

Organização:



Parceiros:



Ciclo de Debates sobre Petróleo e Economia

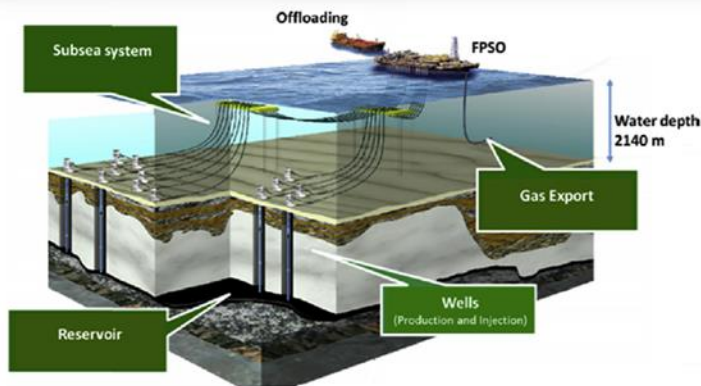
**Gás do Pré-sal: tanto, tão
distante, e tão rico em CO₂.
*Pre-salt gas: so much, so
distant, and so rich in CO₂.***

Autores: Ofélia de Queiroz F. Araújo e José Luiz de Medeiros
Authors: Ofélia de Queiroz F. Araújo e José Luiz de Medeiros

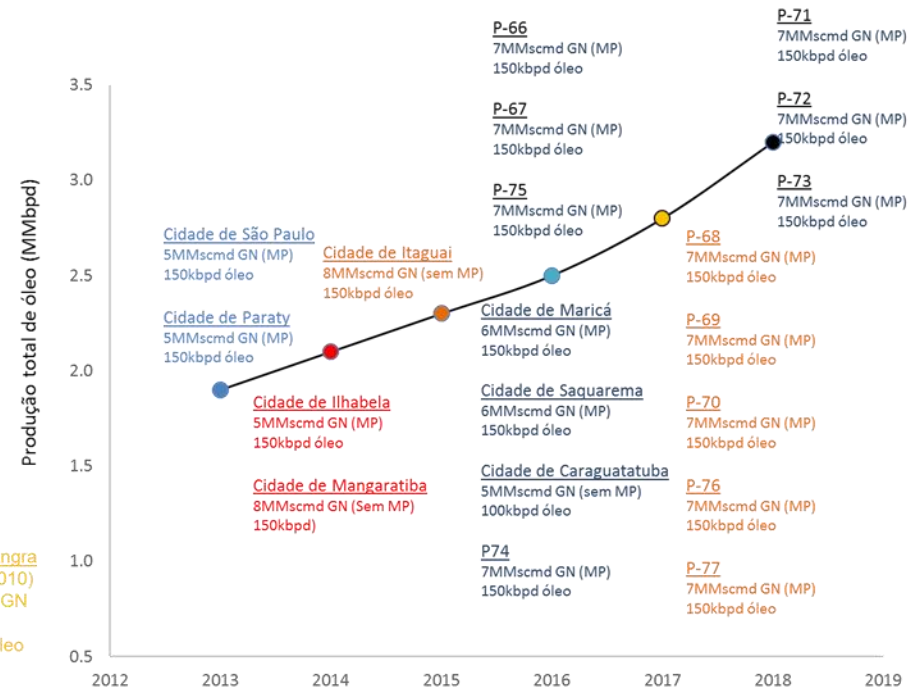
Tanto / so much



Planejamento estratégico x FPSO / Strategic Plan x FPSO



Cidade de Angra dos Reis (2010)
5MMscmd GN (MP)
150kbpd óleo



(1) (<http://www.petrobras.com/data/files/8A512A054373CE4101447376AA186289/Webcast-2030-Strategic-Plan-and-2014-2018-Business-Management-Plan.pdf>)

(2) Araújo, O. et al., Comparative analysis of separation technologies for processing carbon dioxide rich natural gas in ultra-deepwater oil fields, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.073>



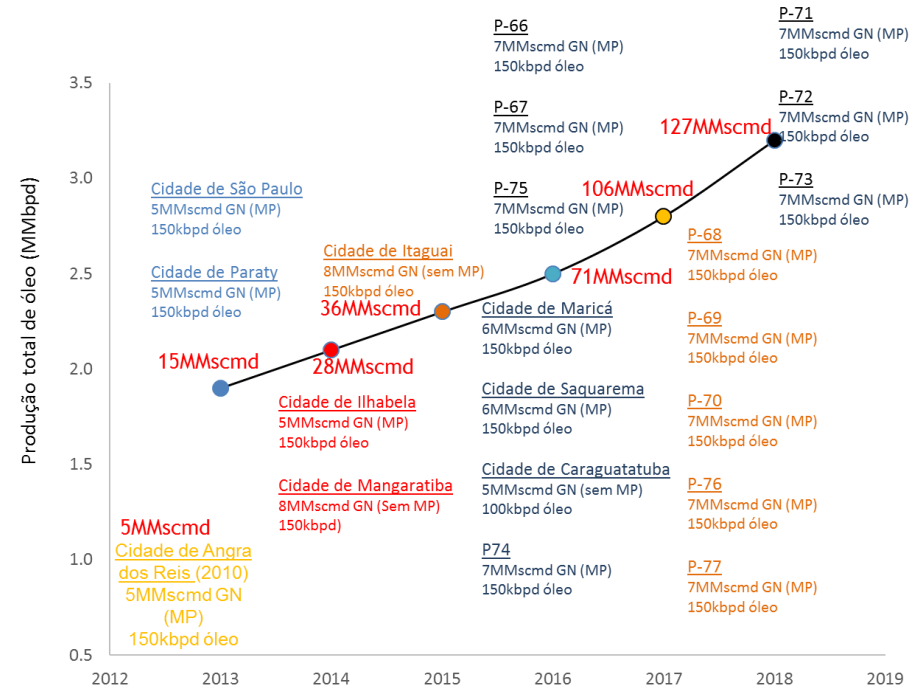
Tanto / so much



FPSOs Replicantes / Replicants FPSOs

Projeto Replicante: (1)

- GOR (gas to oil ratio) = $250\text{m}^3 \text{ gás}/\text{m}^3 \text{ óleo}$
- 150000 bpd
- **6MMm³d gás bruto** contendo 40% CO₂ no gás
- Tem capacidade para injetar todo o gás produzido ou apenas o CO₂ separado.



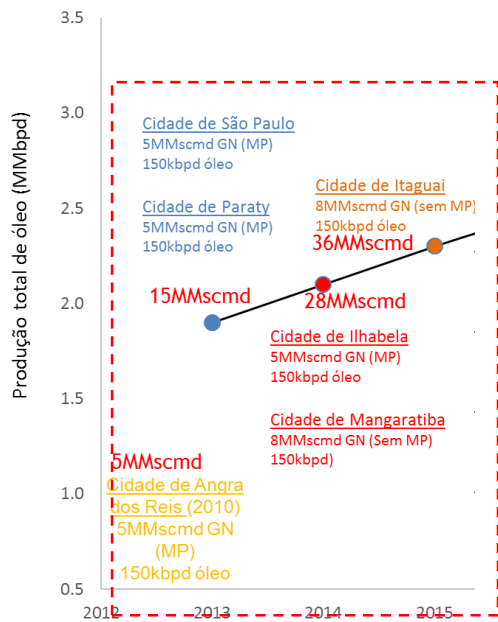
(1) C. Pinto et al. (2014), <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-25274-MS>



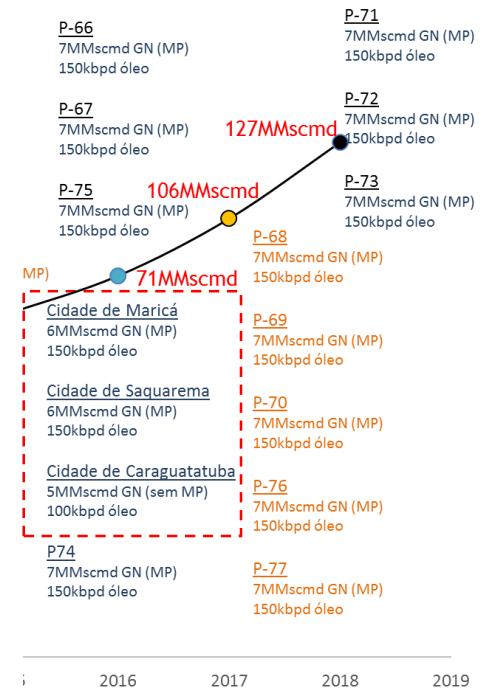
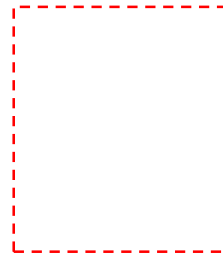
Tanto / so much



Do plano à realidade pós 2015 / *From Plan to post-2015 reality*



Estão em operação⁽¹⁾:



9 FPSOs

43MMm³d



(1) <http://www.petrobras.com/pt/magazine/post/fpso-cidade-de-marica-entra-em-operacao-no-pre-sal-da-bacia-de-santos.htm>

Tanto / so much

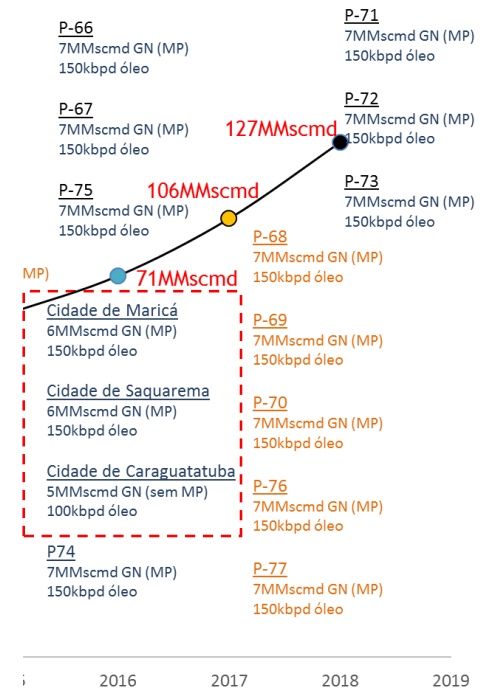
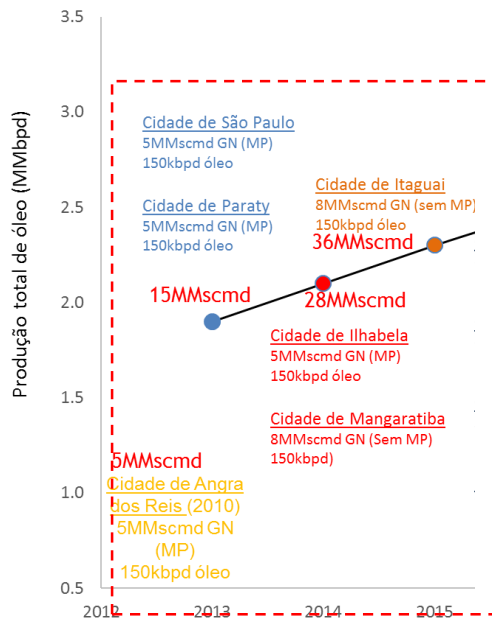


Do plano à realidade pós 2015 / From Plan to post-2015 reality

Setembro/2016:

A produção do pré-sal, oriunda de 66 poços, foi de **46,1 MMm³d** de gás natural. (ANP)⁽¹⁾

A produção brasileira de gás natural foi de **110,4 MMm³d**. (ANP) (1)



(Capacidade de projeto)

9 FPSOs

43MMm³d

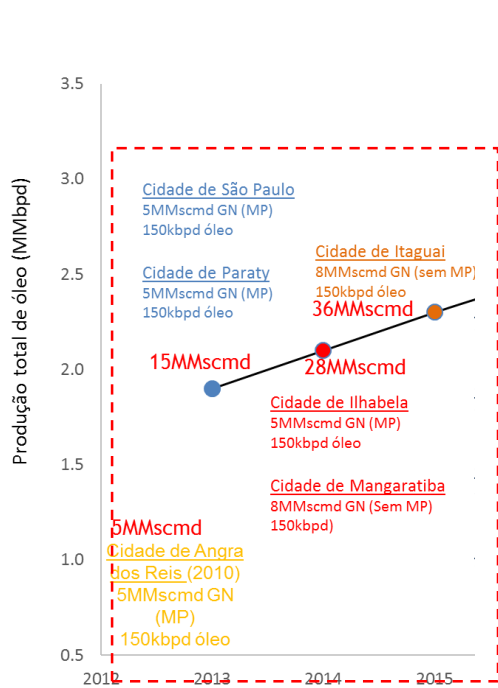


(1) www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletins-anp/boletim_de_setembro-2016.pdf. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural, [Setembro 2016 / Número 73]

Tanto / so much



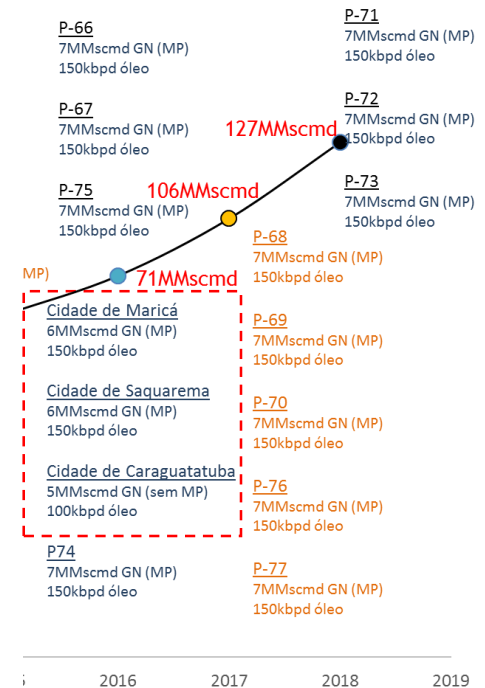
Do plano à realidade pós 2015 / From Plan to post-2015 reality



46,1 MMm³d

110,4 MMm³d.

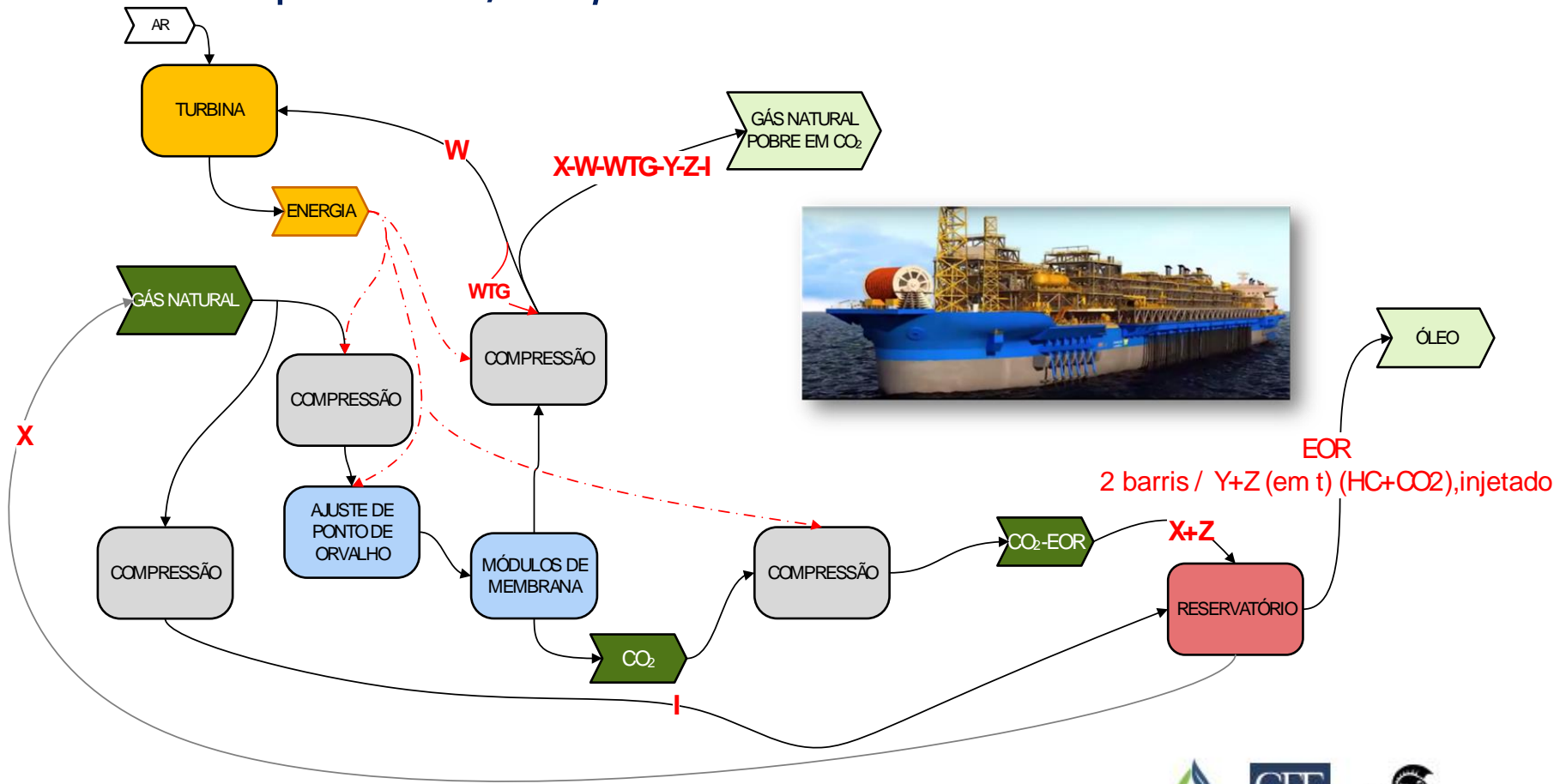
42% da produção brasileira?



Tanto / so much



FPSO Replicante / Replicant FPSO



Tanto / so much



Geração na Turbina a gás da FPSO / *Power generation in FPSO 's gas turbine*

- **Projeto** Replicante contempla **75MW** (+25MW *spare*) de capacidade de geração de energia para uso próprio ⁽¹⁾.
- **A título de comparação**, Moçambique e Zambia contrataram **termelétrica flutuante com 100mW** de capacidade de geração.
- A cidade de Mutare (na África), com 260mil habitantes necessita 200MW por dia. Ou seja, **75MW atenderiam 97.5mil habitantes de Mutare.**
- Considerando que a média brasileira é o triplo da média africana, **75MW atenderiam o consumo de 32mil brasileiros.**

22 MARCH 2016

Turkey-based Karadeniz Holding is to supply Mozambique and Zambia with 100MW through a floating power station, launched over the weekend by the two state presidents.



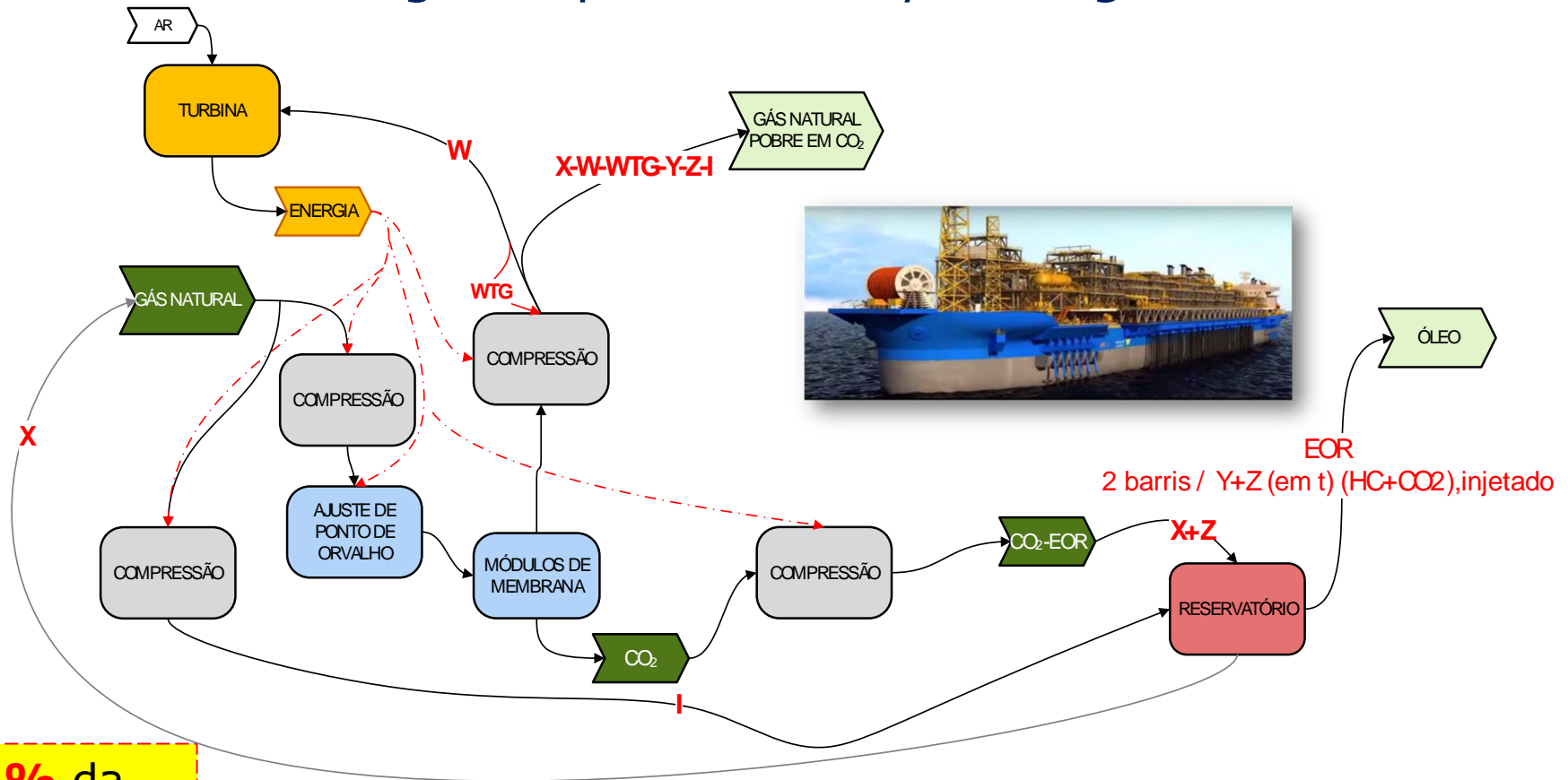
<https://www.esi-africa.com/news/mozambique-launches-100mw-floating-power-station/>

(1) C. Pinto et al. (2014), <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-25274-MS>

Tanto / so much



Estimativa do gás exportado / *Exported gas estimate*



42% da produção brasileira?

Tanto / so much



FPSO Replicante / Replicant FPSO

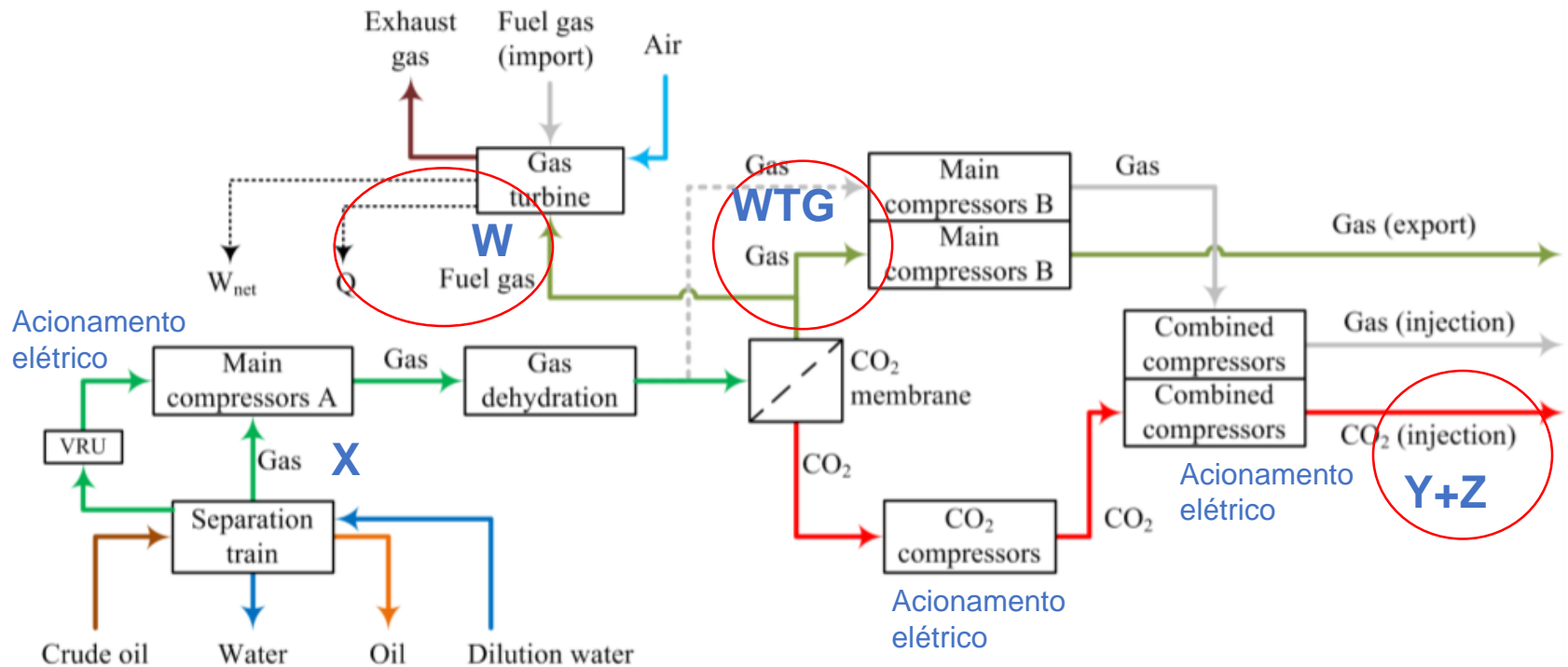


Table 5. Power consumption [kW] and *percentage* for FPSO systems

Separation process	VRU		MC-A		MC-B		CO ₂		CC							
					Injection	Export	compression	Gas	CO ₂							
Mode 1	34	0.2	314	2.1	6283	42.8	5076	34.6	-	-	2959	20.2	-	-		
Mode 2	86	0.5	788	4.4	7126	40.1	3057	17.2	2581	14.5	2176	12.2	1604	9.0	347	2.0
Mode 3	192	0.4	2048	4.7	19028	45.5	-	-	19886	45.4	1508	3.4	-	-	241	0.6

$WT \cong WTG$

http://orbit.dtu.dk/files/115270167/Paper_Cobem2015_Carranza_Oliveira_Mendes_Nguyen.pdf

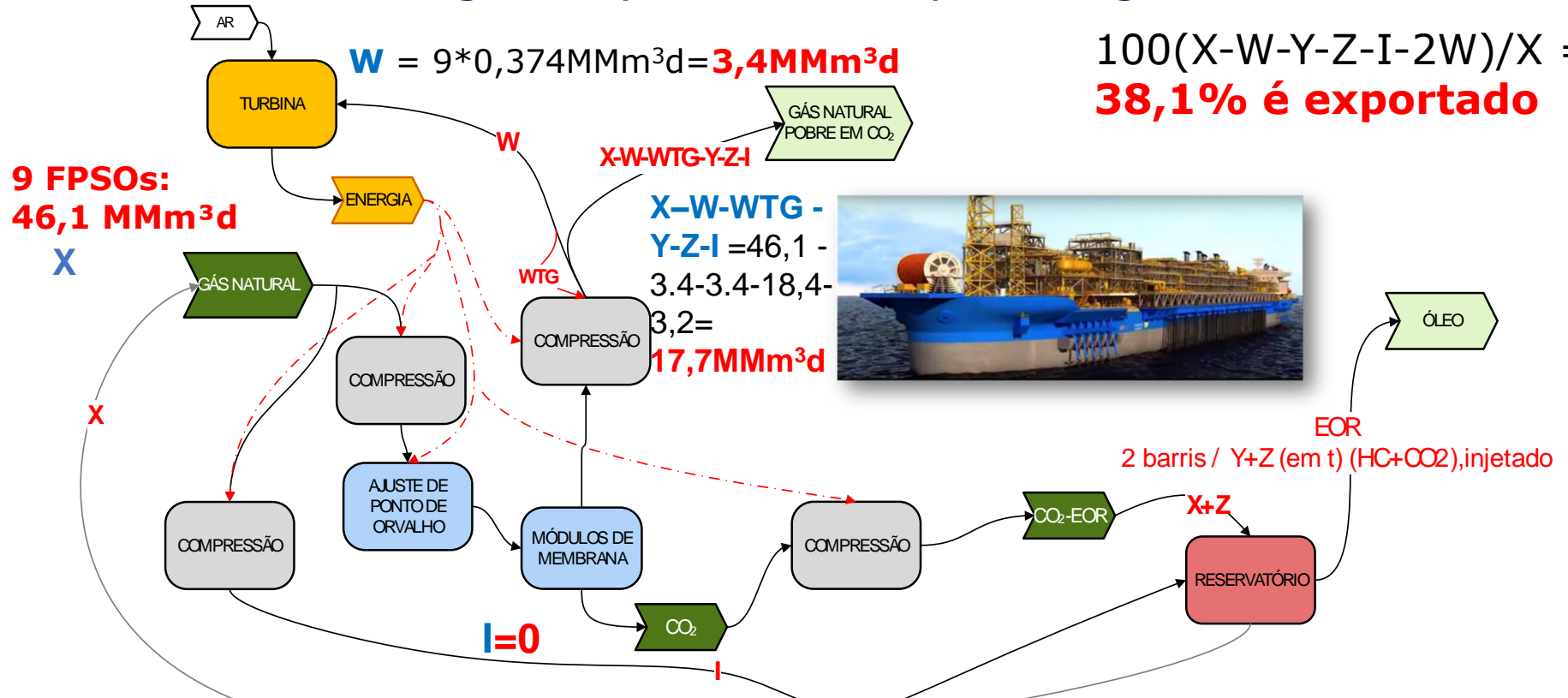


Tanto / so much



Estimativa do gás exportado / Exported gas estimate

$$100(X-W-Y-Z-I-2W)/X = 38,1\% \text{ é exportado}$$



42% da produção brasileira?

$$17,7 / ((110 - 28,4) \times 100) = 21,7\%$$

Y = 9*0,4*46,1 = 18,4MMm³d CO₂ INJETADO

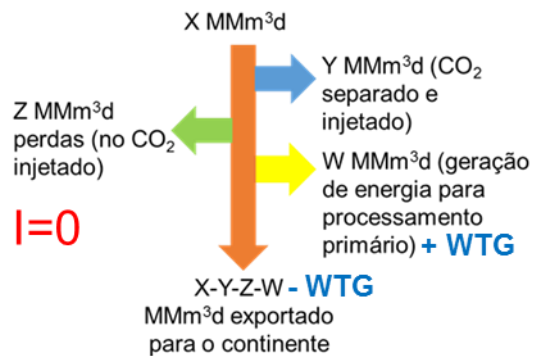
Z = 0,15*Y/0,85 = 3,2MMm³d PERDA DE HIDROCARBONETOS



Tanto / so much



FPSOs Replicantes / *Replicants* FPSOs

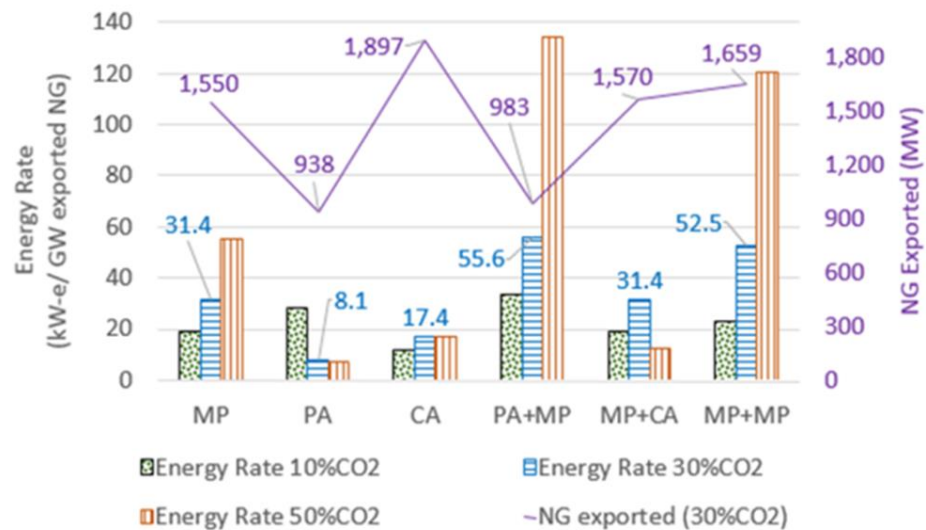


$$(X-Y-Z-W-WTG)/X = ?$$

Depende de:

- Teor de CO₂ no gás bruto
- Tecnologia de separação de CO₂

6MMm³d de gás natural bruto

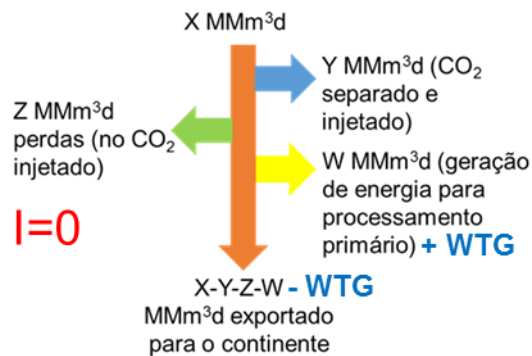


Araújo et al., Comparative analysis of separation technologies for processing carbon dioxide rich natural gas in ultra-deepwater oil fields, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.073>

Tanto / so much



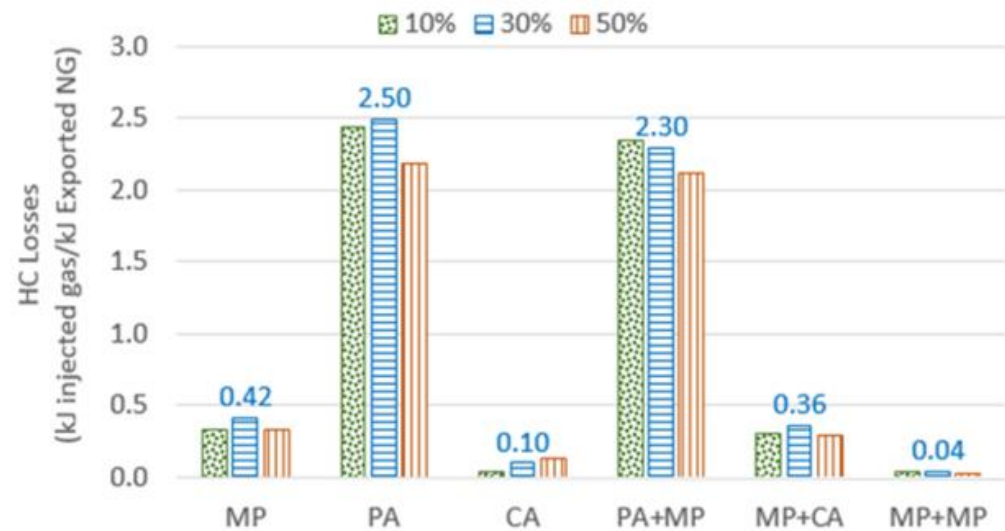
FPSOs Replicantes / Replicants FPSOs



$$(X - Y - Z - W - \text{WTG}) / X = ?$$

Depende de:

- Teor de CO_2 no gás bruto
- Tecnologia de separação de CO_2

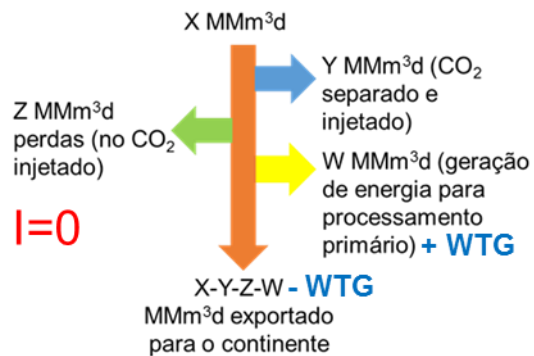


Araújo et al., Comparative analysis of separation technologies for processing carbon dioxide rich natural gas in ultra-deepwater oil fields, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.073>

Tanto / so much



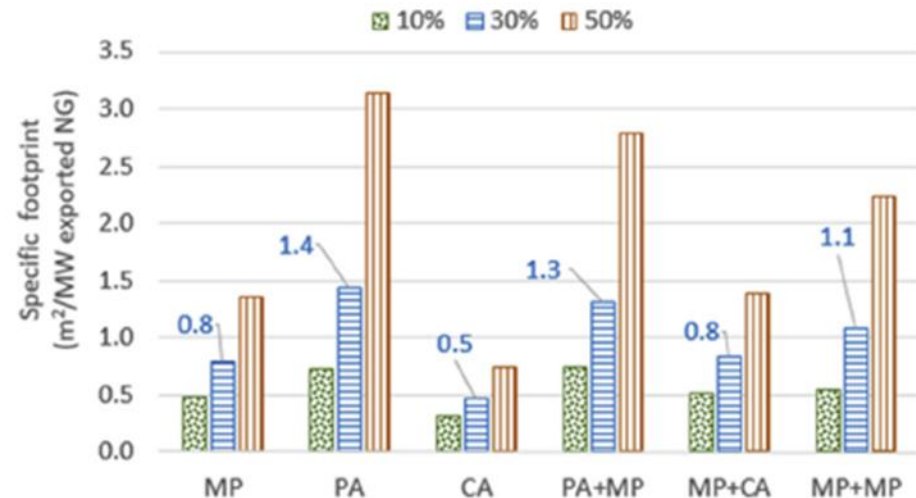
FPSOs Replicantes / *Replicants FPSOs*



$$(X - Y - Z - W - \text{WTG}) / X = ?$$

Depende de:

- Teor de CO_2 no gás bruto
- Tecnologia de separação de CO_2

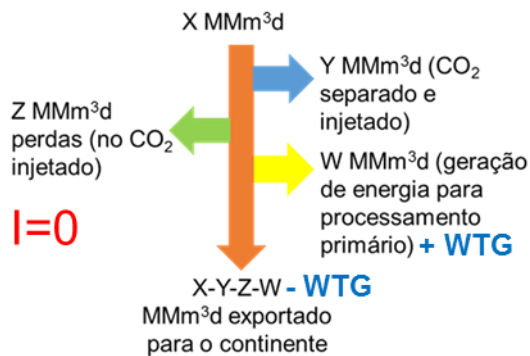


Araújo et al., Comparative analysis of separation technologies for processing carbon dioxide rich natural gas in ultra-deepwater oil fields, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.073>

Tanto / so much



FPSOs Replicantes / Replicants FPSOs

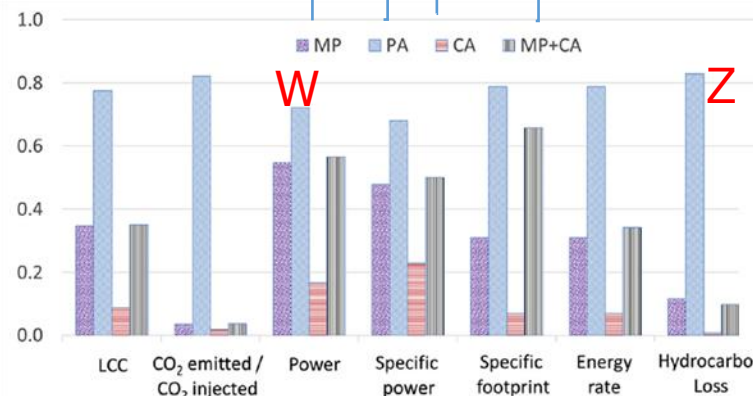


$$(X-Y-Z-W-WTG)/X = ?$$

Depende de:

- Teor de CO₂ no gás bruto
- Tecnologia de separação de CO₂

0.87\$/MMBTU
 1.41\$/MMBTU
 0.54\$/MMBTU
 0.87\$/MMBTU
 $Y=30\%X$



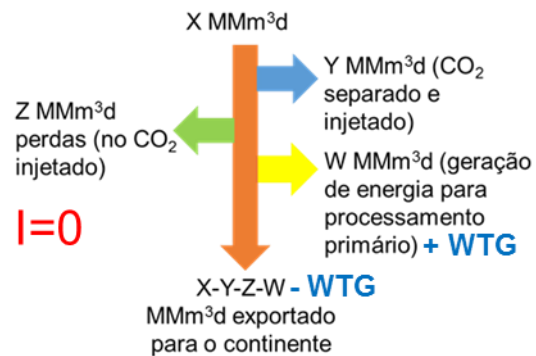
Não inclui peneiras moleculares nem remoção de H₂S

Araújo et al., Comparative analysis of separation technologies for processing carbon dioxide rich natural gas in ultra-deepwater oil fields, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.073>

Tanto / so much



FPSOs Replicantes / *Replicants FPSOs*

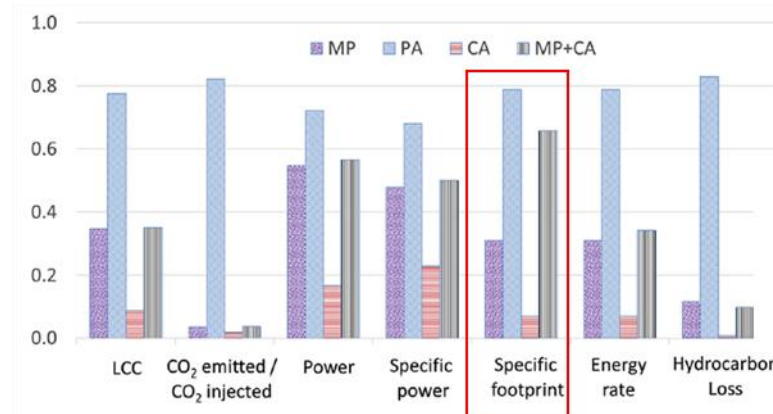


$$(X - Y - Z - W - \text{WTG}) / X = ?$$

Depende de:

- Teor de CO_2 no gás bruto
- Tecnologia de separação de CO_2

Não basta ser barato, tem que ser pequeno



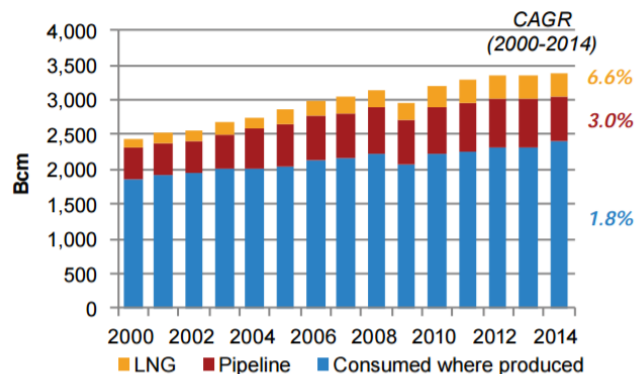
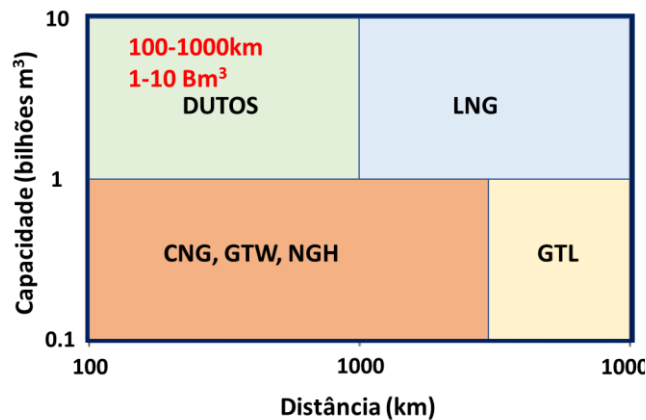
Araújo et al., Comparative analysis of separation technologies for processing carbon dioxide rich natural gas in ultra-deepwater oil fields, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.073>

Tão distante/ *so distant*

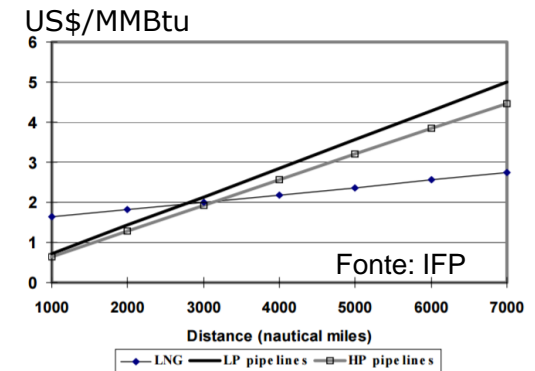


Condições de contorno locais / *Local boundary conditions*

- Gás não-convencional: distante, alto nível de impureza (CO₂) e não pode ser consumido localmente, precisando ser transportado.
- A **distância do gás não-convencional** ao mercado é o fator chave na seleção do **modal de transporte**.



Note: CAGR = Compound Annual Growth Rate
Sources: IHS, BP Statistical Review of World Energy



Tão distante/ *so distant*



Custos de transporte / Transport costs

- **Distância de breakeven entre gasodutos (42" onshore) e LNG é cerca de 4500 km a um custo ~\$1.60/Mbtu (1).**
- **Típico LNG (2735km do Egito à Espanha (2) - (Capacidade: 3.5Mtpa ou 4.8 Bm³a. Planta de liquefação: 1.0 US\$/MMBtu; Transporte: 0.40 US\$/MMBtu; Regaseificação: 0.41 US\$/MMBtu): **1.81 US\$/MMBtu.****
- **Típico Duto (MEDGAZ da Algéria à Espanha)⁽²⁾ - Capacidade: 8 Bm³a, distância (onshore) de 745km: **0.72 US\$/MMBtu.****



- (1) <http://pages.hmc.edu/evans/PipelinesTokyo.pdf>
- (2) https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bs/INDES/indes-pc2_paper.pdf
- (3) <http://www.ogj.com/articles/print/volume-111/issue-02/special-report--worldwide-pipeline-construction/worldwide-pipeline-construction-crude-products.html>

Tão distante/ *so distant*



Custos de transporte / Transport costs

- **Dutos Onshore x Offshore (base EUA):** Onshore: \$4.99 MUS\$/km (2012), Offshore: \$8.64 MUS\$/km (2009)⁽²⁾ (CEPCI 2009 = 521.9, CEPCI 2012 = 584.6). → **Offshore/Onshore = 1.94.**
- **Custo estimado de transporte por dutos submarinos (FPSO → UPGN):** **1.4 US\$/MMBtu**



- (1) <http://pages.hmc.edu/evans/PipelinesTokyo.pdf>
- (2) https://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bs/INDES/indes-pc2_paper.pdf
- (3) <http://www.ogj.com/articles/print/volume-111/issue-02/special-report--worldwide-pipeline-construction/worldwide-pipeline-construction-crude-products.html>

Quanto custa/ *how much it costs*

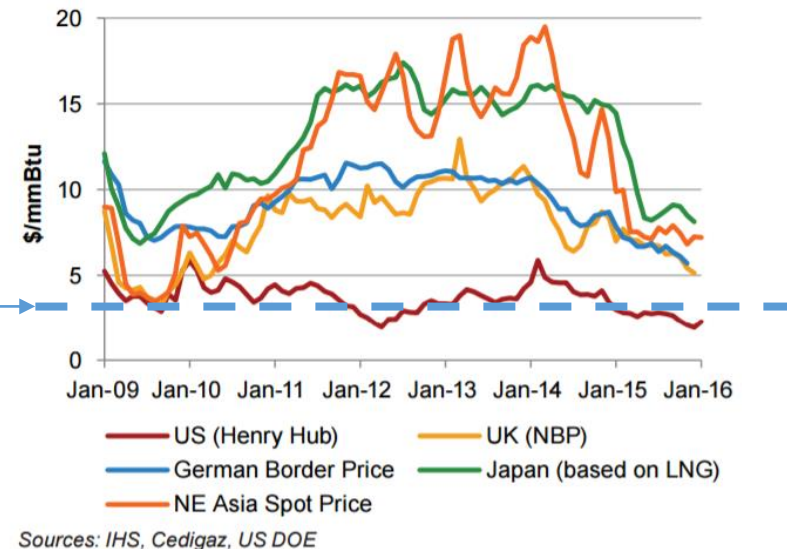


Estimativa (**grosseira**) de custo / (**rough**) cost estimate

- Transporte por dutos submarinos (FPSO → UPGN): 1.4 US\$/MMBtu
- Processamento primário (FPSO com MP): \$ 0.87 US\$/MMBtu (**estimativa grosseira**)
- Custo de processamento (UPGN)⁽¹⁾: 0.7 US\$/MMBtu

→ **Custo na saída da UPGN:**
2.97 US\$/MMBTU

- Preço do gás natural do Pré-Sal processado no COMPERJ:
13.19US\$/MMBTU⁽²⁾



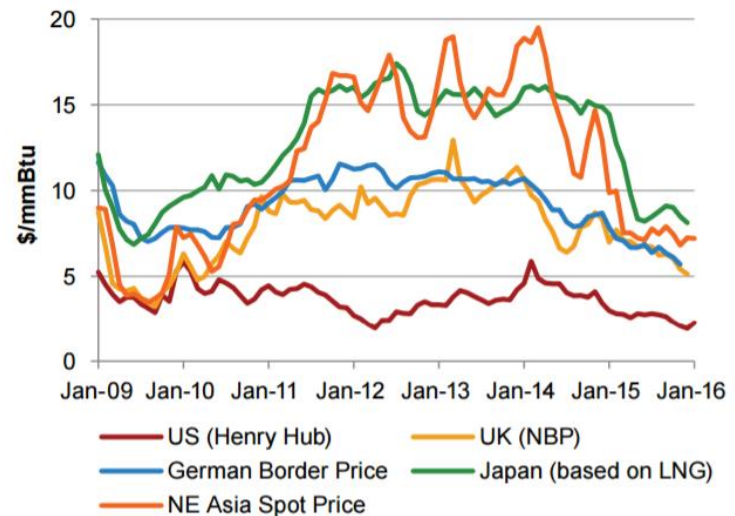
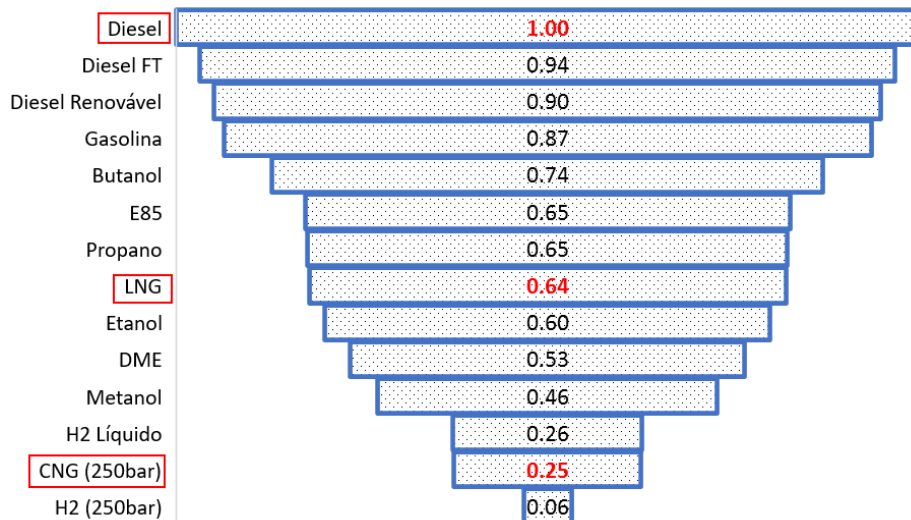
(1) www.huntleyinc.com/wp-content/.../PIOGA-Gas-Pricing-and-Economics-sheet.pdf

(2) EPE, Relatório sobre o Requerimento para construção do Gasoduto Guapimirim II:

Baixa densidade energética / *Low energy density*

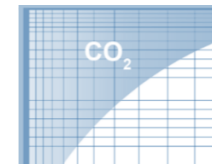
Condições de contorno globais / *Global boundary conditions*

O gás natural tem **baixa densidade energética** (energia/volume), e preço deprimido no mercado internacional.



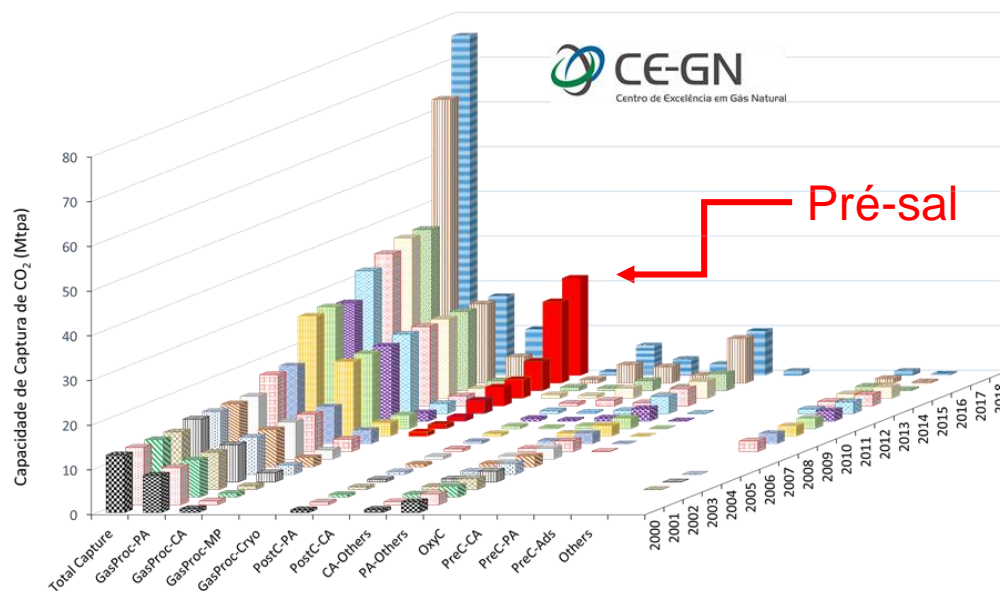
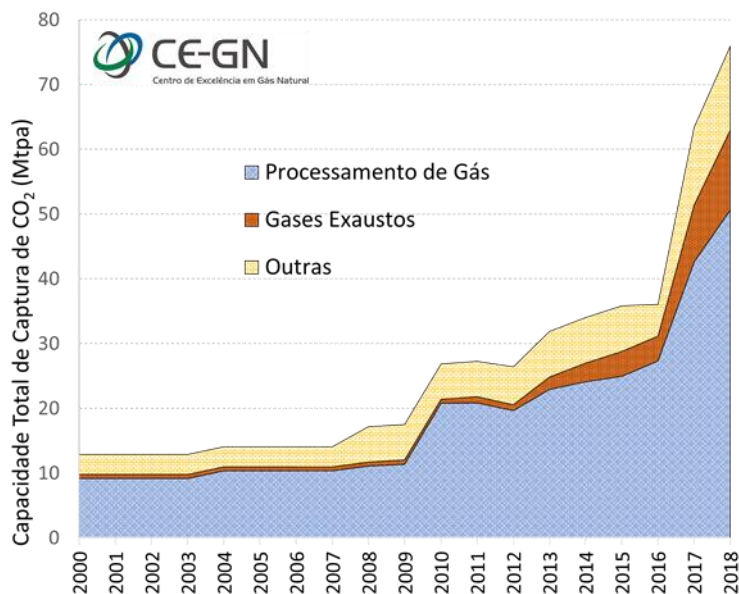
Sources: IHS, Cedigaz, US DOE

Tão rico em CO₂ / So rich in CO₂



Desafiando o estado-da-arte / *Challenging state-of-the-art*

Assumindo 20% de CO₂ (conservador), 1Mtpa⁽¹⁾ CO₂ injetado (Piloto de Lula) afeta o cenário mundial de tecnologias de captura e sequestro de CO₂.



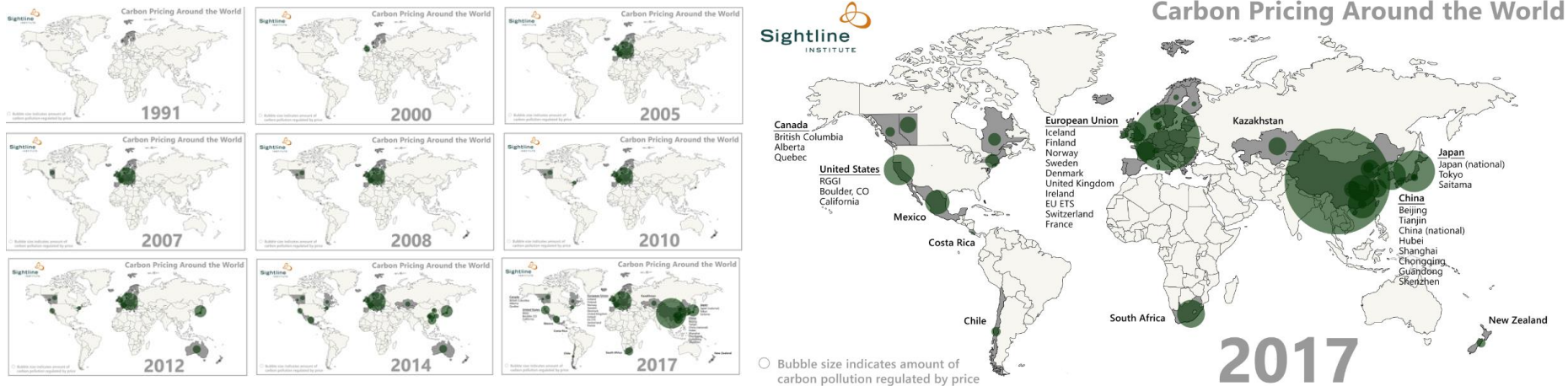
(1) <https://www.globalccsinstitute.com/projects/petrobras-santos-basin-pre-salt-oil-field-ccs-project>



Políticas ambientais/ *Environmental policies.*

Barreiras ambientais / *Environmental Hurdles*

Relevância no cenário de Captura e Sequestro de CO₂: Pré-Sal pode ser o destino geológico de CO₂ capturado onshore e offshore.

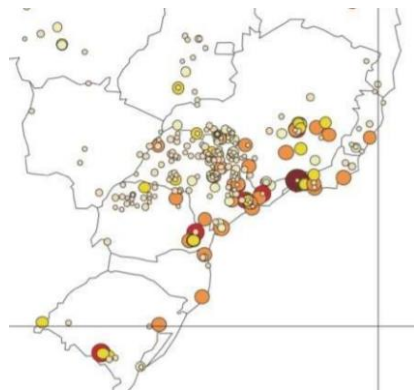


<http://sightline.wpengine.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2014/11/global-carbon-programs-map-111714b-2083pxl.gif>

Políticas ambientais/ *Environmental policies.*

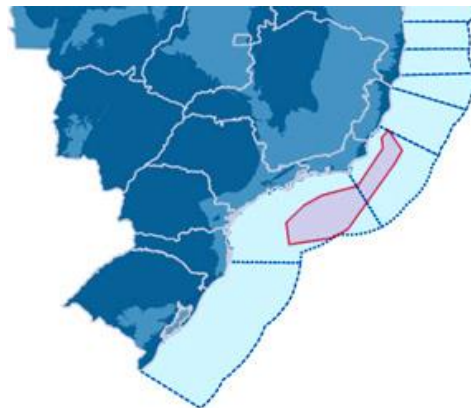
Barreiras ambientais / Environmental Hurdles

Relevância no cenário de Captura e Sequestro de CO₂: Pré-Sal pode ser o destino geológico de CO₂ capturado onshore e offshore.



Emissões de CO₂
(kT/ano)

- < 250
- 250 to 500
- 500 to 750
- 750 to 1000
- 1000 to 2000
- 2000 to 3000
- 3000 to 5000
- > 5000



Polígono do Pré-Sal



<http://licenciamento.ibama.gov.br/Dutos/Gasoduto/Gasoduto%20Rota%203/03%20%20Caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20do%20Empreendimento/03%20%20Caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20do%20Empreendimento.pdf>

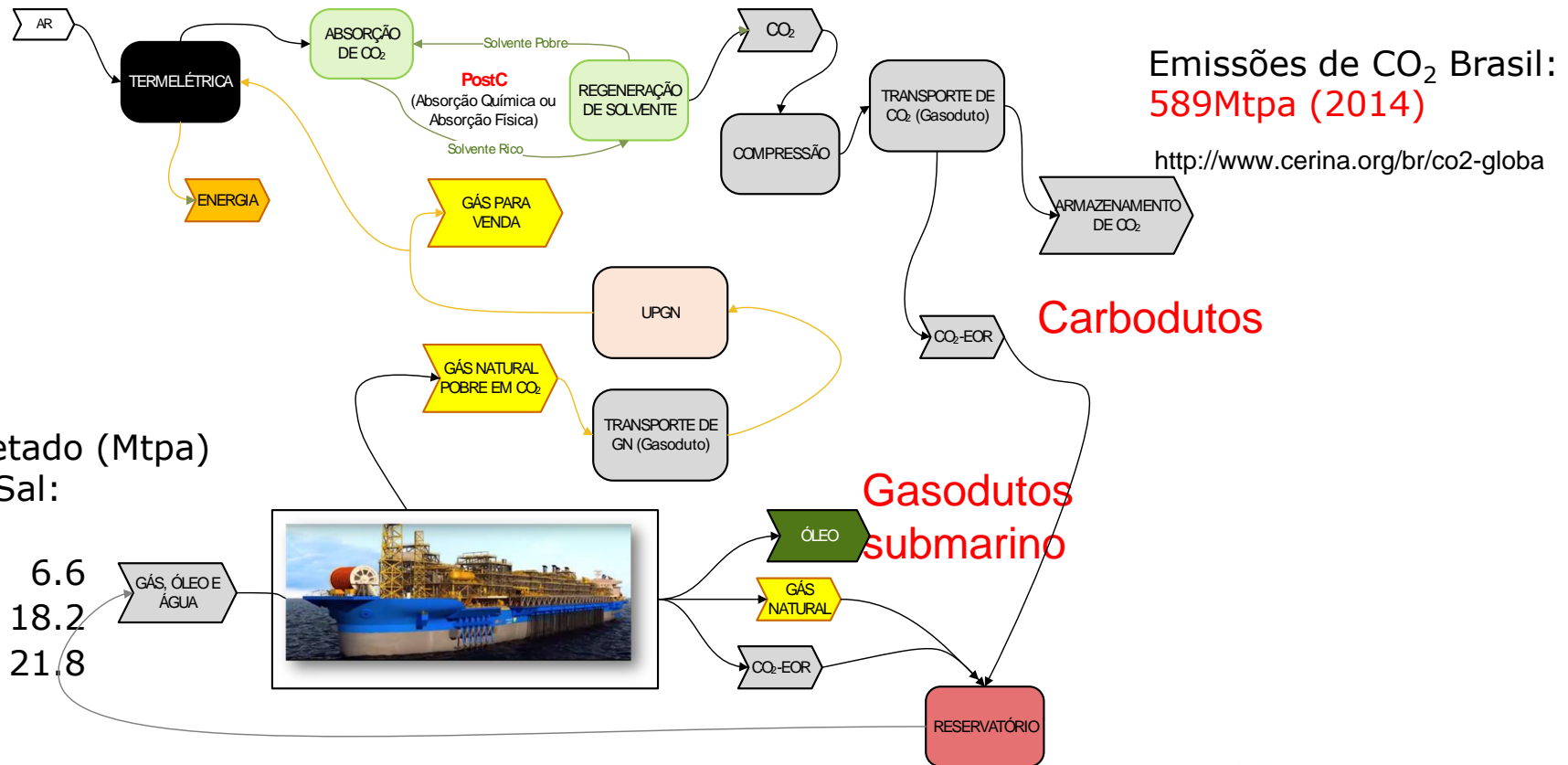
http://www.pucrs.br/cepac/download/CEPAC_FOLHETO.pdf



Cadeia Produtiva GN / NG

Supply chain

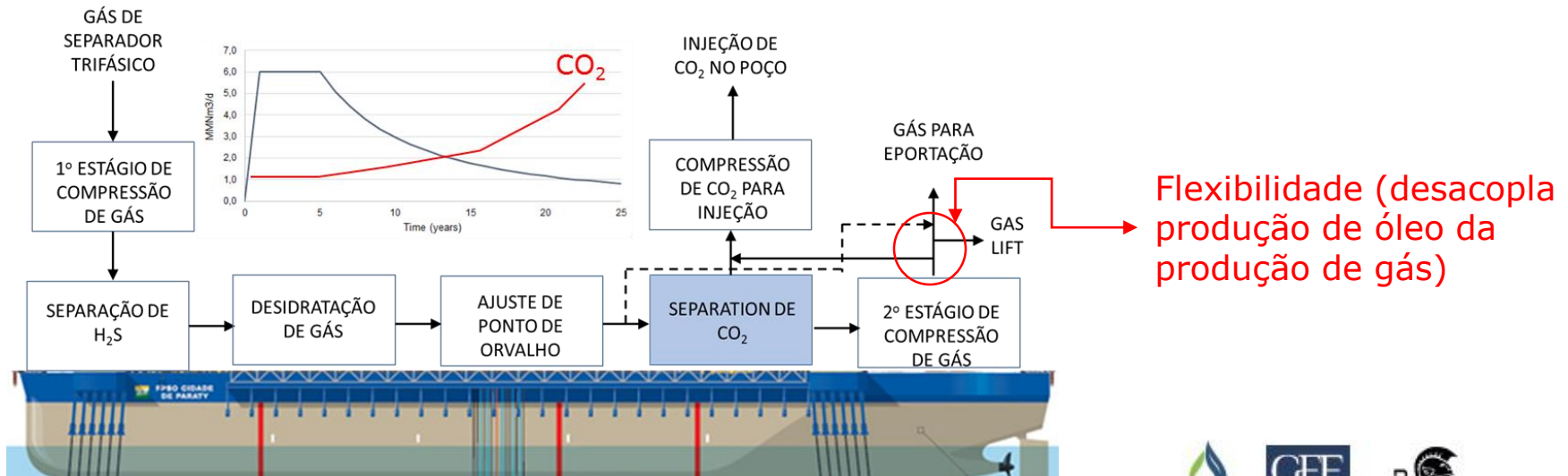
O grande quadro com CCS / *The big Picture with CCS*



FPSO

Cenário dinâmico / *Dynamic scenario*

- Com a injeção de CO₂ continuada (1Mtpa/FPSO), o **reservatório enriquece em CO₂ ao longo da operação.**
- Há declínio da produção.
- **Demanda incerta** onshore de gás natural (despacho de termelétricas).
- Para maior flexibilidade, e possibilidade de aumentar a produção (EOR com gás natural), **contempla injeção de CO₂ ou do gás natural** ⁽¹⁾.



FPSO (GOR 250→500m³/m³)

Topside sem espaço / *No room left on topside*

Projeto para GOR=500m³/m³: (1)

- Manter a produção de óleo do Projeto Replicante (150kbpd) significa produzir **12MMm³d**. Redução para 100kbpd, corresponderá a 8MMm³d.
- Demanda energética sobe para 100MW, contra 75MW dos Replicantes (GOR=250).
- Os replicantes já ocupam 95% da área do deck (VLCC).
- O peso do topside está limitado a 25kt em VLCC, os Replicantes já apresentam 22kt.
- **Novo arranjo topside torna-se necessário.**

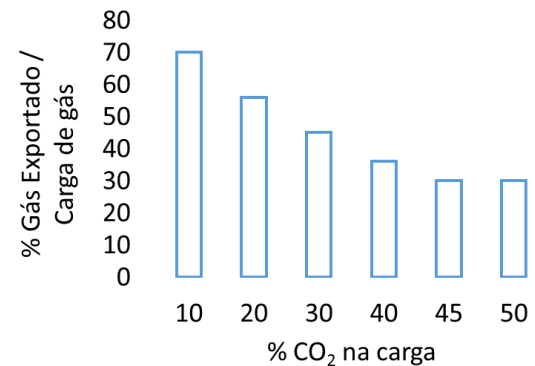


(1) C. Pinto et al. (2014), <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-25274-MS>

FPSO (GOR 250→500m³/m³)

Gás exportado em função de CO₂ na carga / *Exported gas as function of CO₂ in feed gas*

- **Gás exportado frente à elevação de CO₂ na carga⁽¹⁾ diminui em 25%** (em relação aos Replicantes, projetados para 45% de CO₂)
- Para manter 150kbpd, separação precisaria ser eliminada, mantida a concepção de projeto dos Replicantes⁽¹⁾.



RGO		250 m ³ /m ³ (Replicantes)	500 m ³ /m ³		
Vazão de óleo (kbpd)		150 (Replicantes)	100	150	180
Vazão de gás (Milhão m ³ /d)		6	8	12	14
Energia requerida (MW)		88	100	150	250
Peso do topside (kton)	Sem remoção de CO ₂	-	22	25	40
	Com remoção de CO ₂	22	25	32	45
Área utilizada (%)	Sem remoção de CO ₂	86	90	100	162
	Com remoção de CO ₂	95	100	110	180

Projeto	Modec FPSO Membrane Skid	Petrobras TUPI BV Replicant CO ₂ Removal Units	ONEROSA Separex Membrane Module Project
Localização	Brasil	Brasil	Brasil
Ano	2009	2014	2015
Dimensões: lagura x comprimento x altura (m)	10,8 x 15,5 x 16,6	15 x 20 x 22	18 x 20 x 19,5
Área ocupada (m ²)	167,4	300	360
Peso (toneladas)	375	700	663

(1) C. Pinto et al. (2014), <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-25274-MS>

Compressores / Compressors

Esforço de compressão / *Compression effort*

Compressores das FPSOs

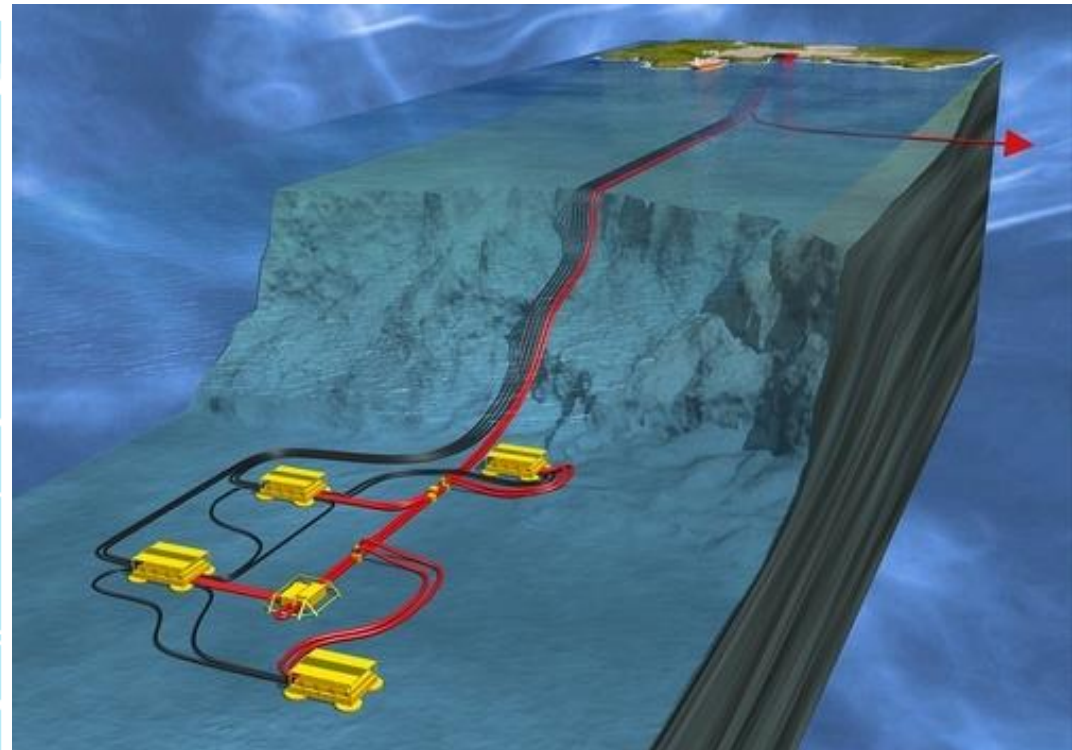
FPSO Cidade de São Paulo (Guará)	Peso (toneladas)
CO2 COMPRESSION SKID A	668
CO2 COMPRESSION SKID B	711
CO2 COMPRESSION STAIR TOWER	32
REINJECTION COMPRESSION SKID A	418
REINJECTION COMPRESSION SKID B	416
MAIN COMPRESSION A SKID A	514
MAIN COMPRESSION A SKID B	453
MAIN COMPRESSION B SKID A	530
MAIN COMPRESSION B SKID B	510
PESO TOTAL	4252

FPSO Cidade Angra dos Reis	Peso (toneladas)
Módulo de Injeção de CO2	832
Módulo de Injeção de água	978
Módulo de Compressão e Reinjeção de Gás	767

aibel.com/en/docs/dokumenter/presentation-thailand

Alternativas tecnológicas / *Technological alternatives*

"Engenharia fora da caixa" / "Out-of-the-box engineering"

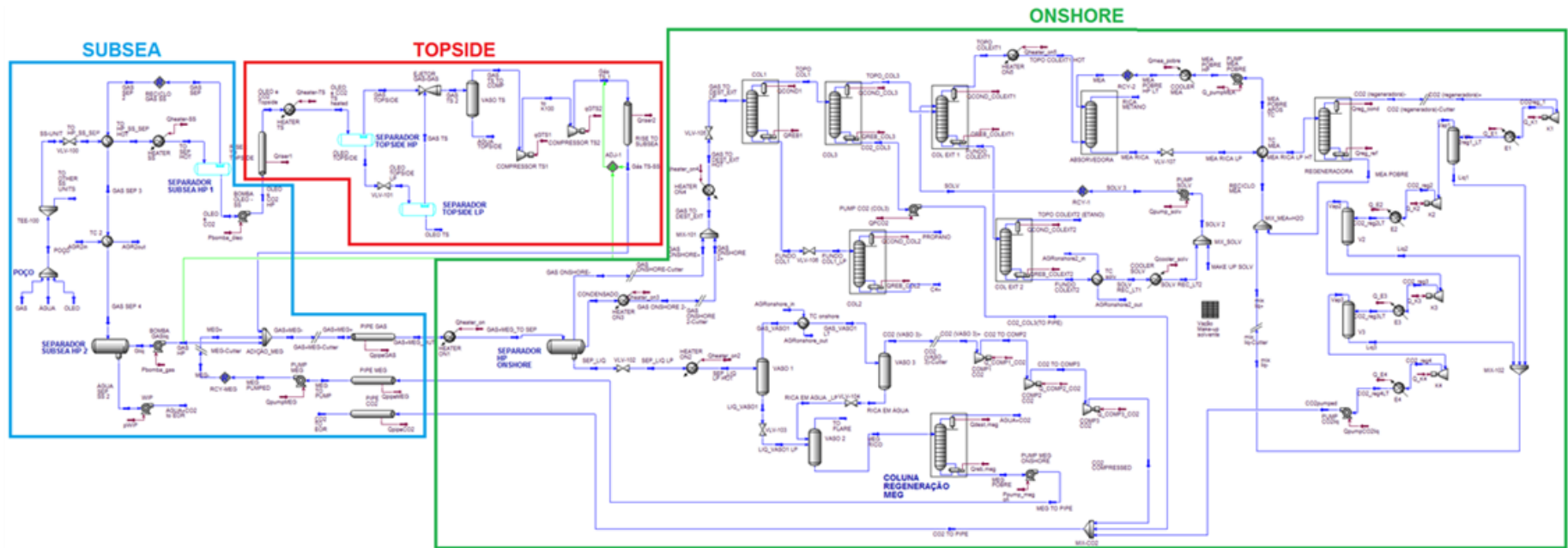


<http://www.norskolje.museum.no/havbunnen-paa-ormen-lange-feltet-er-mer-enn-1000-meter-under-havoverflaten/>



Alternativas tecnológicas / *Technological alternatives*

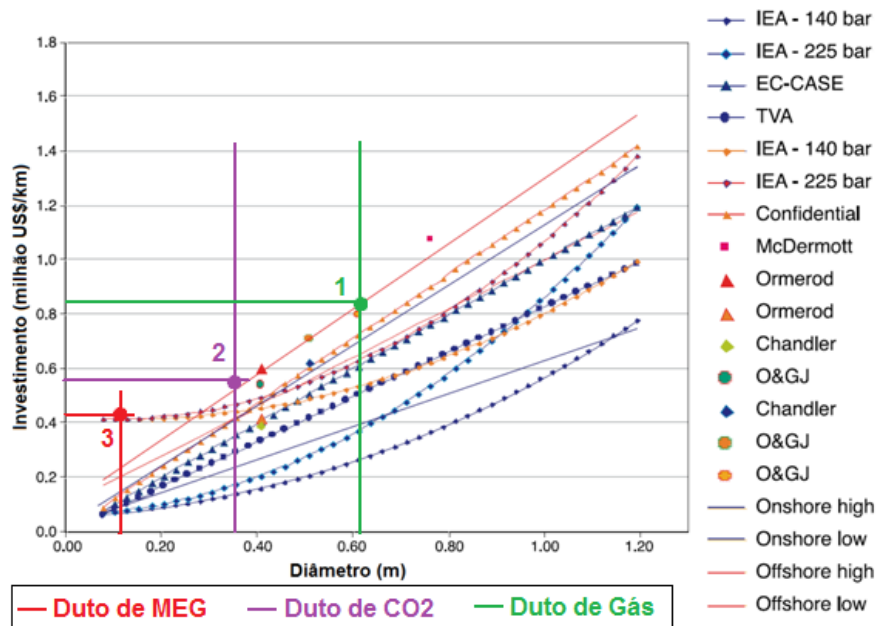
"Engenharia fora da caixa" / "Out-of-the-box engineering"



Jéssica dos Santos Cruz de Almeida, PRODUÇÃO OFFSHORE DE GÁS NATURAL RICO EM CO2: CENÁRIO DUTOS SUBSEA COM MEG E PROCESSAMENTO ONHORE, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2016

Alternativas tecnológicas / Technological alternatives

Esforço de engenharia é necessário / Engineering effort is required



Duto de CO2 de Snohvit	
Custo (milhões US\$)	72,58
Diâmetro (in)	8
Comprimento (km)	160
Custo específico (milhões US\$/in/km)	0,057
Duto de CO2 proposto	
Custo (milhões US\$)	192,8
Diâmetro (in)	7
Comprimento (km)	350
Custo específico (milhões US\$/in/km)	0,039

Jéssica dos Santos Cruz de Almeida, PRODUÇÃO OFFSHORE DE GÁS NATURAL RICO EM CO₂: CENÁRIO DUTOS SUBSEA COM MEG E PROCESSAMENTO ONHORE, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, 2016

Comentários finais / *Final remarks*

Os desafios puxam as inovações / *Challenges pull innovations*

Desafios:

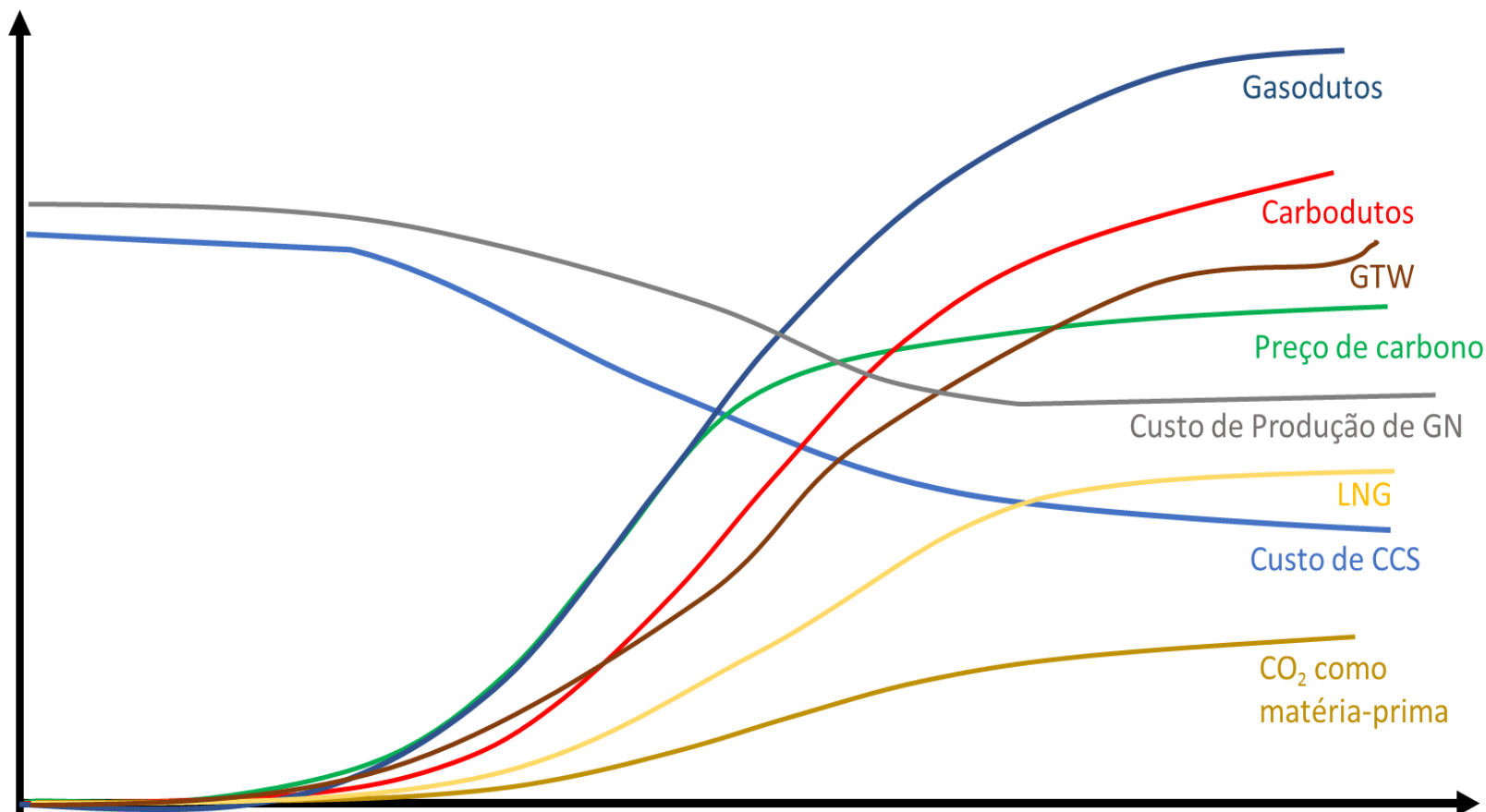
- GOR (*gas to oil ratio*, m^3 gás / m^3 óleo): 500 Teor de CO_2 no gás bruto: 50% (Libra), (80% Júpiter)

Inovações:

- Hub de Gás Natural
- Hub de CO_2
- Pré-Sal destino para CCS
- GTW com CCS
- Offshore híbrido com Onshore (Dutos subsea e separação criogênia onshore), FPSO parcialmente liberada do processamento de gás poderá ter produção de óleo aumentada.
- Modelos de Replicantes adaptados para novos cenários
- Projetos flexíveis



Bola de cristal / *Crystal ball*





ofelia@eq.ufrj.br
www.h2cin.org.br

