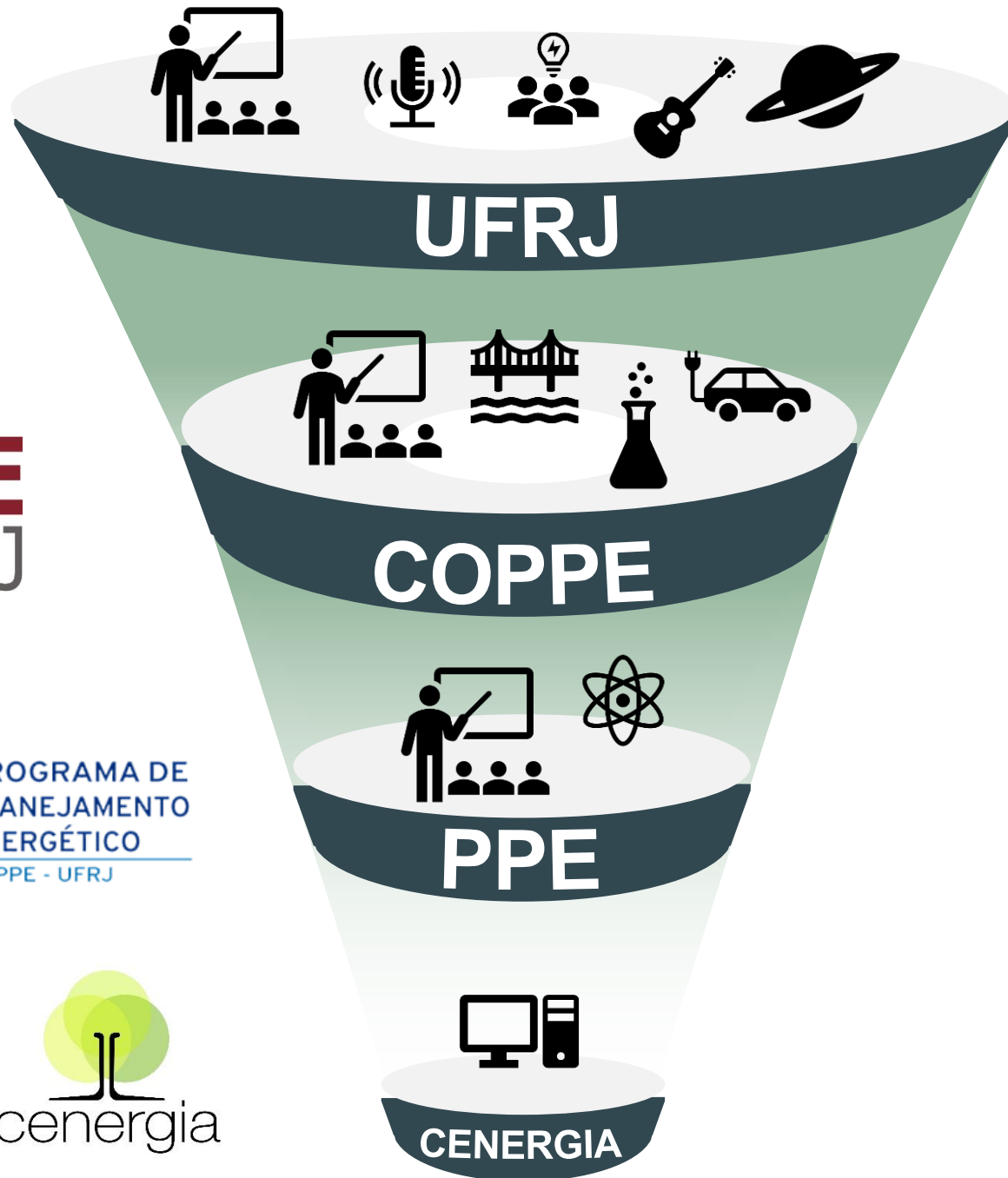
Perspectivas de Produção de Combustíveis Marítimos de Emissão Neutra de Carbono no Brasil

PARTE 1: Descrição das Rotas Tecnológicas e Análise Comparativa

Francielle Carvalho

Doutoranda do Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ





COPPE
UFRJ

PPE PROGRAMA DE
PLANEJAMENTO
ENERGÉTICO
COPPE - UFRJ



Onde

estamos






Journal of Cleaner Production


Volume 326, 1 December 2021, 129385



Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil

Francielle Carvalho  , Eduardo Müller-Casseres, Matheus Poggio, Tainan Nogueira, Clarissa Fonte, Huang Ken Wei, Joana Portugal-Pereira, Pedro R.R. Rochedo, Alexandre Szklo, Roberto Schaeffer

Show more 

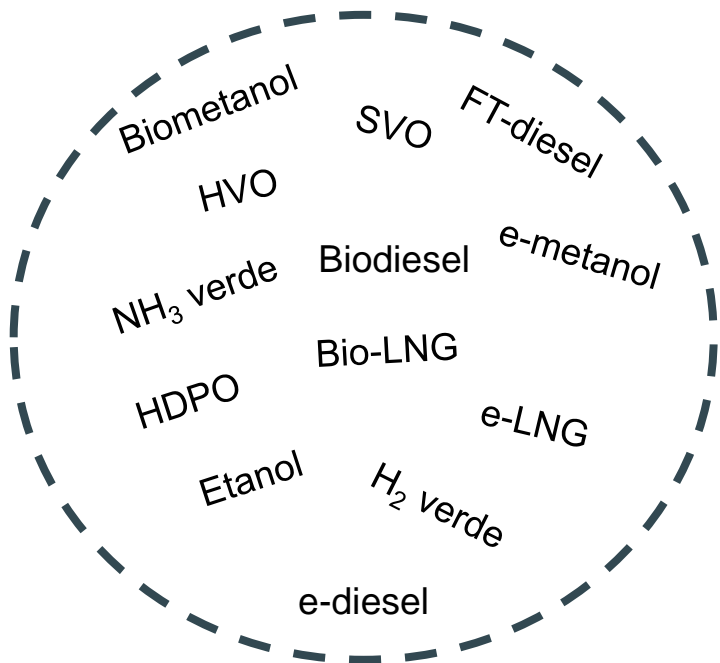
+ Add to Mendeley  Share  Cite

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>

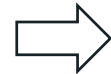
[Get rights and content](#)

Etapas do estudo

Primeira fase da pesquisa



Foco do seminário de hoje



Seleção de combustíveis promissores



Segunda e terceira fases (próximos 3 meses)



Análise georreferenciada



Análise de ciclo de vida (LCA)



Estudo econômico



Avaliação integrada

Objetivos do Seminário

- 1** Apresentar combustíveis potencialmente neutros em carbono para o transporte marítimo de longa distância, tendo como foco o *horizonte temporal de 2020 a 2050*, em conformidade com as metas de redução de emissão definidas para o setor.
- 2** Realizar uma *análise comparativa* entre as opções levantadas, a partir de critérios preestabelecidos, selecionando as cinco principais alternativas



Agenda

1. Contexto: Metas da IMO e a Pauta de Exportação Brasileira
2. Rotas de Produção de Combustíveis Alternativos Não Fósseis
3. Metodologia de Avaliação e Critérios
4. Resultados da Análise Comparativa
5. Combustíveis Selecionados
6. Próximos Passos da Pesquisa



Metas Climáticas da IMO

1. EEDI

Novas fases da política de eficiência energética



2. TRANSPORT WORK

Redução das emissões de GEE por tonelada-milha

40% em 2030
70% em 2050

3. EMISSÕES TOTAIS

Redução do montante anual de emissões de GEE

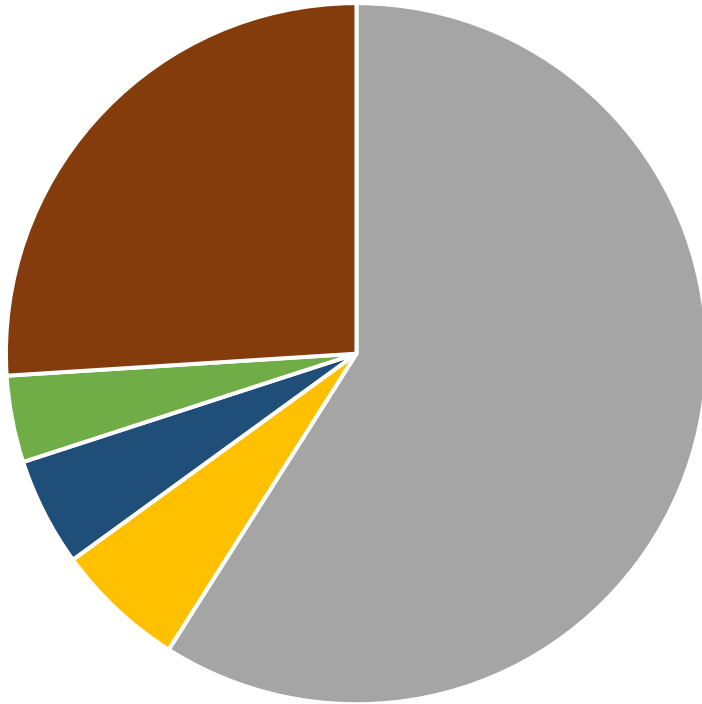
50% em 2050 em relação a 2008



Emissão em 2050:
≈ 500 MtCO₂e
(com ↑ atividade)

Caso Brasileiro: Pauta de Exportação

MASSA



3/4 da tonelada
exportada

Minério de ferro

Soja

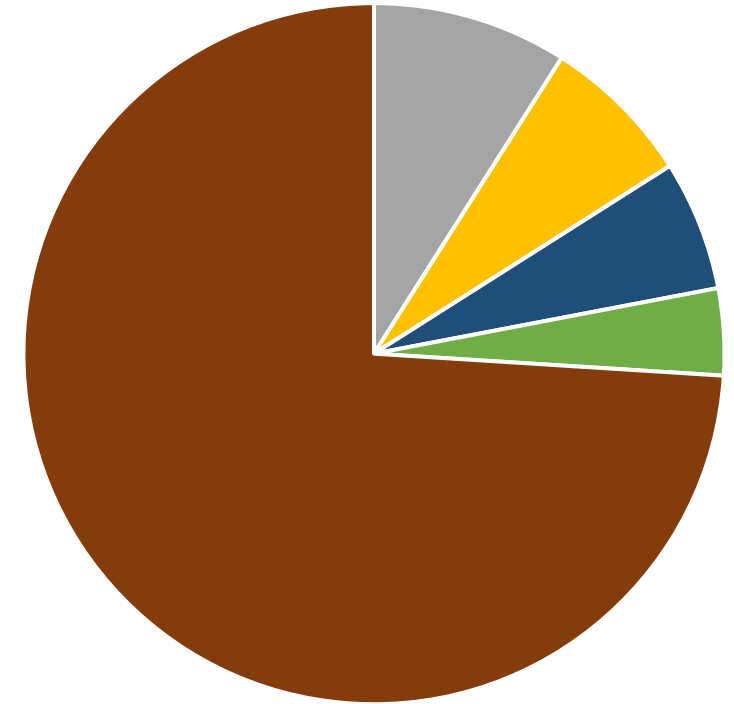
Petróleo bruto

Açúcar bruto

Outros

(2001-2018)

VALOR



1/4 do valor
exportado

Combustíveis Analisados

Grupo 1:
*Biocombustíveis
líquidos destilados*



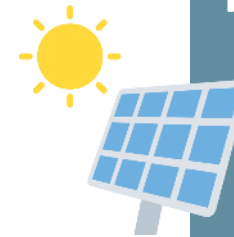
SVO
Biodiesel
HVO
HDPO
FT-diesel

Grupo 2:
*Álcoois e
gases liquefeitos*



Bio-LNG
Biometanol
Bio-etanol

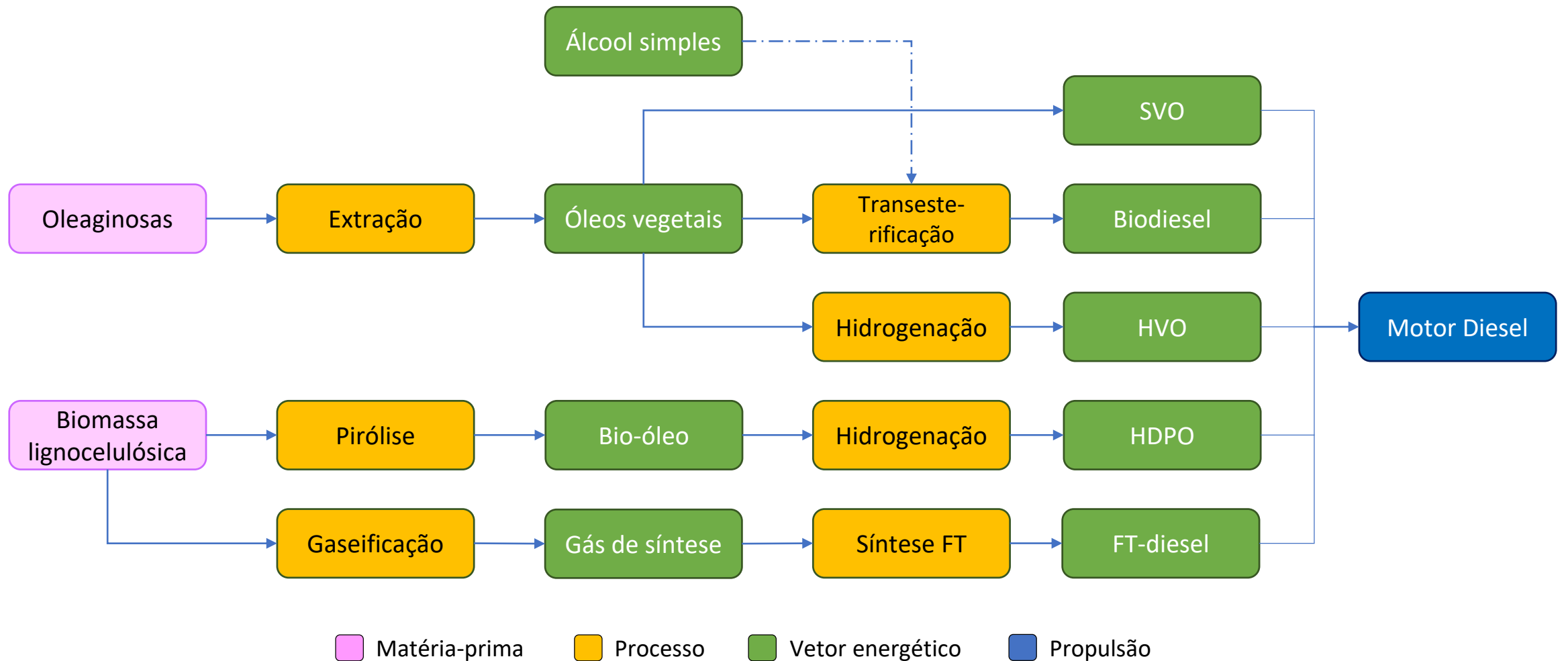
Grupo 3:
*Hidrogênio
e derivados*



Hidrogênio verde
Amônia verde
Eletrodiesel
Eletrometano
Eletrometanol

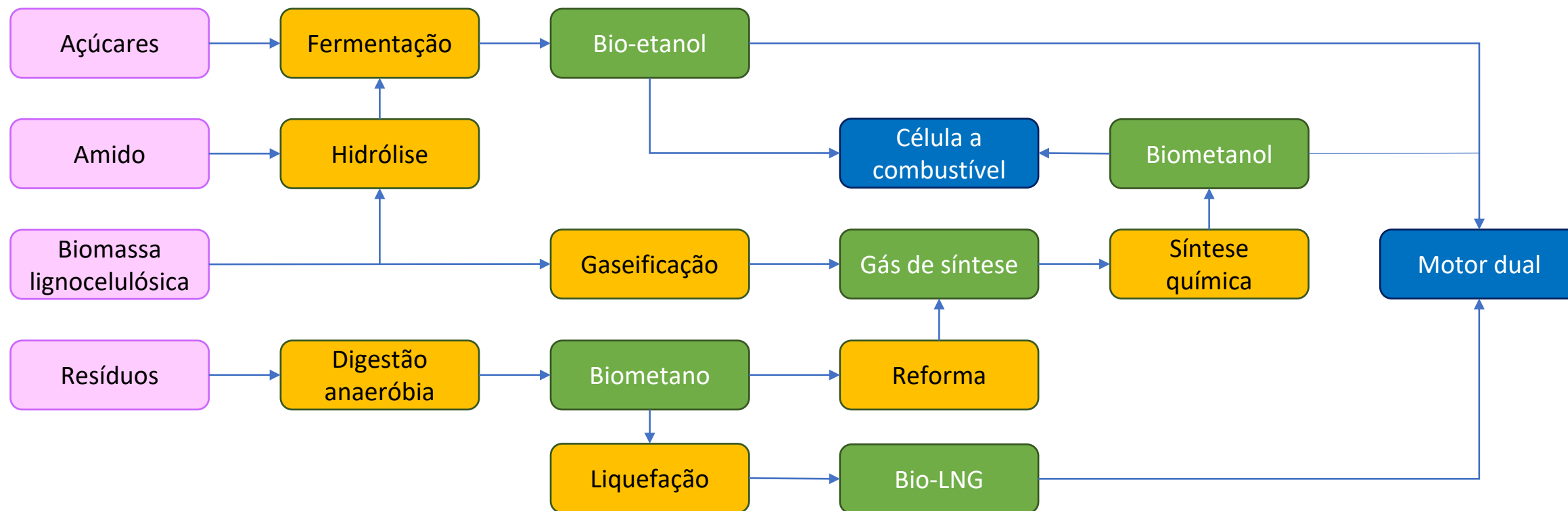
Biocombustíveis Destilados

GRUPO 1



Álcoois e Gases Liquefeitos

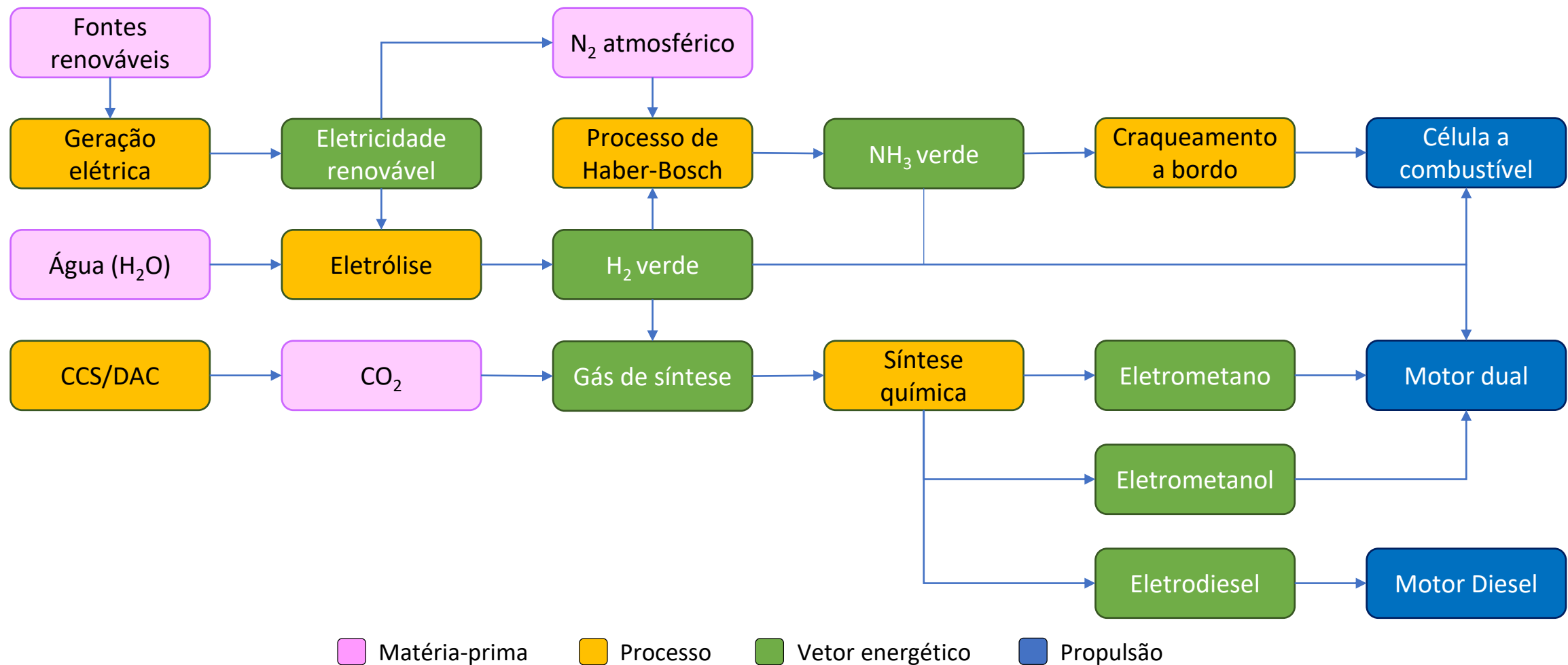
GRUPO 2



Matéria-prima Processo Vetor energético Propulsão

Hidrogênio, Amônia e Eletrocombustíveis

GRUPO 3



Propriedades Físico-Químicas

Notas:

PCI: Poder calorífico inferior

a: A 15°C

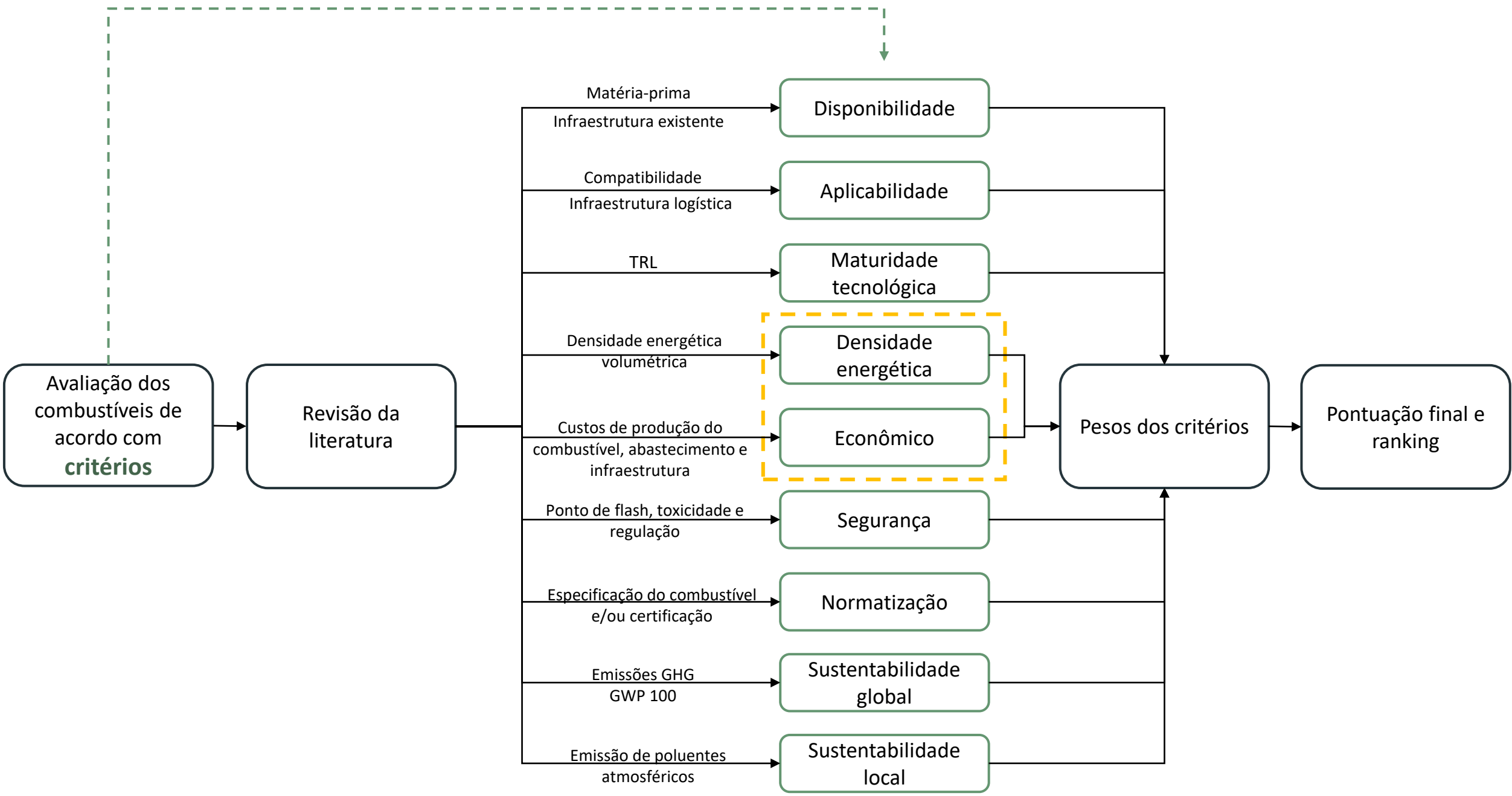
b: Valor mínimo

c: Poder calorífico superior (MJ/kg)

d: Valores encontrados possuem grande dispersão, então optou-se por classificar como elevado/baixo.

e: Hidrogênio líquido

	Densidade (kg/L)	Viscosidade cinemática (40°C) (cSt)	Número de cetanas	PCI (MJ/kg) (MJ/Nm³)	Ponto de fulgor (°C)	Ponto de névoa (°C)	Ponto de fluidez (°C)	Ponto de ebulição (°C)
Óleo de soja	0,91 ^a	65,00 ^a /9,00 ^b	37,90	39,60	254,00	-3,90	-12,20	769,70
Óleo de milho	0,92 ^a	48,00 ^a /10,50 ^b	37,60	37,80	277,00	-1,10	-40,00	769,00
Óleo de girassol	0,88 ^a	10,00 ^a /7,50 ^b	45,00-52,00	40,60	274,00	7,20	-15,00	763,40
Biodiesel	0,88	4,00-6,00	47,00-65,00	37,20	>130,00	-1,00 a 8,00	-4,00 a 6,00	344,70
HVO	0,78	2,00-4,00	>70,00	44,10	>61,00	-34,00 a -5,00	-	313,00
HDPO	0,84-0,9	2,80	Elevado ^d	45,20 ^c	35,00-39,00	-	-	368,70
FT-diesel	0,765	2,00	>70,00	43,00	74,00	-18,00	-	<330,00
Bio-LNG	0,47	Baixa	-	55,20 (35,80)	-188,00	-	-	-161,00
Biometanol	0,79	Baixa	-	19,90	11,10	-	-	64,70
Bio-etanol	0,79	Baixa	-	26,70	16,60	-	-	78,40
Hidrogênio	0,07 ^e	Baixa	-	120,00 (10,75)	Inflamável	-	-	-253,00
Amônia	0,70	Baixa	-	18,60 (14,10)	132,00	-	-	-33,30



— Normalização aplicada aos critérios quantitativos

Análise Comparativa - Critérios

DISPONIBILIDADE

Disponibilidade regional e global de insumos e de infraestrutura de produção do combustível

APLICABILIDADE

Adequação do combustível à frota em operação e à infraestrutura existente de transporte, armazenamento e bunkering

MATURIDADE TECNOLÓGICA

Nível de maturidade técnico-econômica das tecnologias de produção e utilização do combustível

DENSIDADE ENERGÉTICA

Densidade energética volumétrica. Reflete o espaço adicional necessário para tancagem ou perda de autonomia

ECONOMICIDADE

Custo nivelado da cadeia do combustível, incluindo bunkering e ajustes na embarcação

SEGURANÇA

Toxicidade do combustível e segurança no manuseio/operação

NORMATIZAÇÃO

Existência de regulamentações que possibilitem identificar origem renovável do combustível

SUSTENTABILIDADE LOCAL

Emissões de poluentes atmosféricos, impactos sobre biodiversidade e corpos hídricos

SUSTENTABILIDADE GLOBAL

Emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao uso do combustível e à sua cadeia produtiva



Análise Comparativa - Critérios

DISPONIBILIDADE

Disponibilidade regional e global de insumos e de infraestrutura de produção do combustível

APLICABILIDADE

Adequação do combustível à frota em operação e à infraestrutura existente de transporte, armazenamento e

MATURIDADE TECNOLÓGICA

Nível de maturidade técnico-econômica das tecnologias de produção e utilização do combustível

DENSIDADE ENERGÉTICA

Densidade energética volumétrica. Reflete o espaço adicional necessário para tancagem ou perda de autonomia

Escala de comparação



SEGURANÇA

Toxicidade do combustível e segurança no manuseio/operação

NORMATIZAÇÃO

Existência de regulamentações que possibilitem identificar origem renovável do combustível

SUSTENTABILIDADE LOCAL

Emissões de poluentes atmosféricos, impactos sobre biodiversidade e corpos hídricos

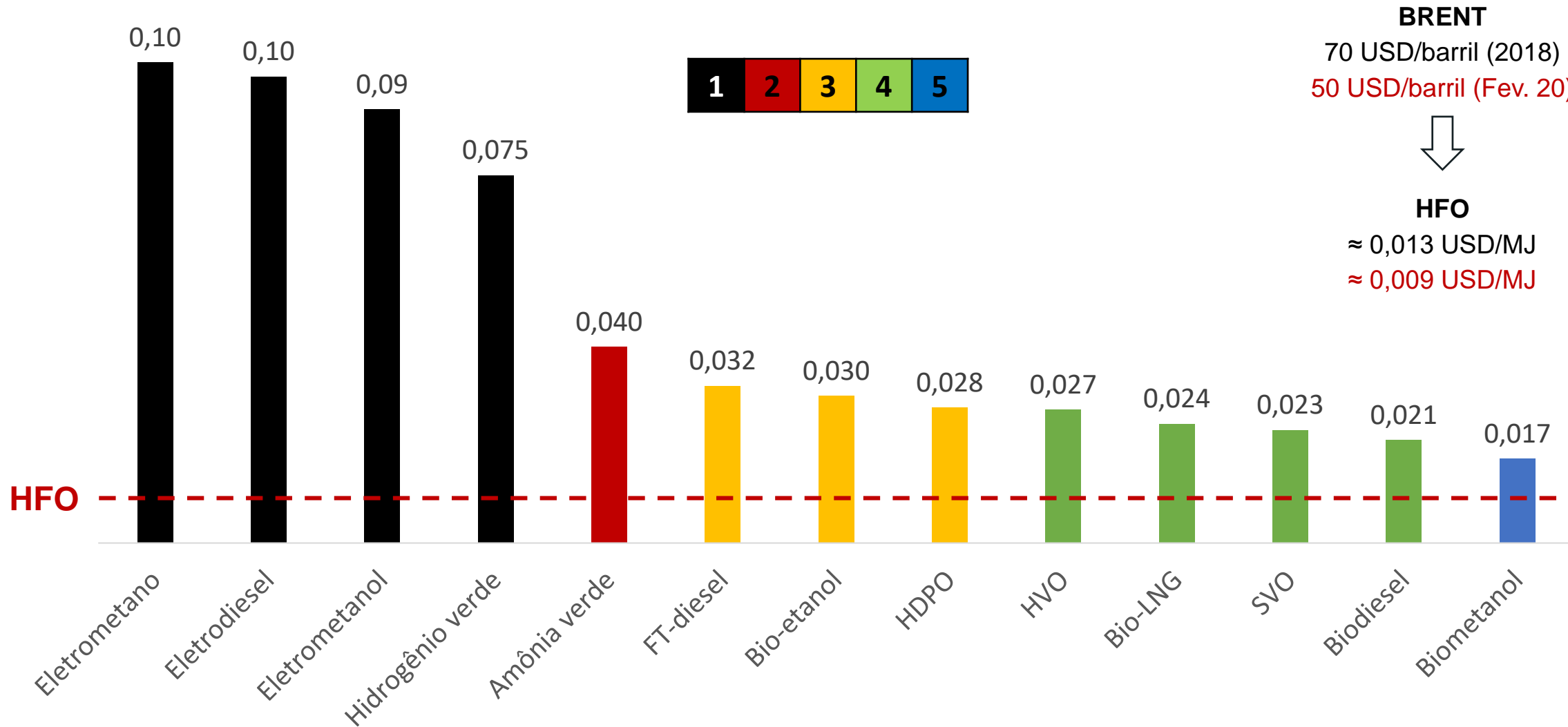
SUSTENTABILIDADE GLOBAL

Emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao uso do combustível e à sua cadeia produtiva

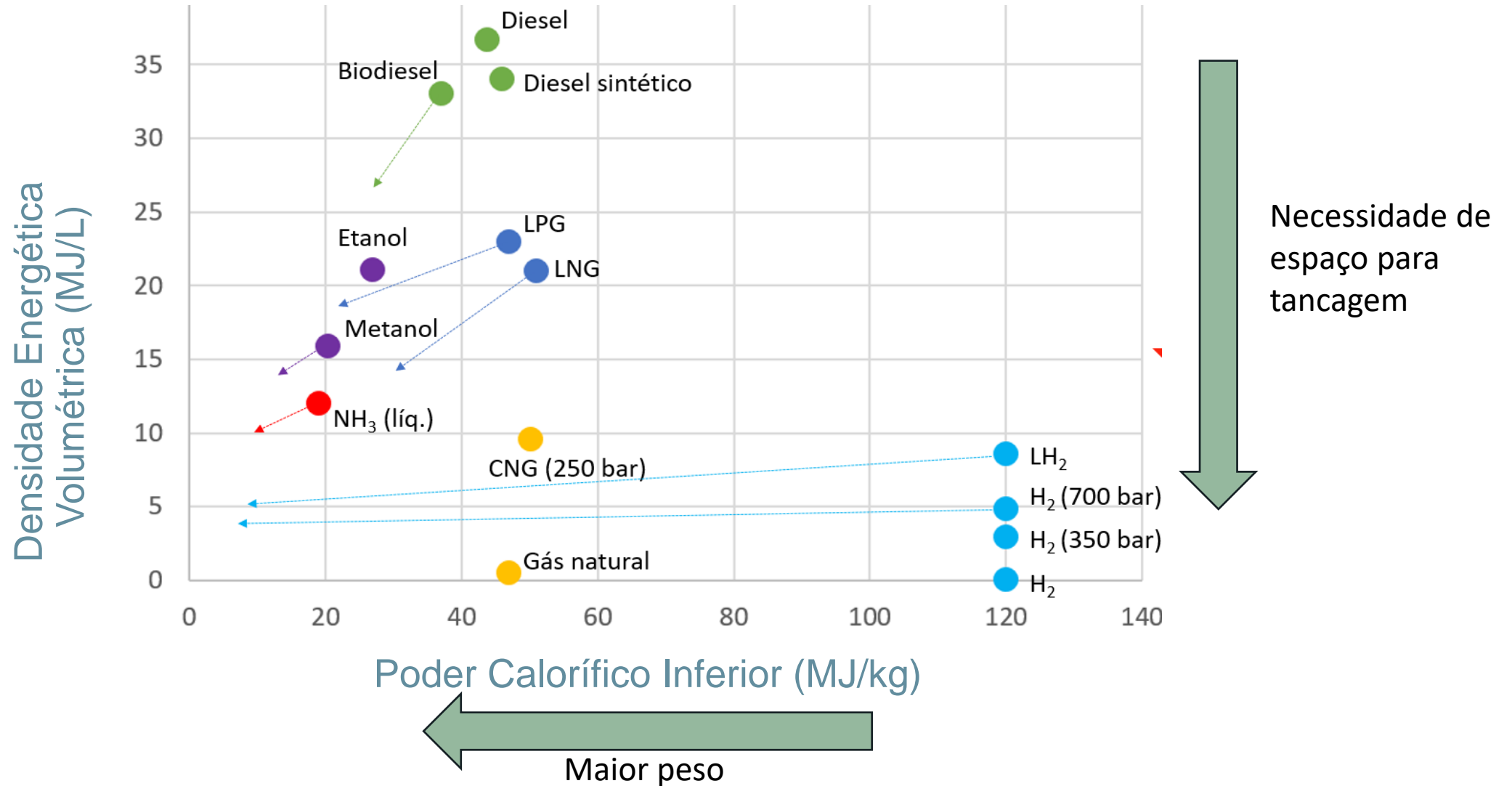
Economicidade – Escala de Custos

CUSTO DA ENERGIA (USD/MJ)

combustível +
infraestrutura de abastecimento +
modificações nos navios (motores e
tanques)

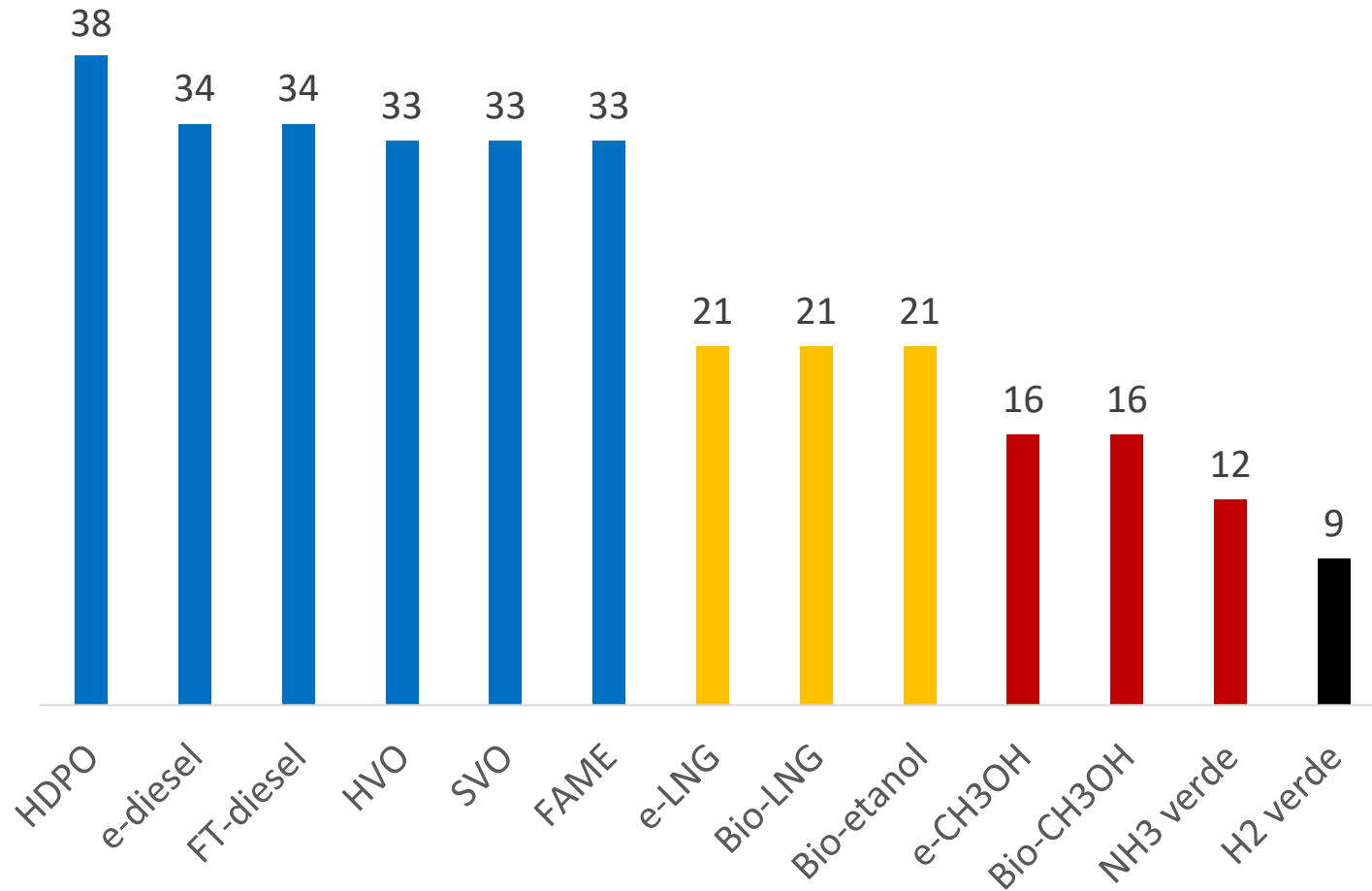


Escala de Densidade Energética



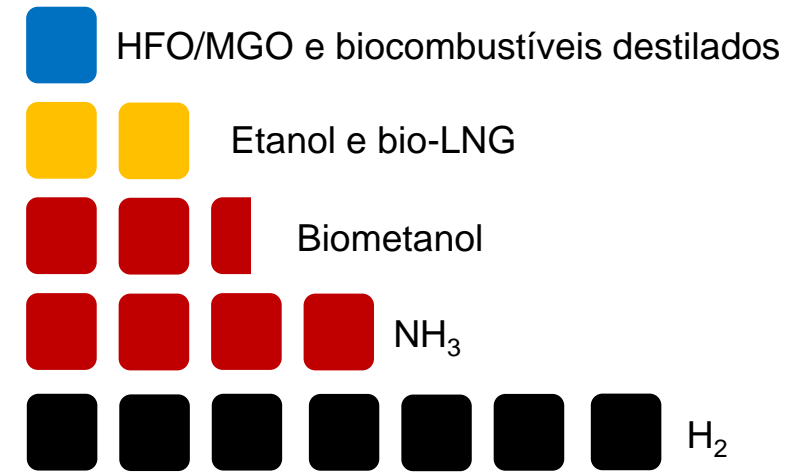
Escala de Densidade Energética

DENSIDADE ENERGÉTICA VOLUMÉTRICA (MJ/L)



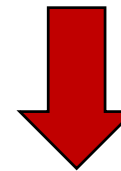
Espaço requerido
















(aproximado – variações significativas)



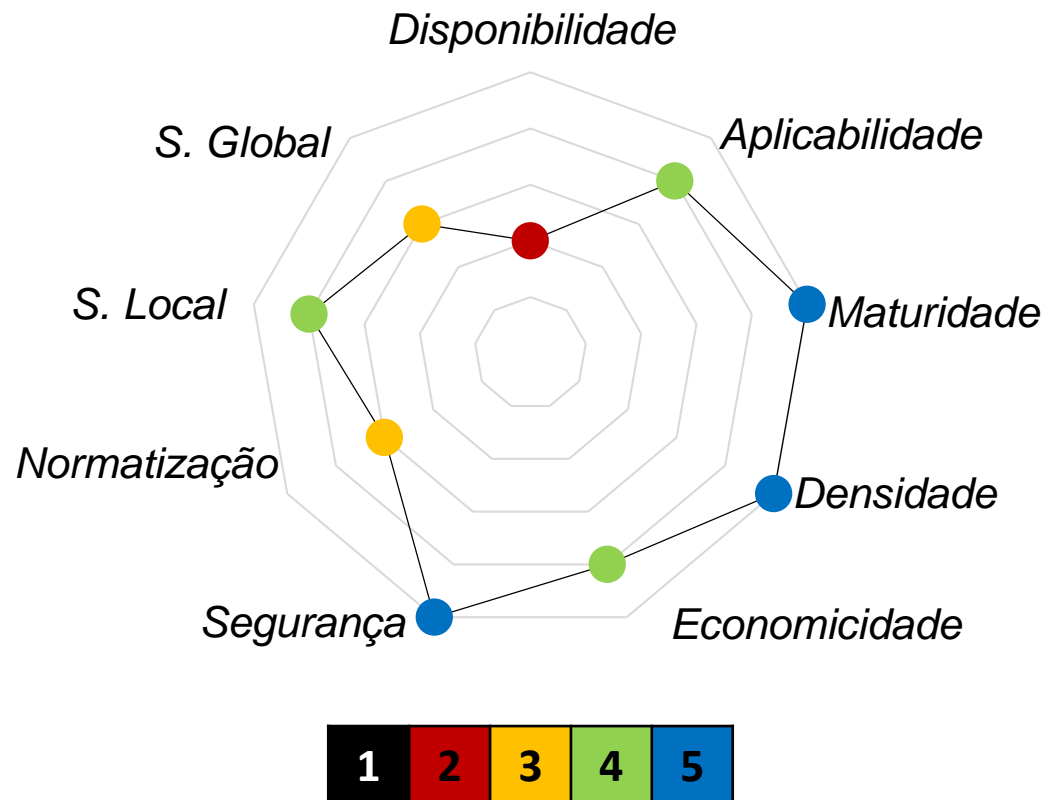
Alternativamente, perda de autonomia!

Segurança Operacional



	MGO	LNG	CH ₃ OH	H ₂ (líq.)	NH ₃ (líq.)
Inflamabilidade	Líquido e vapor inflamável 	Gás extremamente inflamável 	Líquido e vapor altamente inflamável 	Gás extremamente inflamável 	Gás inflamável
Gás sob pressão	-	Gás refrigerado; risco de queimadura criogênica 	-	Gás refrigerado; risco de queimadura criogênica 	Gás sob pressão; risco de explosão se aquecido 
Toxicidade aguda	Nocivo, se inalado 	-	Tóxico, se inalado, engolido ou em contato com a pele 	-	Tóxico, se inalado 
Risco por aspiração	Pode ser fatal, se ingestão/vias respiratórias 	-	-	-	-
Corrosão da pele	Causa irritação da pele 	-	-	-	Danos severos à pele e aos olhos 
Ambiente aquático	Tóxico para a vida marinha (efeito duradouro) 	-	-	-	Muito tóxico para a vida marinha (efeito duradouro) 

SVO (Óleo Vegetal Direto)



PONTOS FORTES

Combustível *drop-in**

Produção consolidada

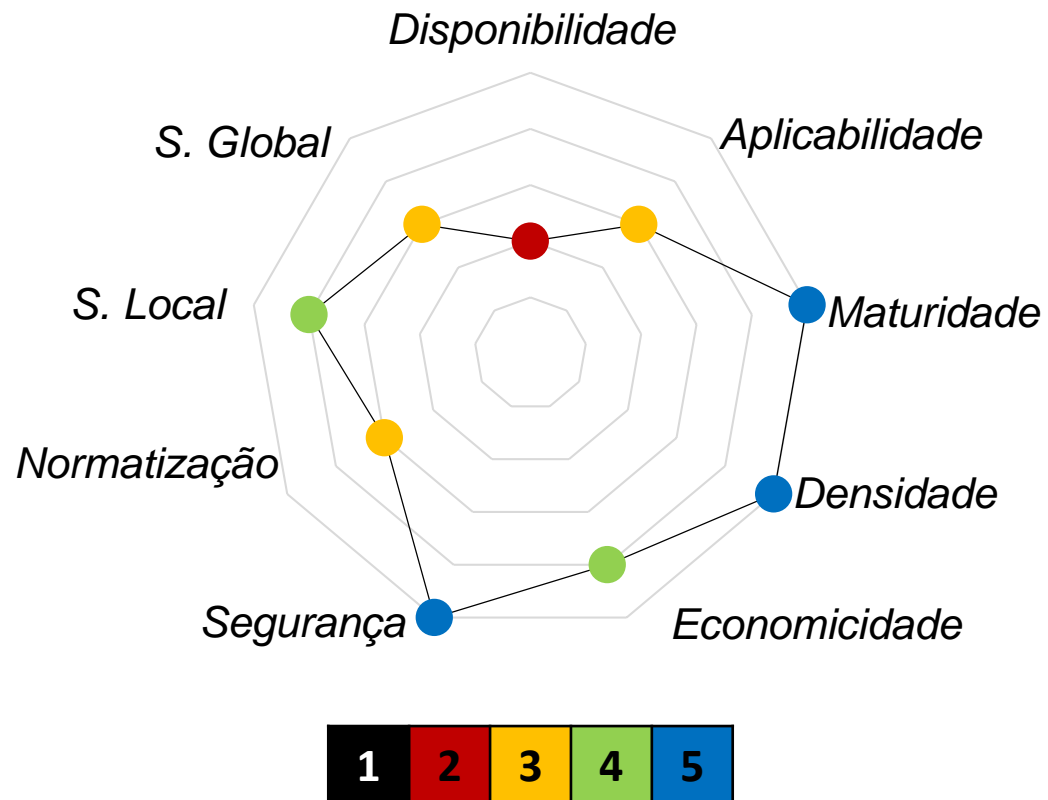
MJ/L \approx bunker

DESVANTAGENS

Competição com outros usos

Incertezas quanto a mudanças no uso do solo

Biodiesel (FAME/FAEE)



PONTOS FORTES

Combustível *drop-in**

Produção e uso consolidados

MJ/L \approx bunker

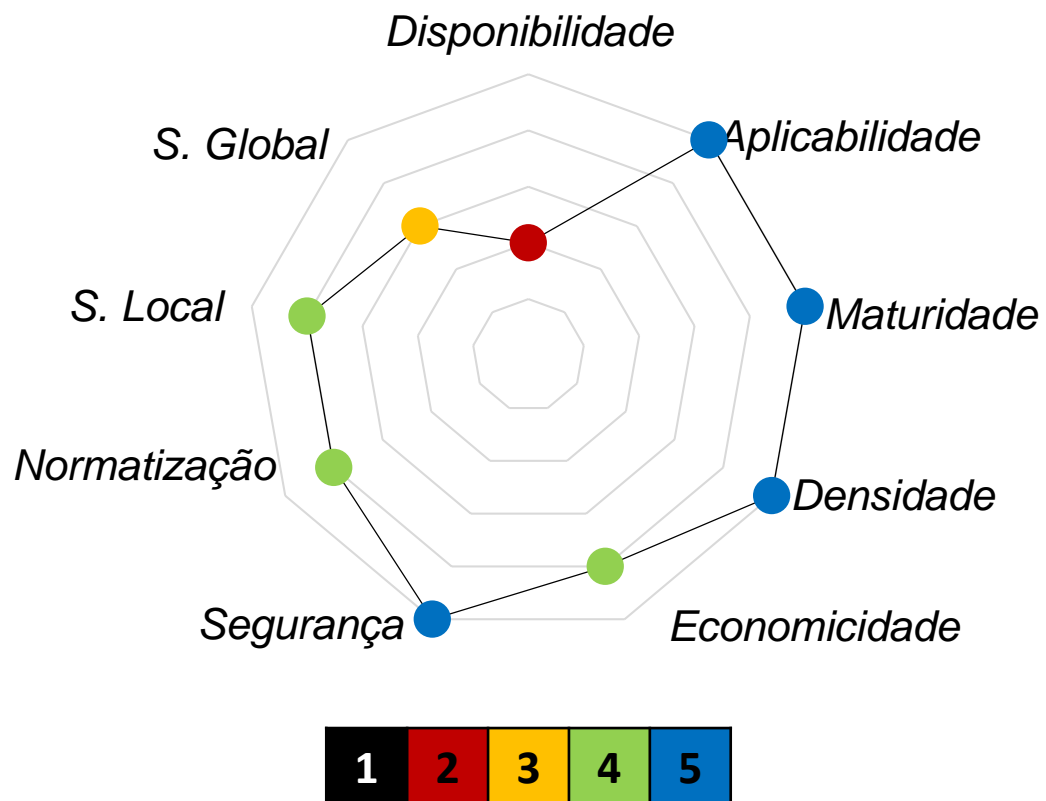
DESVANTAGENS

Competição do óleo com outros usos

Incertezas quanto a mudanças no uso do solo

Menor qualidade em relação ao HVO

HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado)



PONTOS FORTES

Combustível *drop-in*

Alta qualidade

Tecnologia dominada

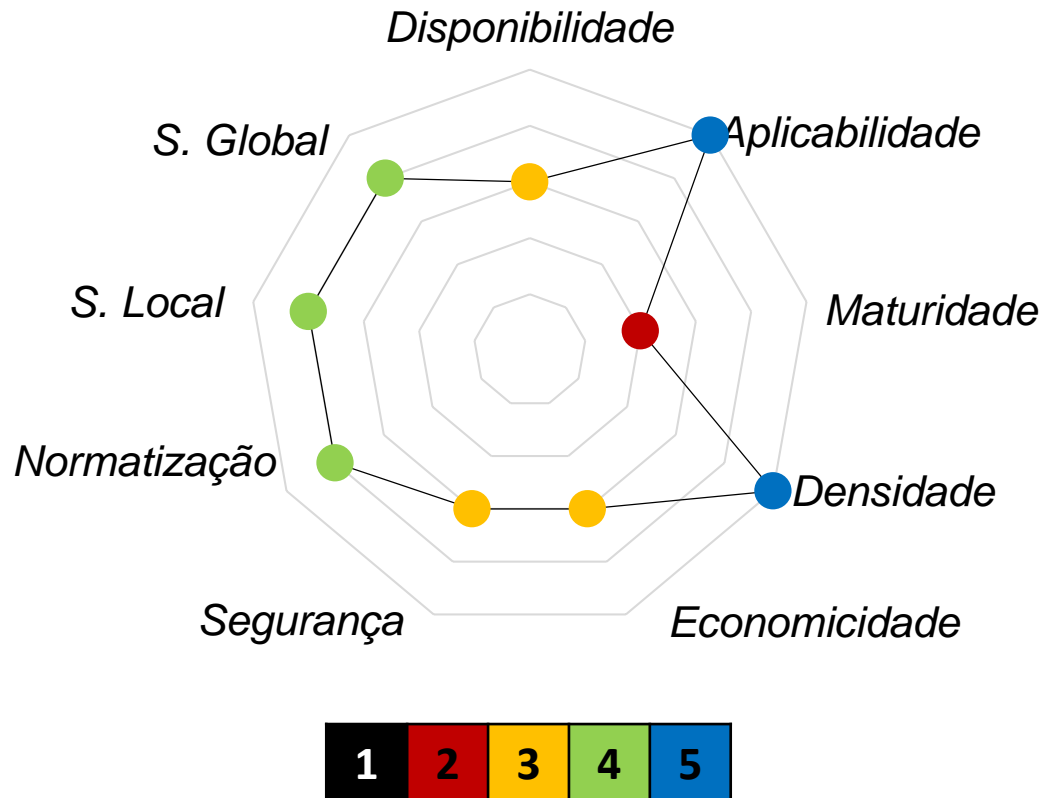
MJ/L \approx bunker

DESVANTAGENS

Competição do óleo com outros usos

Incertezas quanto a mudanças no uso do solo

HDPO (Óleo de Pirólise Hidrotratado)



PONTOS FORTES

Combustível *drop-in*

Alta qualidade

Melhor disponibilidade em relação a oleaginosas

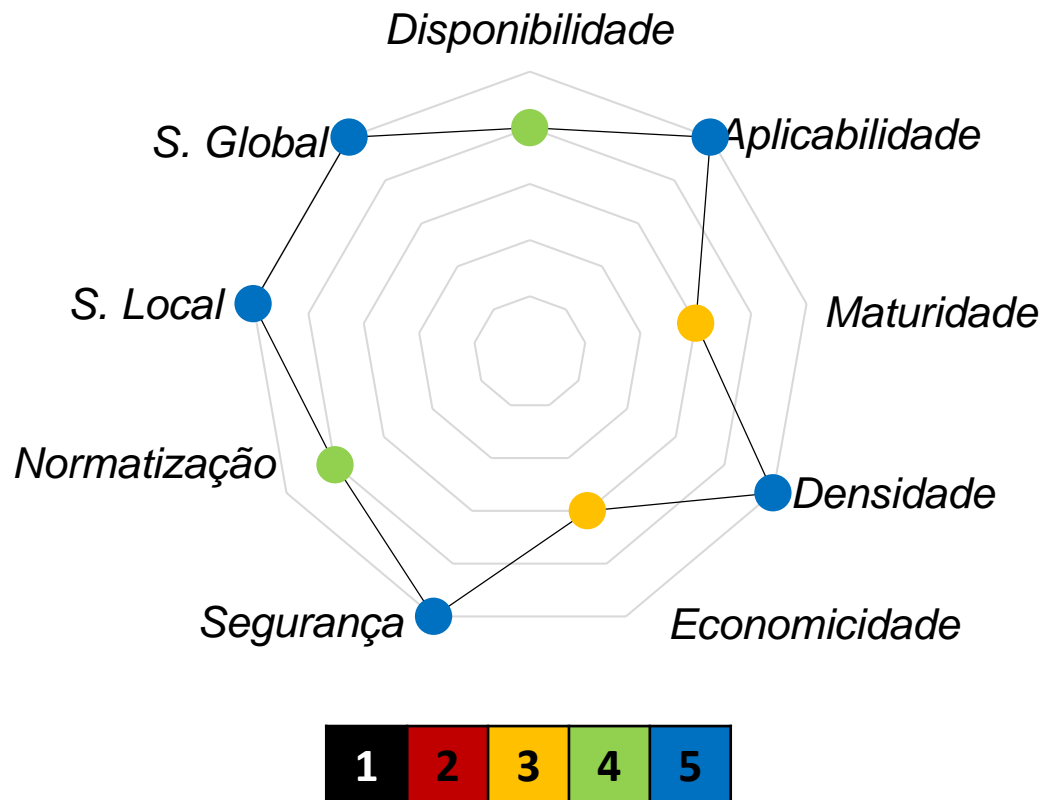
MJ/L \approx bunker

DESVANTAGENS

Tecnologia de produção ainda em desenvolvimento

Custo mais elevado em relação a SVO e HVO

FT-diesel (Diesel de Fischer-Tropsch)



PONTOS FORTES

Combustível *drop-in*

FT - coprodutos

Alta qualidade

MP disponível

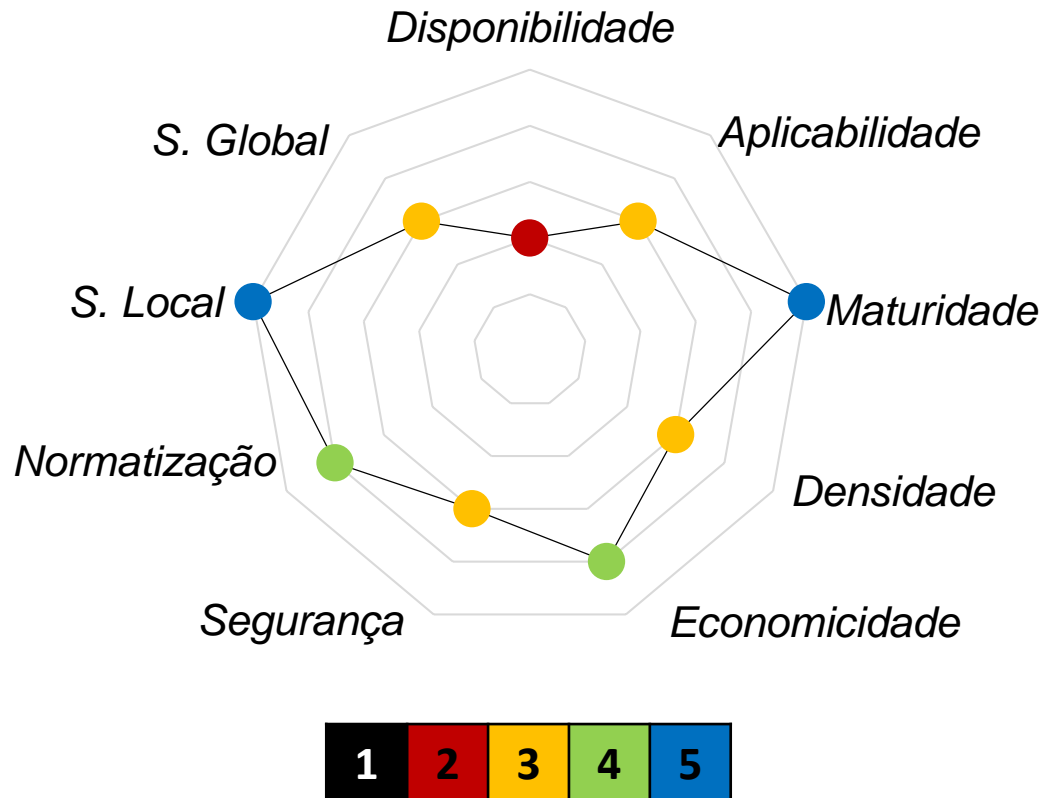
Alta sustentabilidade global

DESVANTAGENS

Estágio comercial de TRL ainda não alcançado

Custo mais elevado em relação a SVO e HVO

Bio-LNG (Biometano Liquefeito)



PONTOS FORTES

Produção e liquefação do CH_4 são processos dominados

Custo relativamente interessante

DESVANTAGENS

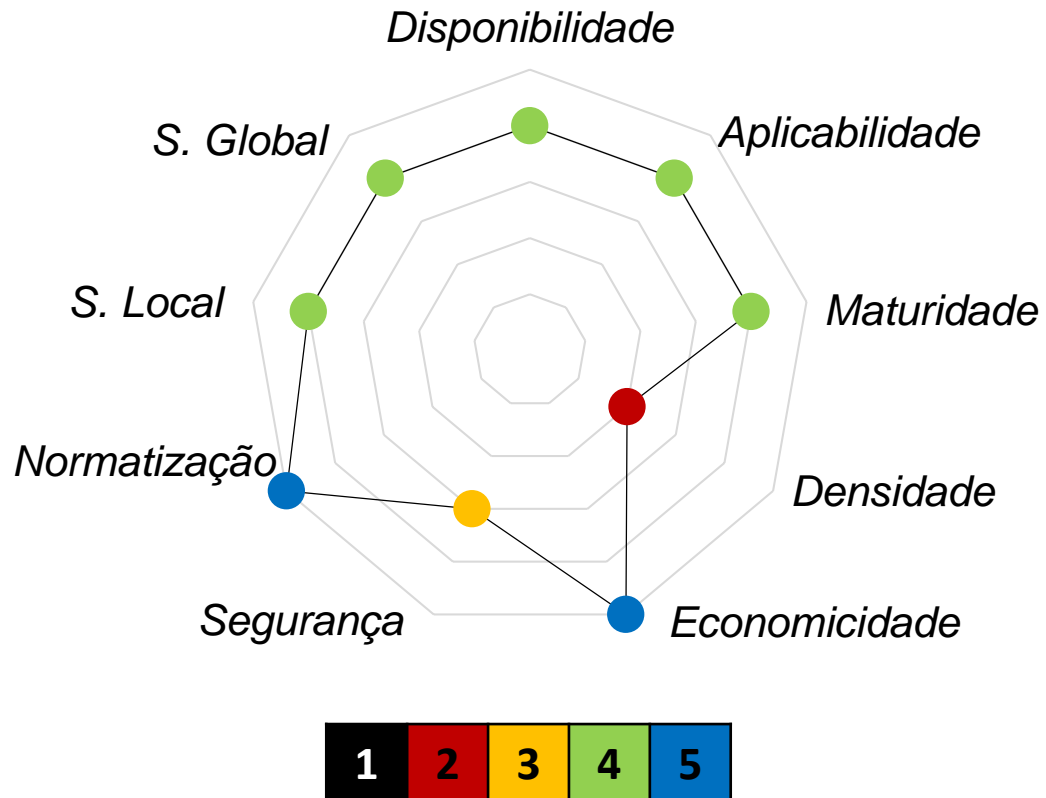
MP atomizada

MJ/L \approx bunker \div 2

Uso possível apenas em motor dual-fuel

Methane slip

Bio-CH₃OH (Biometanol)



PONTOS FORTES

MP amplamente disponível

Infraestrutura existente

Boa economicidade

Vantagem de tancagem em relação ao bio-LNG

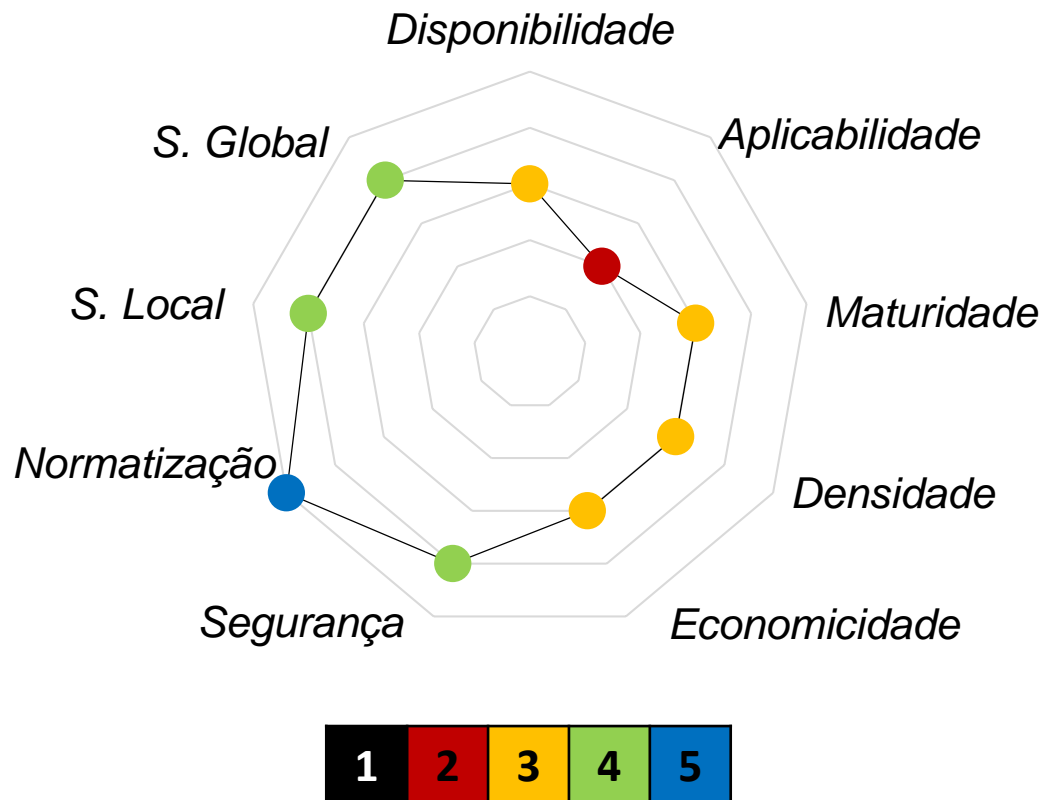
DESVANTAGENS

MJ/L ≈ bunker ÷ 2,5

Mais inflamável em relação ao bunker

Uso possível em motor dual-fuel

Bio-C₂H₅OH (Bio-Etanol)



PONTOS FORTES

Tecnologias de produção dominadas

Combustível seguro

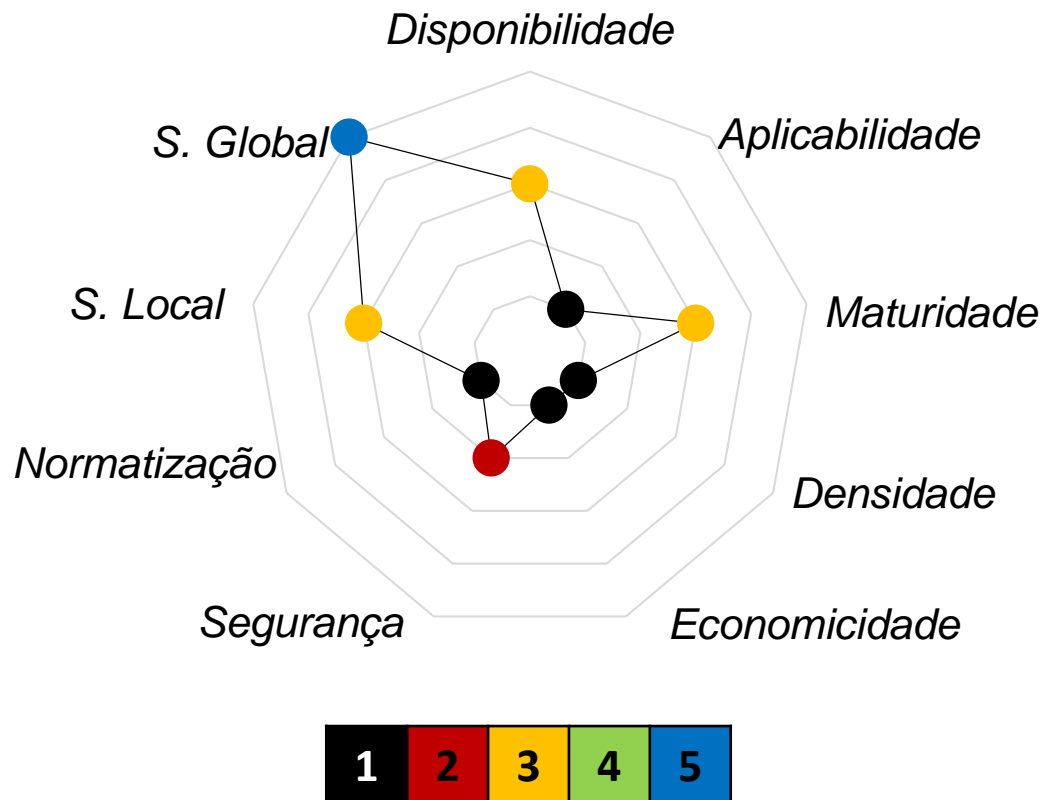
Experiência com normatização

DESVANTAGENS

Booster para uso em motor Diesel

MJ/L \approx bunker \div 2

H₂ Verde (Hidrogênio Renovável)



PONTOS FORTES

Alta sustentabilidade global

Não gera emissão de poluentes atmosféricos

DESVANTAGENS

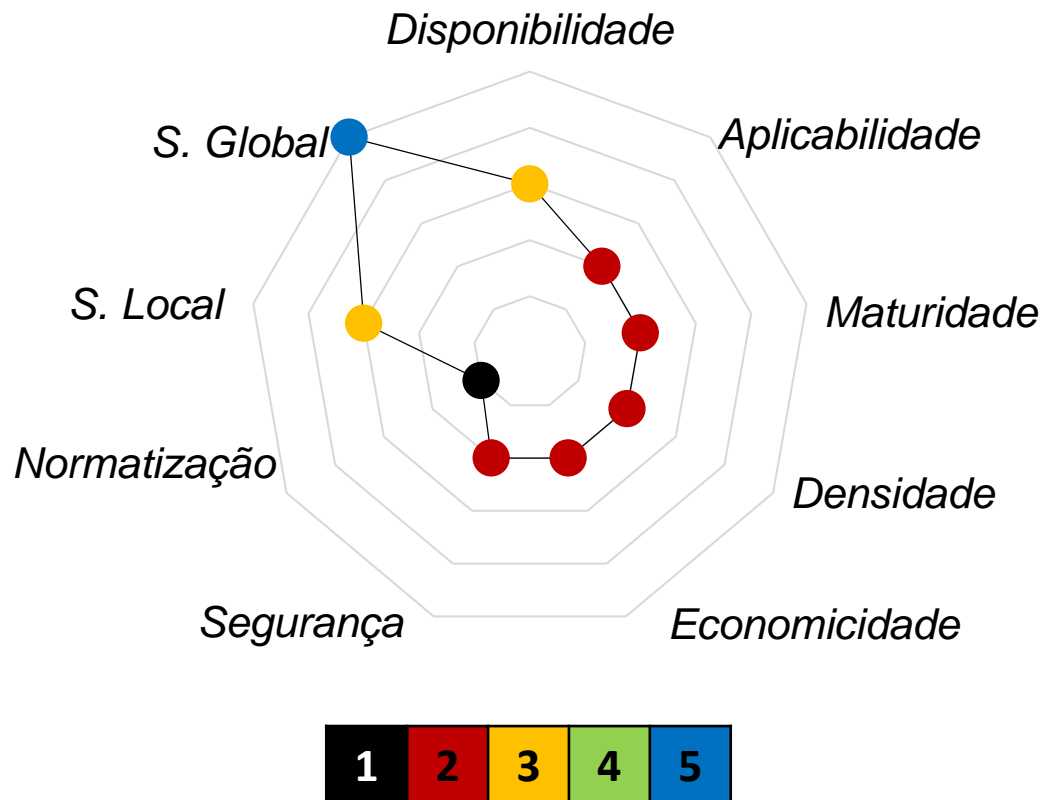
Baixa aplicabilidade, maturidade e segurança

Custo elevado da eletrólise

Densidade energética

Alto consumo H₂O

NH₃ Verde (Amônia Renovável)



PONTOS FORTES

Alta sustentabilidade global

Não gera emissão de poluentes atmosféricos

Haber-Bosch é um processo dominado

DESVANTAGENS

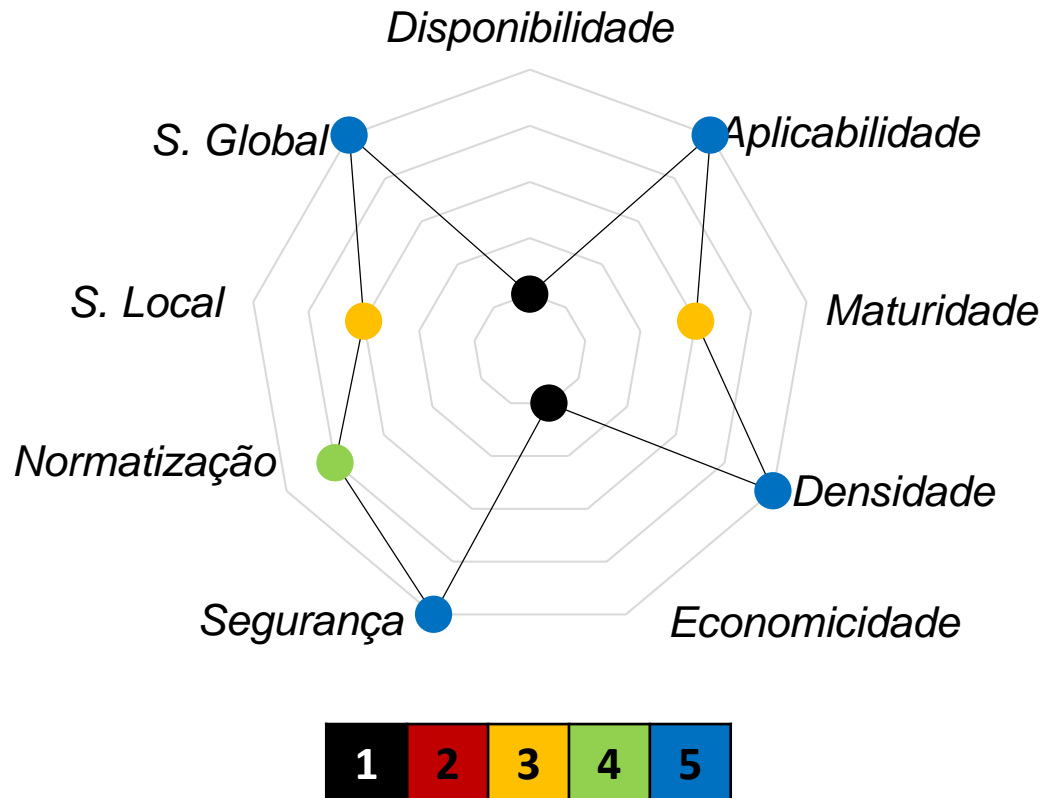
Baixa aplicabilidade, maturidade e segurança

Custo elevado da eletrólise

MJ/L \approx bunker \div 3

Alto consumo H₂O

e-diesel (Eletrodiesel)



PONTOS FORTES

Combustível *drop-in*

MJ/L \approx bunker

Alta sustentabilidade global

Reciclagem CO₂

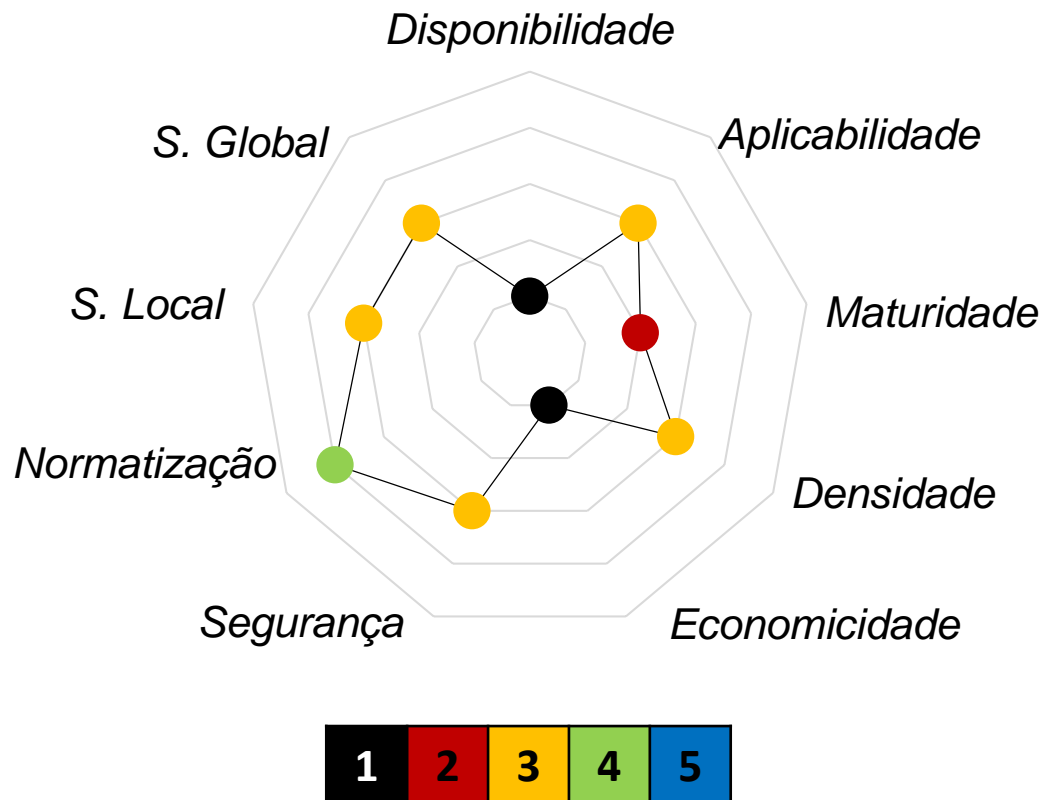
DESVANTAGENS

Custo muito elevado

CO₂ indisponível em curto prazo (DAC/CCS)

Alto consumo H₂O

e-LNG (Eletrometano)



PONTOS FORTES

Produção e liquefação do CH_4 são processos dominados

Reciclagem CO_2

DESVANTAGENS

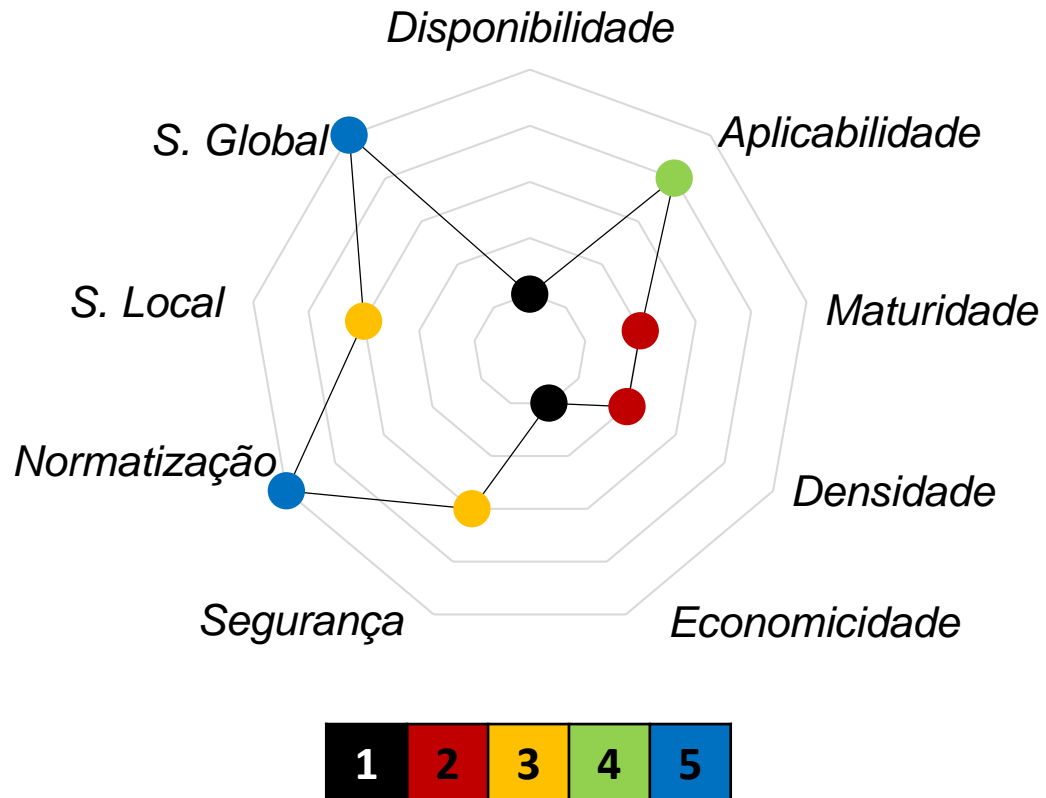
Custo muito elevado

CO_2 indisponível

Uso possível apenas em motor dual-fuel

Methane slip

e-CH₃OH (Eletrometanol)



PONTOS FORTES

Vantagem de tancagem em relação ao bio-LNG ou e-LNG

Reciclagem CO₂

DESVANTAGENS

Custo muito elevado

CO₂ indisponível

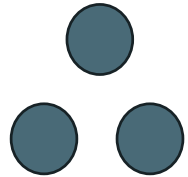
Alto consumo H₂O

MJ/L ≈ bunker ÷ 2,5

Síntese da Avaliação

	SVO	Biodiesel	HVO	HDPO	FT-diesel	Bio-LNG	Bio-CH ₃ OH	Bioetanol	H ₂ verde	NH ₃ verde	e-diesel	e-LNG	e-CH ₃ OH
<i>Disponibilidade</i>	2	2	2	3	4	2	4	3	3	3	1	1	1
<i>Aplicabilidade</i>	4	3	5	5	5	3	4	2	1	2	5	3	4
<i>Maturidade tecnológica</i>	5	5	5	2	3	5	4	3	3	2	3	2	2
<i>Densidade energética</i>	5	5	5	5	5	3	2	3	1	2	5	3	2
<i>Econômico</i>	4	4	4	3	3	4	5	3	1	2	1	1	1
<i>Segurança</i>	5	5	5	3	5	3	3	4	2	2	5	3	3
<i>Normatização</i>	3	3	4	4	4	4	5	5	1	1	4	4	5
<i>Sustentabilidade local</i>	4	4	4	4	5	5	4	4	3	3	3	3	3
<i>Sustentabilidade global</i>	3	3	3	4	5	3	4	4	5	5	5	3	5

Ponderação dos Critérios



PESO 3

Sustentabilidade global



PESO 2

*Disponibilidade
Aplicabilidade
Maturidade tecnológica
Densidade energética
Segurança*



PESO 1

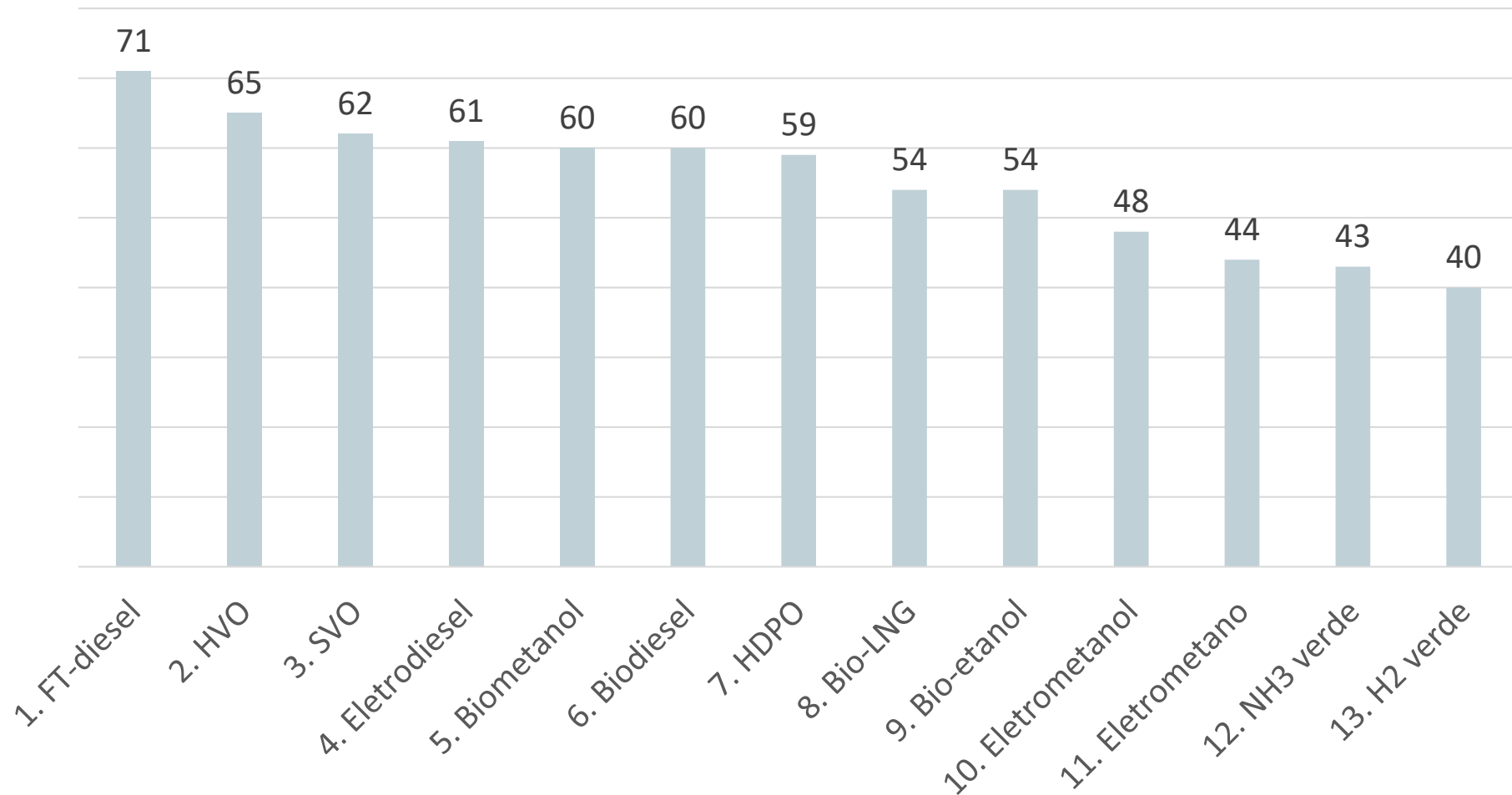
*Economicidade
Sustentabilidade local
Normatização*

Análise de sensibilidade

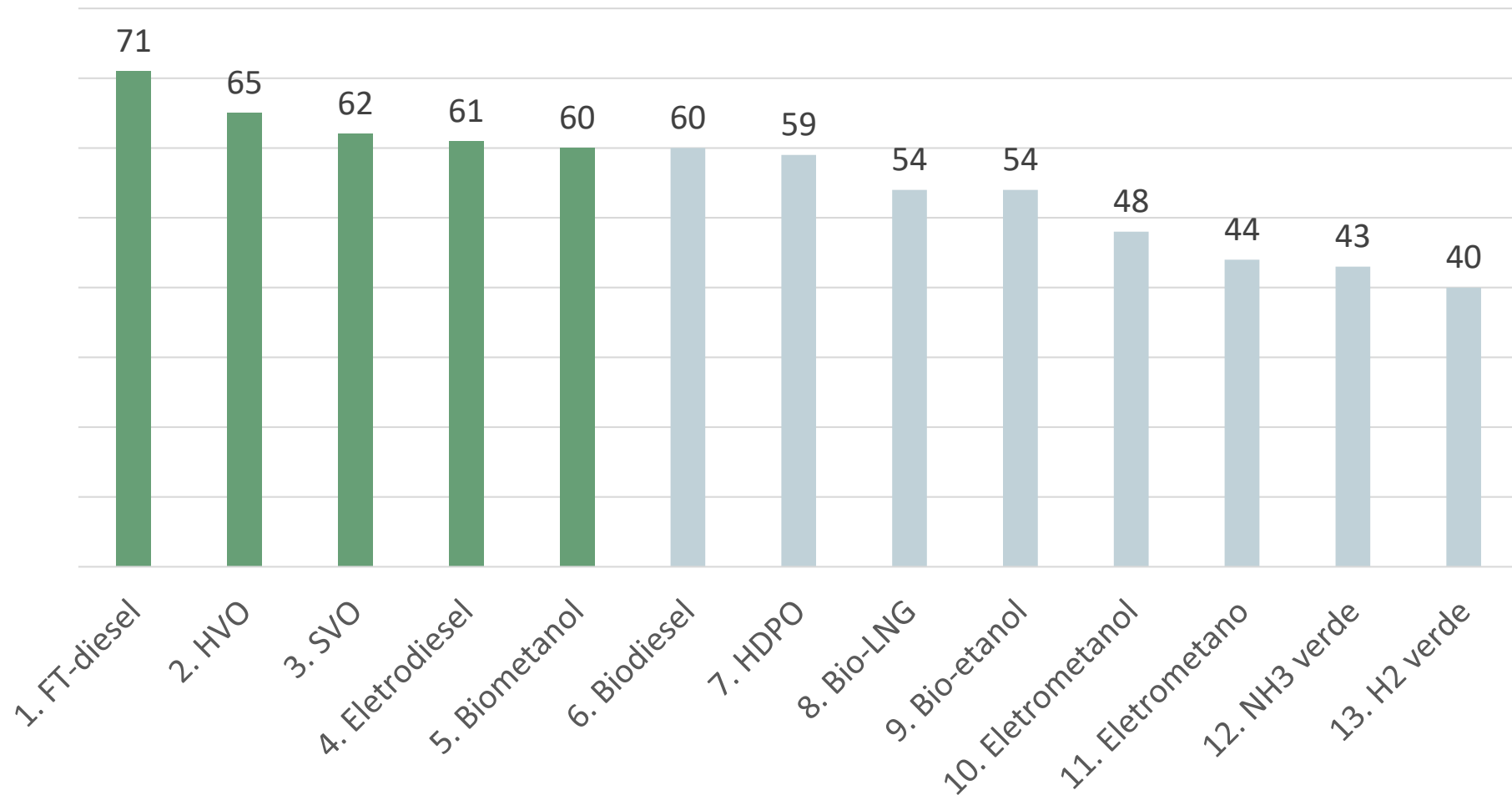
Paper

Material Suplementar

Pontuação e Ranking de Combustíveis



Pontuação e Ranking de Combustíveis



Considerações finais

- A avaliação e comparação das diferentes alternativas de combustível identificou suas principais vantagens, desvantagens e possibilidades de aplicação no setor de transporte marítimo de longa distância
- Os resultados obtidos indicam que os biocombustíveis destilados são alternativas promissoras, pelo menos no curto prazo
- O Bio-LNG representa uma alternativa de médio e longo prazo que pode não ser adequada para o transporte marítimo de longa distância - falta de infraestrutura de abastecimento e baixa densidade energética
- Hidrogênio e amônia verdes podem ser alternativas no longo prazo e em aplicações específicas: baixo desempenho em termos de custos, densidade energética e aplicabilidade
- Os eletrocombustíveis são uma opção interessante tanto do ponto de vista técnico quanto de sustentabilidade, mas ainda enfrentam desafios significativos em termos de custo e maturidade tecnológica
- Para todas as alternativas é necessário que se certifiquem suas cadeias produtivas e seu potencial de redução de emissões de GEE seja comprovado (LCA)

Obrigado.

Francielle Carvalho

franciellemcarvalho@gmail.com

W: www.cenergialab.coppe.ufrj.br

