



# Desafios na medição de vazão de petróleo e gás natural nos campos do Pré-Sal

**José A. Pinheiro**  
*PETROBRAS E&P*  
São Paulo, 14/10/2010

# Conteúdo

1. Cenário atual
2. Métodos de medição
3. Normas técnicas e regulamentação
4. Requisitos metrológicos
5. Tecnologias empregadas
6. Desafios do pré-sal
  1. Medição de grandes volumes transferidos
  2. Medição de CO<sub>2</sub> injetado
  3. Medição do gás de tocha (flare)
  4. Medição analítica em linha
  5. Compensação de CO<sub>2</sub> nas correntes de gás
  6. Medição multifásica
  7. Medição criogênica de GNLE
7. Conclusões

# 1. Cenário atual

- produção mundial de petróleo:
  - 2010: 86.5 milhões bbl/d
  - 2030 (projeção): 31 milhões bbl/d
  - 2030 (demanda global): 106 milhões bbl/d
  - Diferença (75 milhões bbl/d):
    - Incorporação de novas descobertas
      - Pré-sal: 1 milhão bbl/d (em 2017)
    - Fontes alternativas de energia
    - Maior eficiência energética

## 2. Métodos de medição

- Cálculo da vazão de um petróleo produzido na condição de base ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 101,325 \text{ kPa abs}$ ):
  - dados necessários:  $T_{op}$ ,  $P_{op}$ ,  $\rho_{\text{líq base}}$
  - Algoritmos do computador: MF (meter factor), calibração + conversão condição base
  - Equação básica:  $Q_b = MF \times CTL \times CPL \times Q$
  - Com densímetro em linha:  $Q_b = \frac{MF}{\rho_b} \times Q \times \rho$
  - Operações com medidores mássicos:  $Q_b = MF \times \frac{Q_M}{\rho_b}$

## 3. Normas técnicas e regulamentação

- sistemas de medição dos volumes de petróleo e gás natural seguem normas técnicas internacionais consolidadas por entidades tradicionais:
  - ISO – International Organization for Standardization;
  - API – American Petroleum Institute;
  - AGA – American Gas Association;
  - OIML – Organisation Internationale de Métrologie Légale.
- Em nível nacional
  - ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
  - INMETRO, SBM, ANP e IBP
    - Comprovação metrológica
      - » Metodologia de cálculo dos volumes
      - » Incertezas associadas
      - » Verificações e calibrações
    - processos de medição

# 4. Requisitos metrológicos

ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

- **Requisitos metrológicos: para equipamentos de medição e para os processos de medição**
  - Garantir uma comprovação metrológica
    - Expressos como: erro máximo permissível, incerteza, faixa, estabilidade, resolução, condições ambientais, habilidades do operador.
      - Incerteza: parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando: ISO GUM (guia de incerteza de medição)
      - Erro máximo admissível: OIML R117 (INMETRO 64:2003)
        - » Linha A: sistema; linha B: medidor de vazão



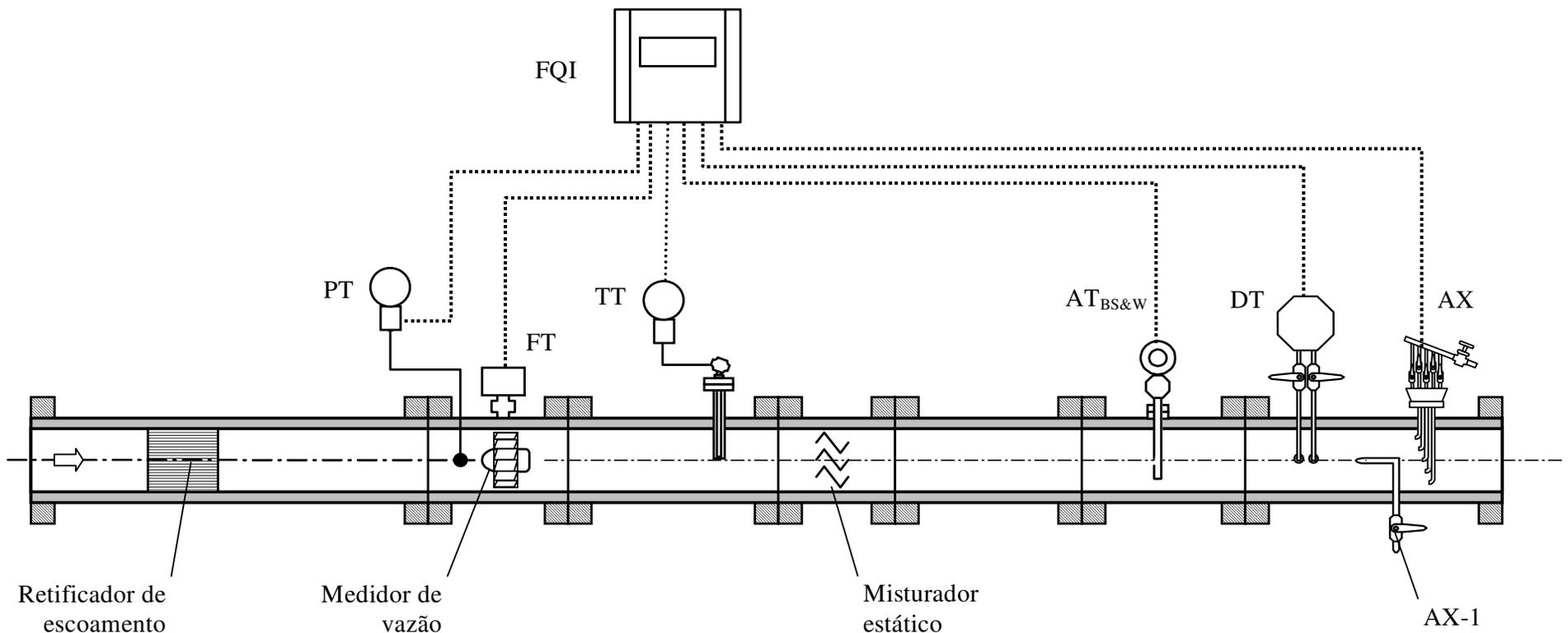
Classes de Exatidão					
	<u>0.3</u>	0.5	<u>1.0</u>	1.5	2.5
A	$\pm 0.3 \%$	$\pm 0.5 \%$	$\pm 1.0 \%$	$\pm 1.5 \%$	$\pm 2.5 \%$
B	$\pm 0.2 \%$	$\pm 0.3 \%$	$\pm 0.6 \%$	$\pm 1.0 \%$	$\pm 1.5 \%$

# 5. Tecnologias empregadas

- Medição de petróleo em linha:
  - Medidores: deslocamento positivo, turbina, Coriolis e ultrassônico.

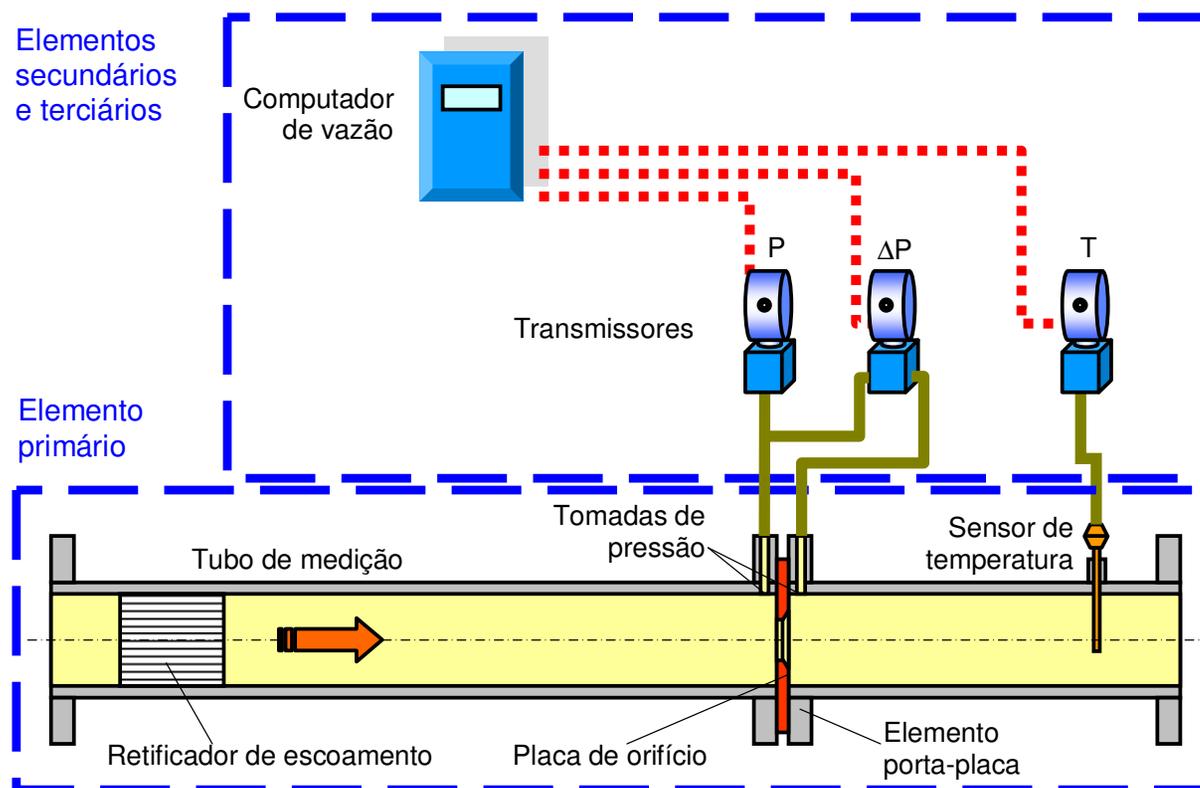


São Paulo  
Seção



# 5. Tecnologias empregadas

- Medição de gás natural:
  - Medidores: tipo pressão diferencial (placa de orifício, Venturi, V-Cone), ultrassônico, turbina e Coriolis.



# 6. Desafios do Pré-sal

ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO



São Paulo  
Sectorm

apoio



Associação Brasileira de Metrologia

## 6. Desafios do Pré-sal

ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

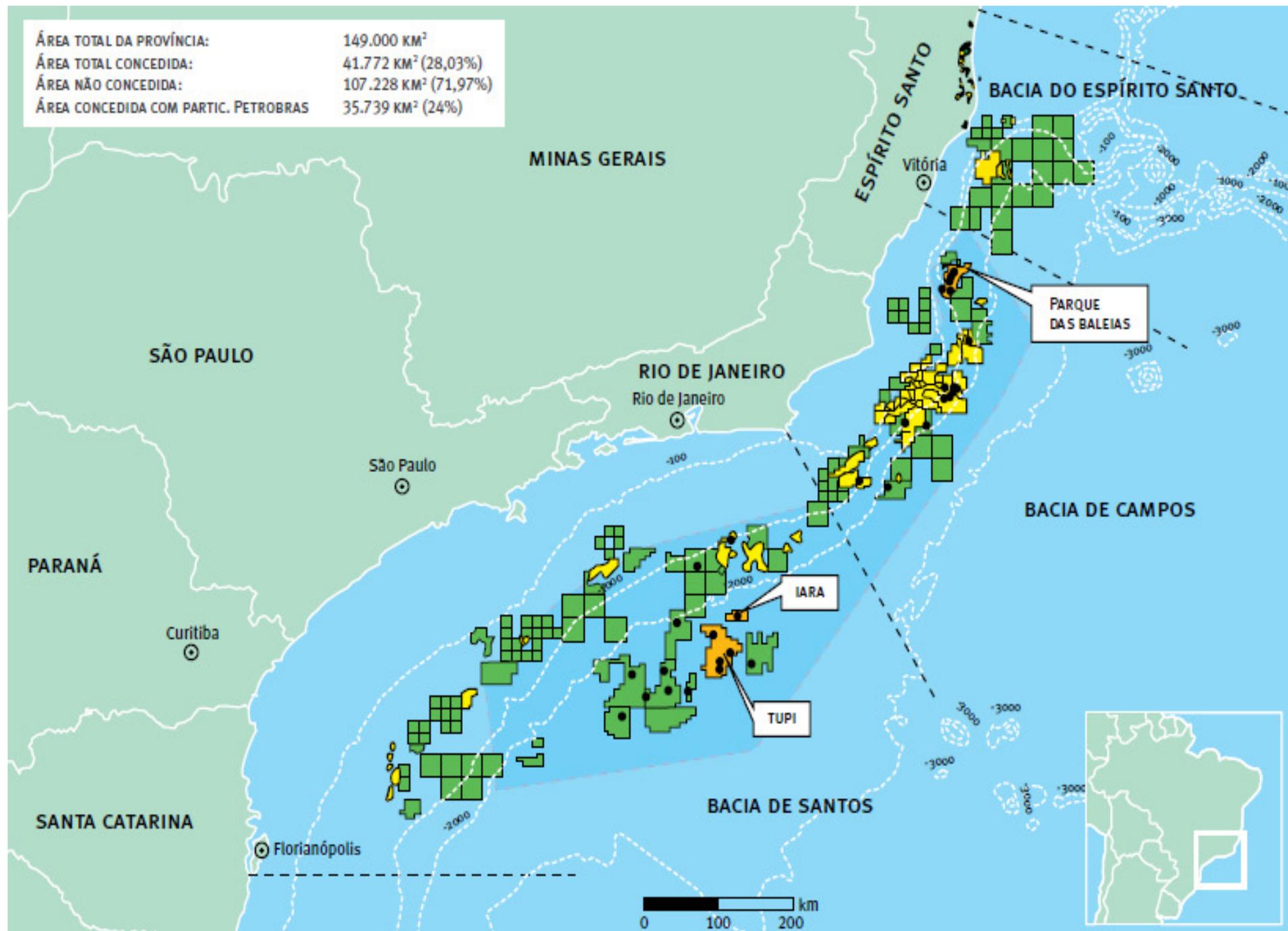


São Paulo  
Secton

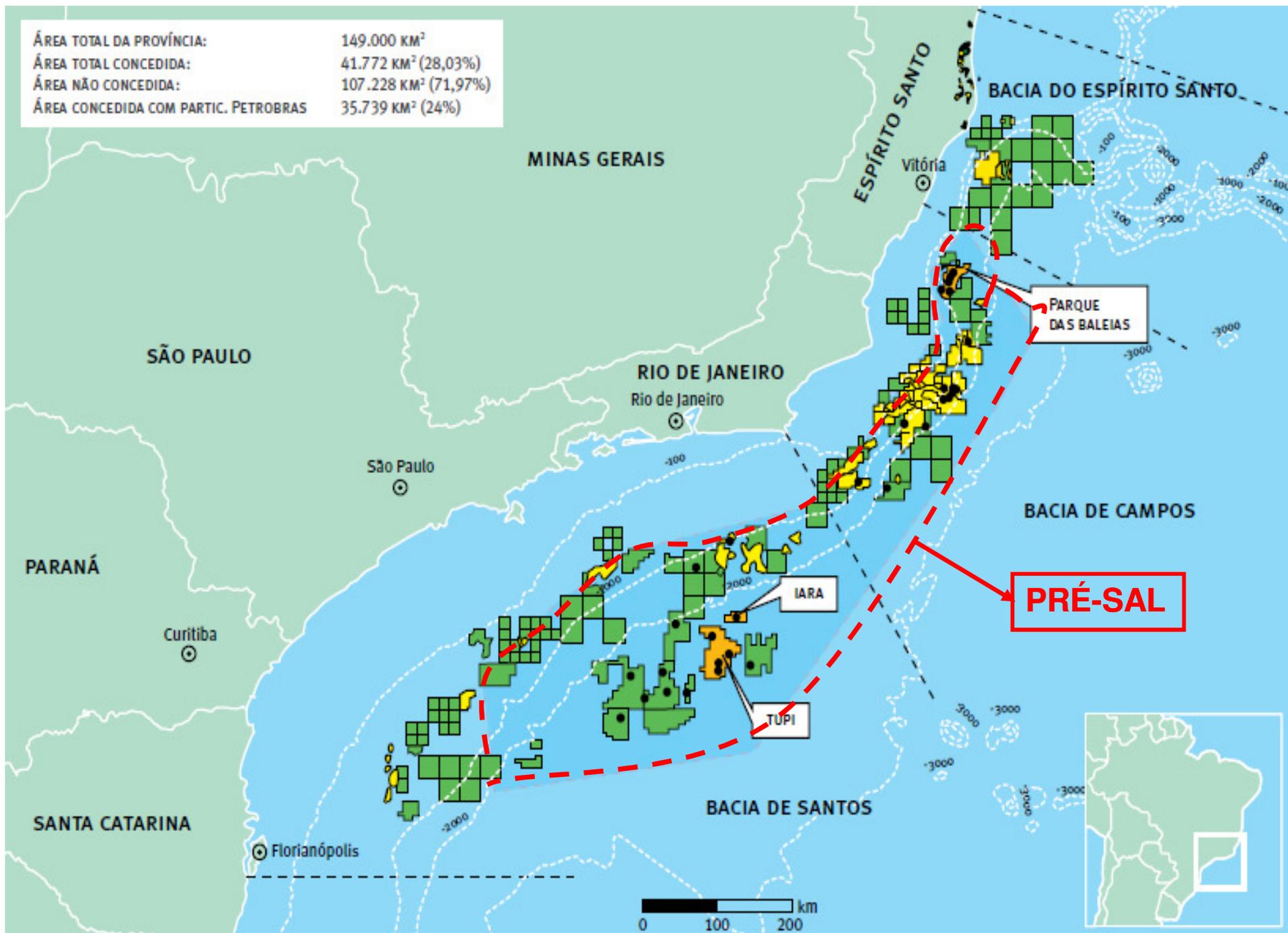


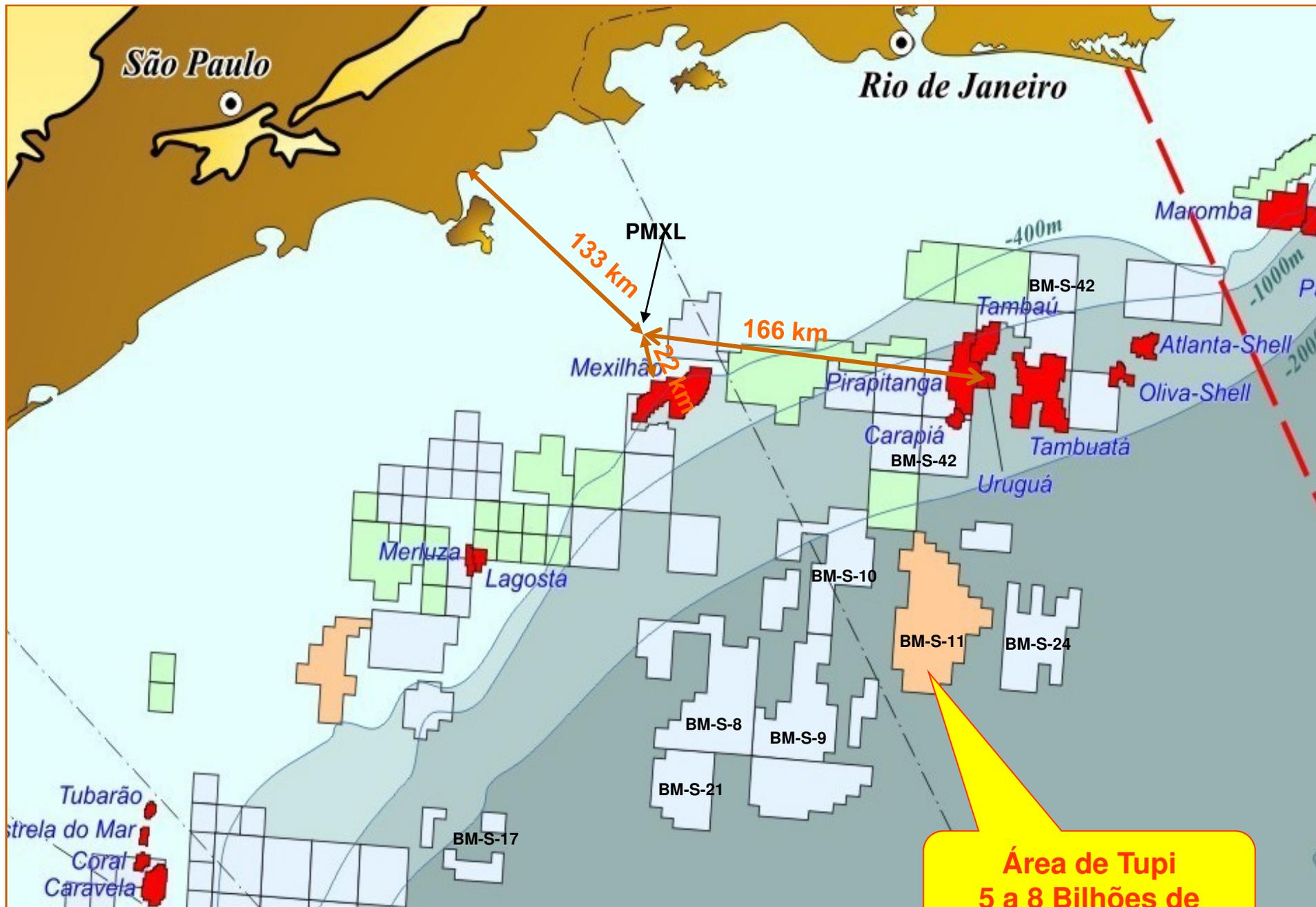
**O Pré-Sal é composto de reservatórios não convencionais, heterogêneos, situados em águas ultra-profundas, sob alta pressão, apresentando fluidos com contaminantes**

ÁREA TOTAL DA PROVÍNCIA:	149.000 KM <sup>2</sup>
ÁREA TOTAL CONCEDIDA:	41.772 KM <sup>2</sup> (28,03%)
ÁREA NÃO CONCEDIDA:	107.228 KM <sup>2</sup> (71,97%)
ÁREA CONCEDIDA COM PARTIC. PETROBRAS	35.739 KM <sup>2</sup> (24%)



ÁREA TOTAL DA PROVÍNCIA:	149.000 KM <sup>2</sup>
ÁREA TOTAL CONCEDIDA:	41.772 KM <sup>2</sup> (28,03%)
ÁREA NÃO CONCEDIDA:	107.228 KM <sup>2</sup> (71,97%)
ÁREA CONCEDIDA COM PARTIC. PETROBRAS	35.739 KM <sup>2</sup> (24%)





**Área de Tupi  
5 a 8 Bilhões de  
barris**

## BACIA DE SANTOS - PÓLO PRÉ-SAL



- ❏ **Descobertas:** Tupi, Iara, Carioca, Guará, Júpiter, Parati, Bem-te-vi e Caramba
- ❏ **Elevado potencial** de volumes
- ❏ Óleo de **boa qualidade:** médio-leve
- ❏ Atividade sísmica e poços de delimitações a caminho
- ❏ Estimativa de volumes recuperáveis: **5-8 bn boe em Tupi e 3-4 bn boe em Iara**
- ❏ 3 sistemas de produção até 2014: **Tupi, Iara e Guará**

## **Pré-Sal - Projetos confirmados:**

### **Pilotos de Produção (5):**

Tupi  
Guará  
Tupi Nordeste  
Guará Norte  
Iracema Sul

### **FPSOs Replicantes (8):**

- 1- Tupi – Iracema
- 2- Tupi – Nordeste
- 3- Carioca – Iguaçu
- 4- Carioca – Abaré Oeste
- 5- Tupi Sul – 2
- 6- Tupi – Alto Careca
- 7- Guará Norte
- 8- Iara Oeste



## 6. Desafios do Pré-sal

ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

**Aumento da complexidade do processamento de fluidos**



- **CO2 Removal Unit**
- **CO2 Turbocompressors**
- **Exportation Gas Motocompressors**
- **Flare Gas Recovery Unit**
- **Injection Gas Motocompressors**
- **Main Gas Motocompressors**
- **Printed Circuit Heat Exchanger**

# 8 FPSOs PADRONIZADOS - REPLICANTES

ENCONTRO TÉCNICO

MENSAL

TECNOLOGIAS  
ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

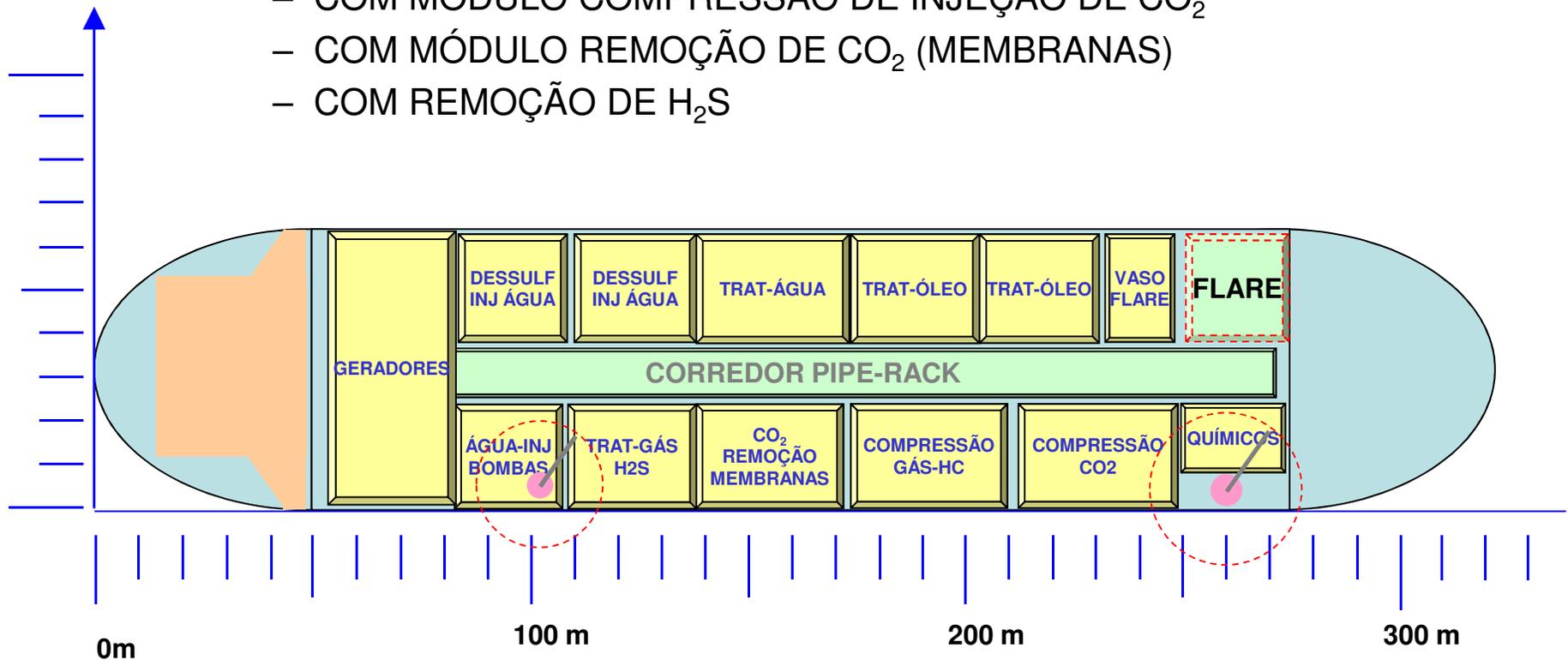


São Paulo  
Section

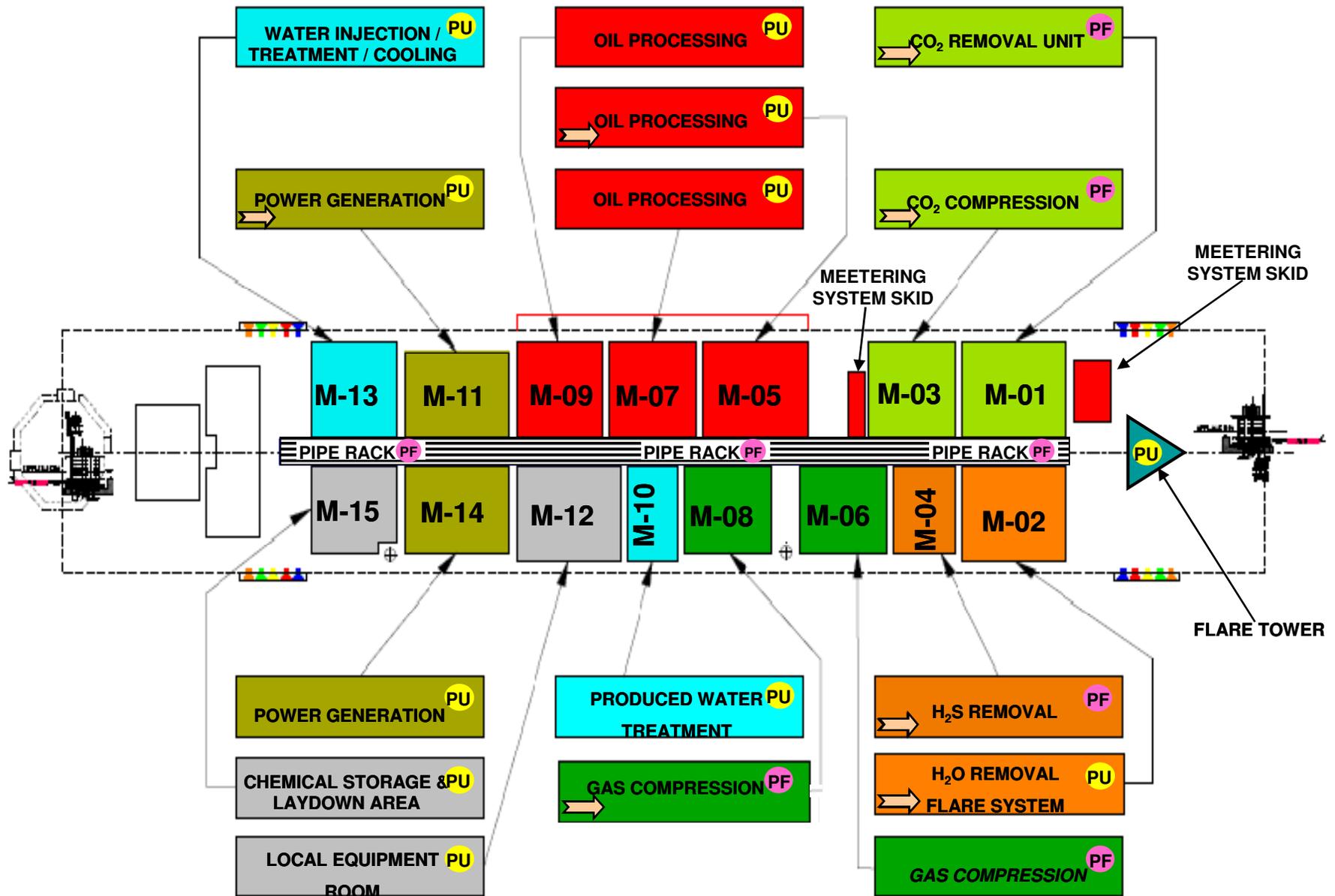
apoio



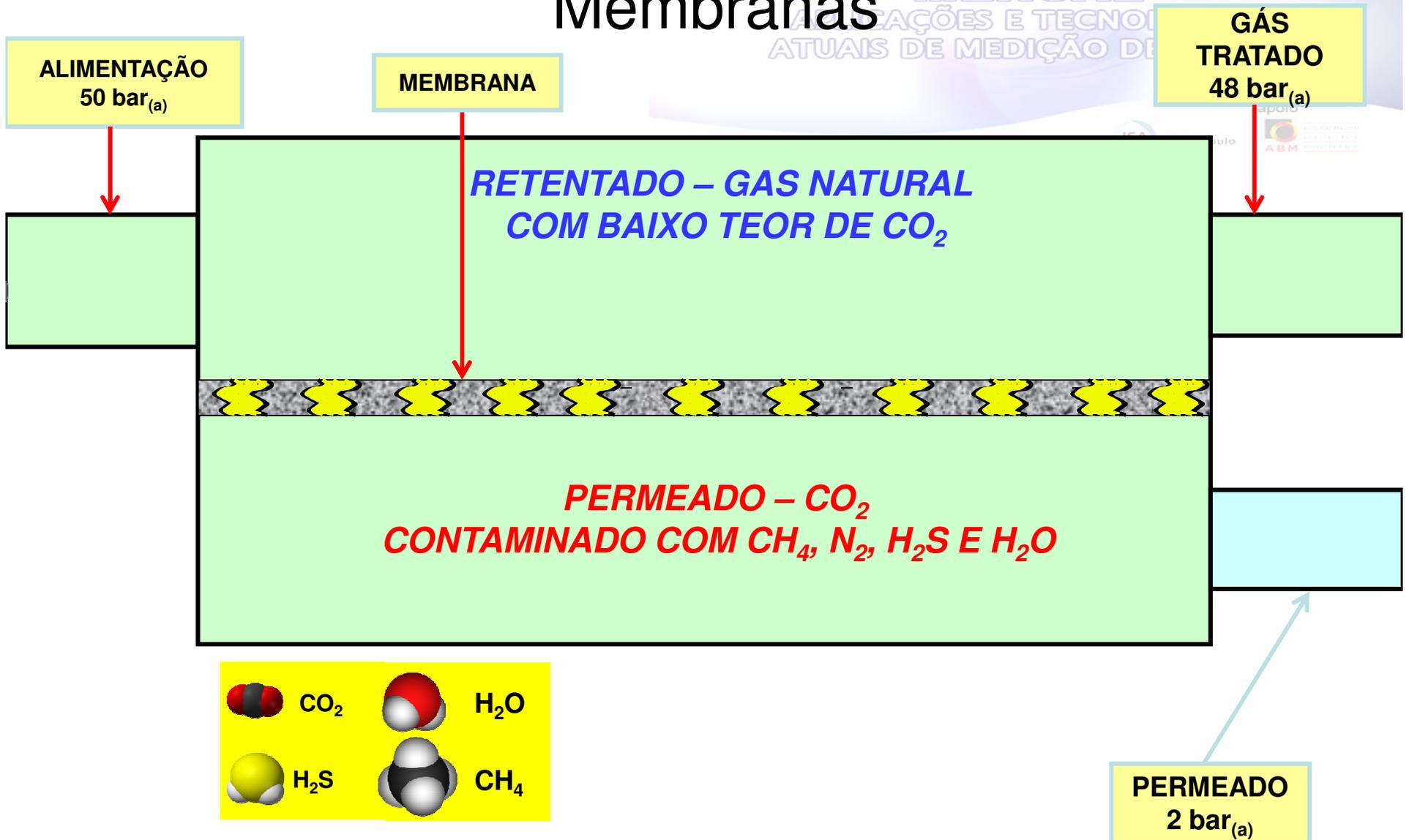
- COM MÓDULO COMPRESSÃO DE INJEÇÃO DE  $\text{CO}_2$
- COM MÓDULO REMOÇÃO DE  $\text{CO}_2$  (MEMBRANAS)
- COM REMOÇÃO DE  $\text{H}_2\text{S}$



# ESQUEMA DE PADRONIZAÇÃO DE MÓDULOS

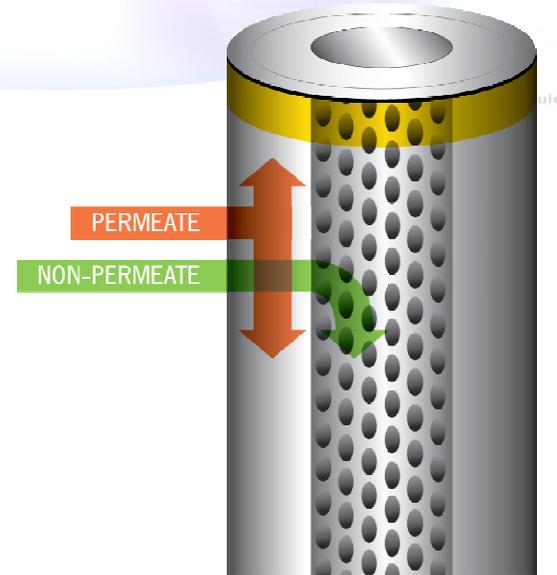


# Remoção de CO<sub>2</sub> através de Membranas



# Remoção de CO<sub>2</sub> através de Membranas

ENCONTRO TÉCNICO  
APLICAÇÕES E TECNOLOGIAS  
ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

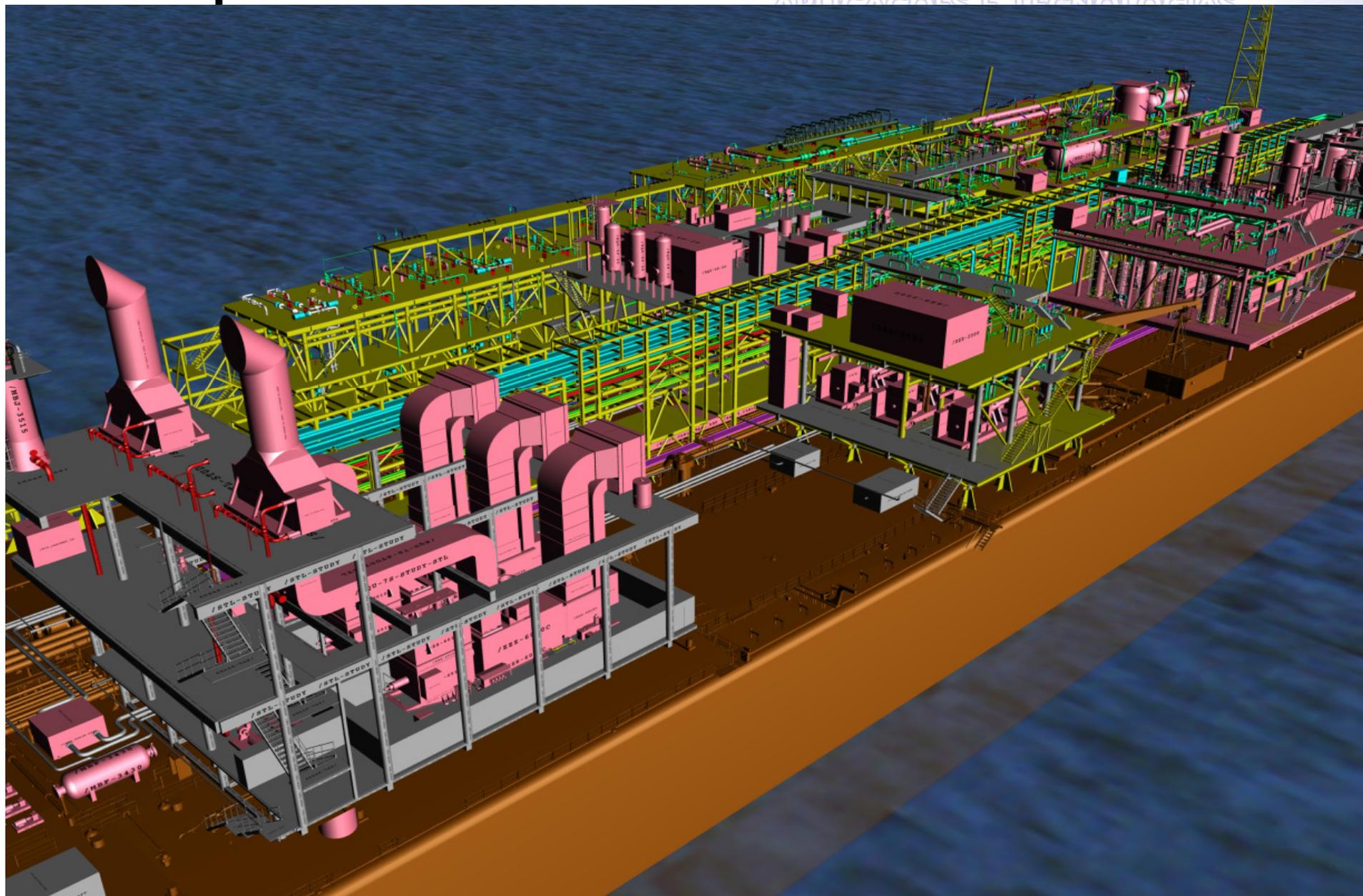


apoio  
ABM



# Complexidade

ENCONTRO TÉCNICO  
MENSAL  
APLICAÇÕES E TECNOLOGIAS



# 6. Desafios do Pré-sal

- 6.1. medição de grandes volumes transferidos
  - Economia: altas vazões, diâmetros grandes
    - Dificuldades: calibração, transporte
    - Alternativa:
      - calibrar *in loco*
      - Fazer verificações com fluidos alternativos
  - Estudo da PUC-Rio (ultrassônicos): verificações com o fluido água podem garantir rastreabilidade.



São Paulo  
Seccion



# Estudo da PUC-Rio (ultrassônicos): verificações com o fluido água podem garantir rastreabilidade

Total of 10 fluid calibrations (meters 6" - 24")  
(SPSE, etc.)

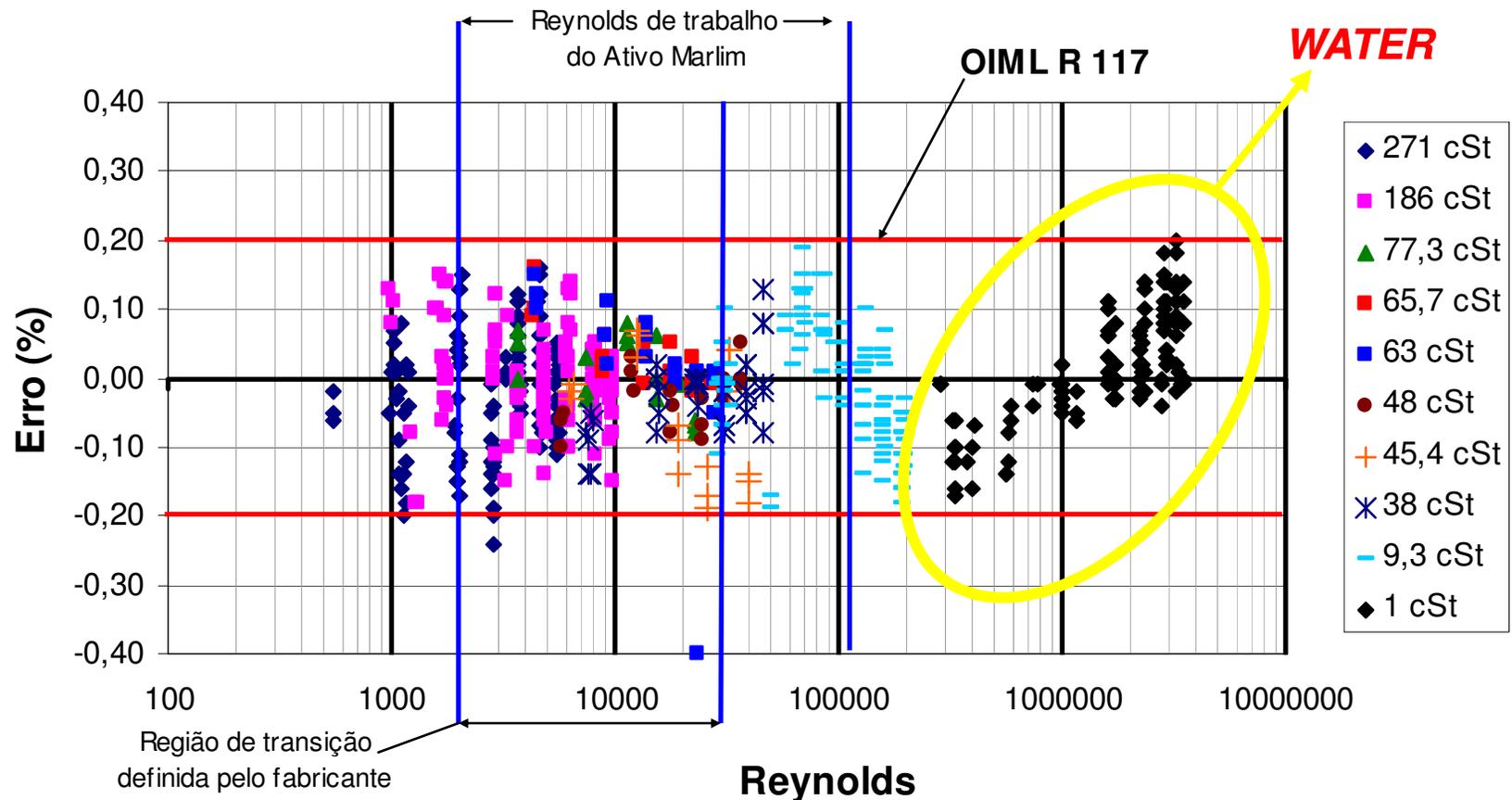
ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO



São Paulo  
Seção



Influência da viscosidade para os medidores Altosonic V de 600 mm do Ativo Marlim



# 6. Desafios do Pré-sal

ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

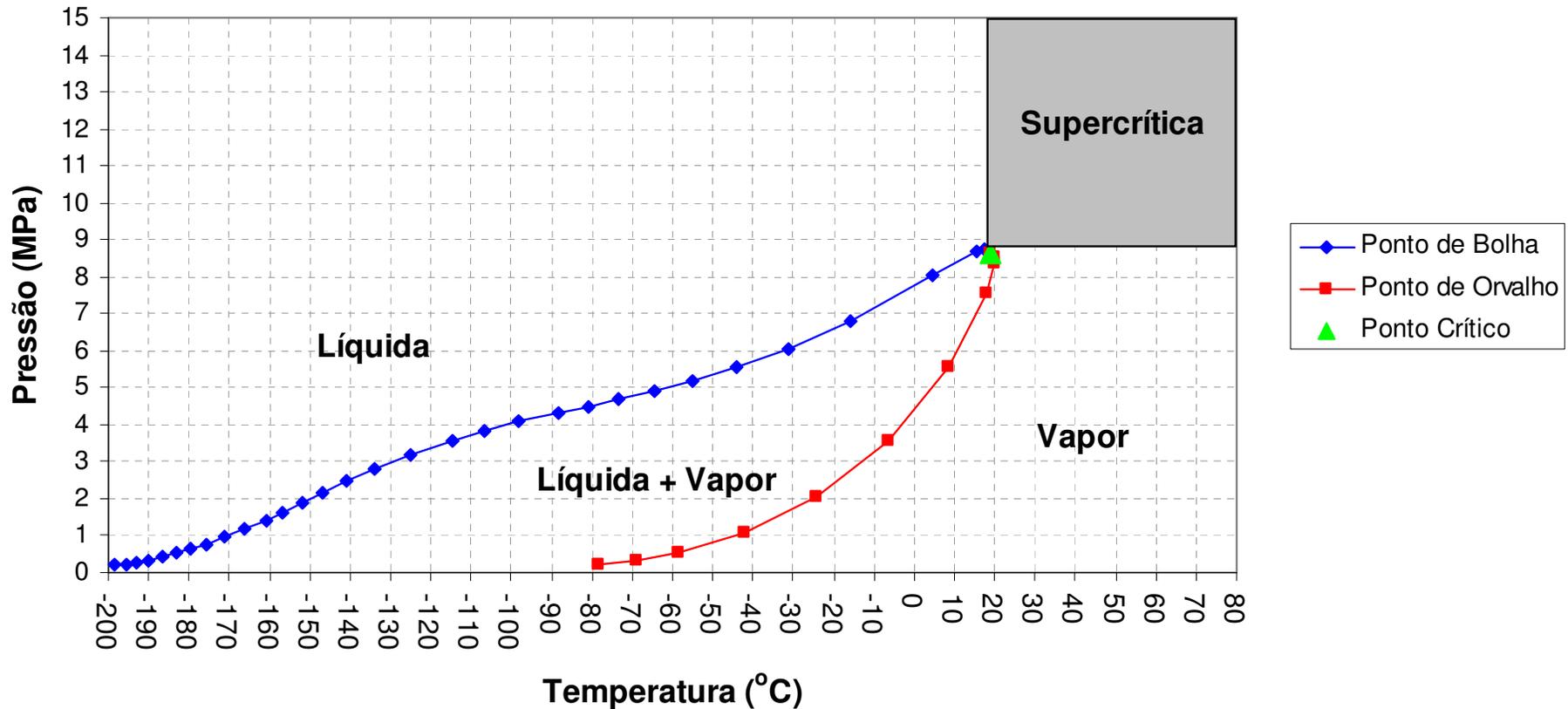


São Paulo  
Section

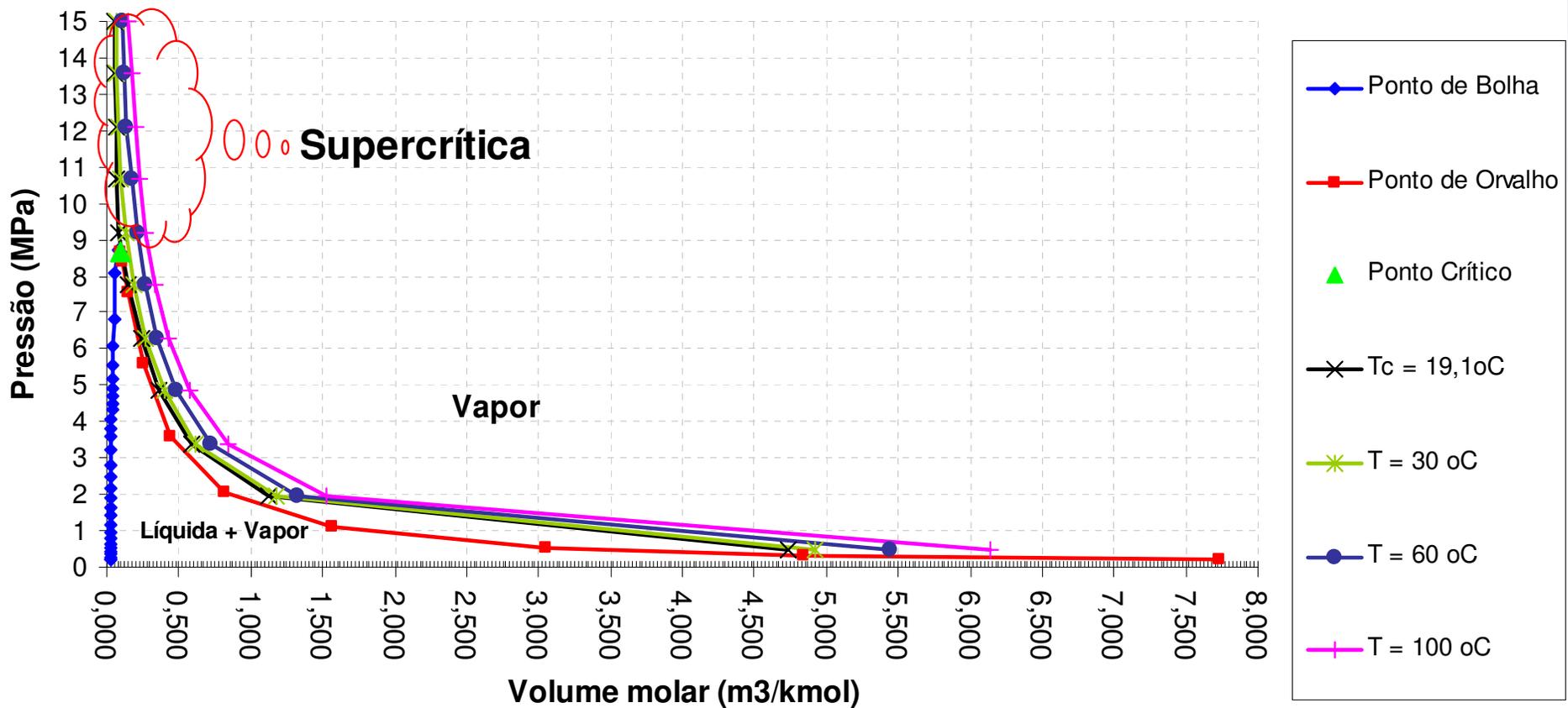


- 6.2. medição de CO<sub>2</sub> injetado
  - A injeção de CO<sub>2</sub>:
    - Objetivo: aumentar a recuperação de óleo no reservatório ou sequestro de carbono que seria lançado à atmosfera.
    - Condições:
      - altas pressões nos reservatórios (**injeção: 500 bar**): operação segura e facilidades de medição.

ENCONTRO TÉCNICO  
MENSAL  
APLICAÇÕES E TECNOLOGIAS  
ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO



A região “Supercrítica”, ou às vezes, denominada de fase “Densa” ou fluido “Denso”, pode ser definida para uma substância pura aquela em que a pressão e temperatura são superiores a temperatura crítica ( $T_c$ ) e pressão crítica ( $P_c$ ).



Sobre estas condições, o fluido na fase vapor transforma-se num fluido denso, ou seja, um fluido com massa específica que tende a se aproximar ao da fase líquida. O Gráfico apresenta este fenômeno para a mistura rica de CO<sub>2</sub>. Para pressões acima da pressão crítica, todas as isothermas convergem para um volume específico molar semelhante ao da fase líquida (canto esquerdo do gráfico).

» **Estudo interno PETROBRAS: uso dos dispositivos do tipo Venturi ou V-Cone: adequação à erosão e menor perda de carga total, menores trechos retos**

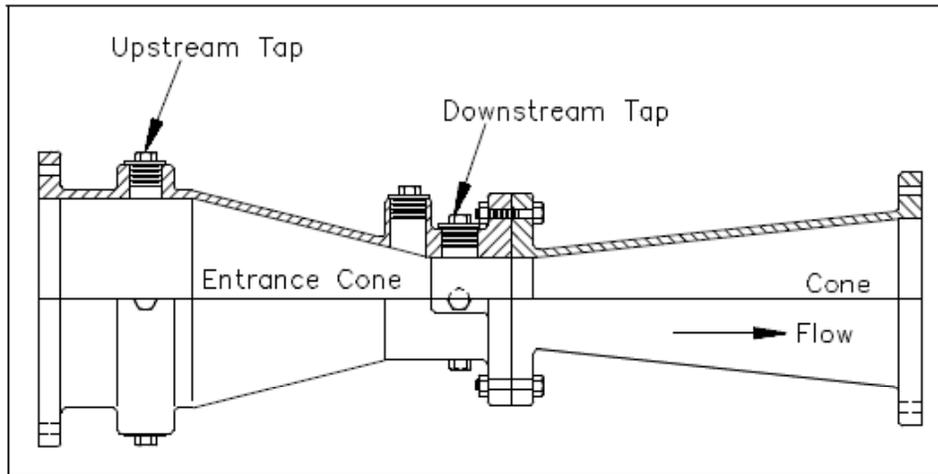
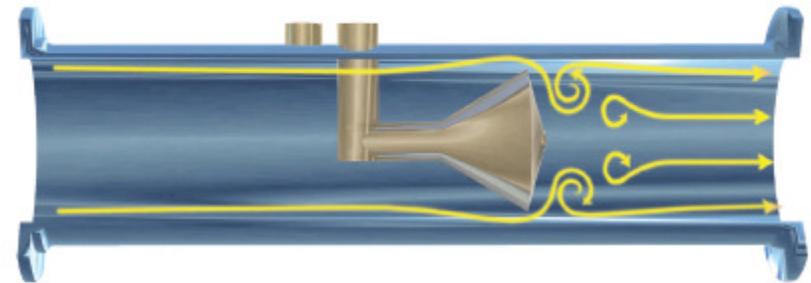


Figure 3 Venturi Tube



- **Uso da Equação do AGA-8 para uma mistura rica em CO<sub>2</sub> - pôde-se estimar a incerteza da medição de vazão de gás rico em CO<sub>2</sub> em  $\pm 2,45\%$  para medição de vazão volumétrica nas condições de referência de 20 oC e 1 atm.**
- **Este valor é inferior ao previsto para medição operacional de  $\pm 3,00\%$ , conforme regulamento ANP-INMETRO.**
- **Em base mássica esta incerteza é reduzida para  $\pm 1,40\%$ .**

# 6. Desafios do Pré-sal

ATUAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

- 6.3. medição de gás de tocha

- características dessa aplicação:

- amplos ranges de vazão (“turndown”) e velocidades requeridos
- variações bruscas na pressão do escoamento
- grandes diâmetros utilizados
- necessidade de baixa manutenção
- necessidade de baixa intrusividade ao processo
- existência de variações na composição do gás devido à presença eventual de líquido (condensado ou gotículas de óleo)
- dificuldade em garantir longos trechos retos e impossibilidade do uso de condicionadores de fluxo.

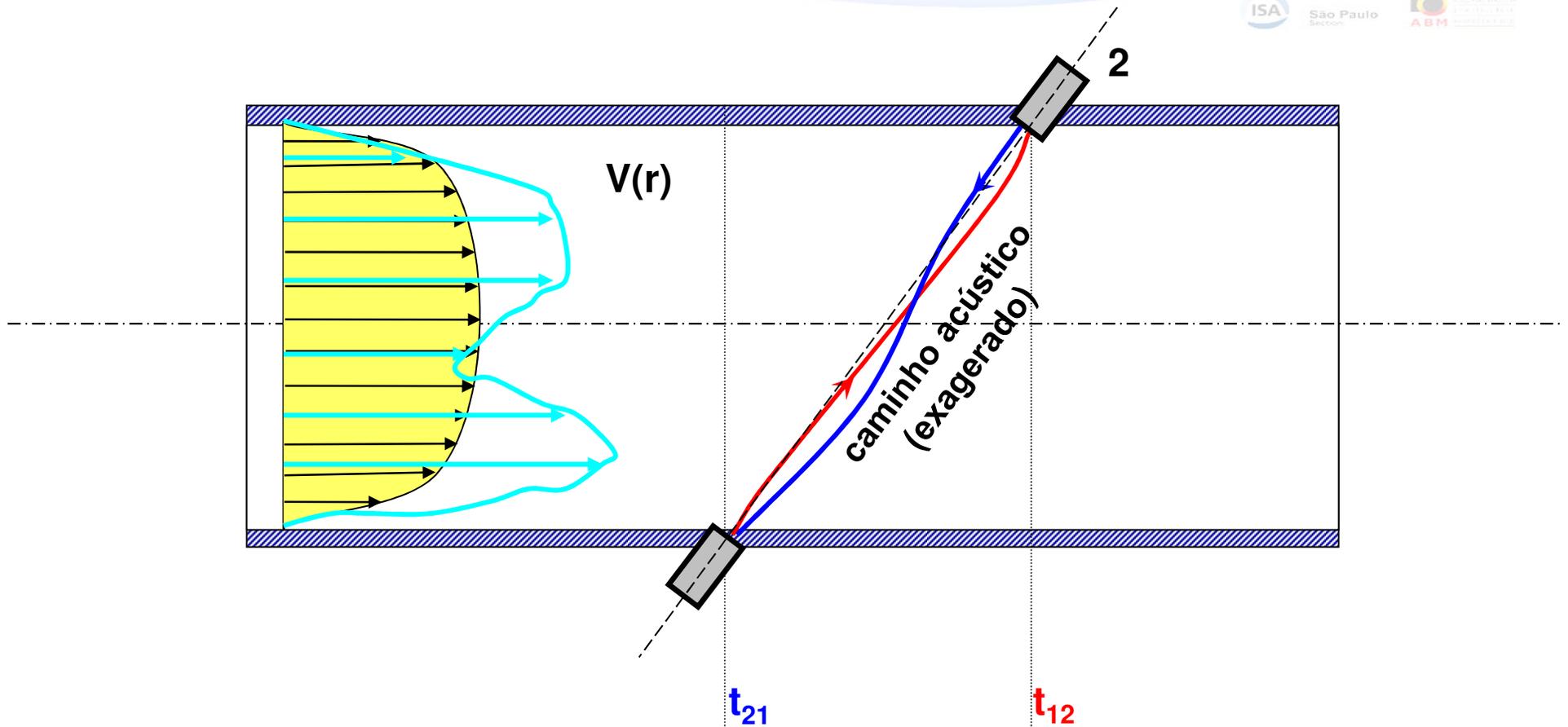
- Medidor mais usado: ultrassônico de 1 feixe



São Paulo  
Section



## Efeito do escoamento no sinal ultrassônico



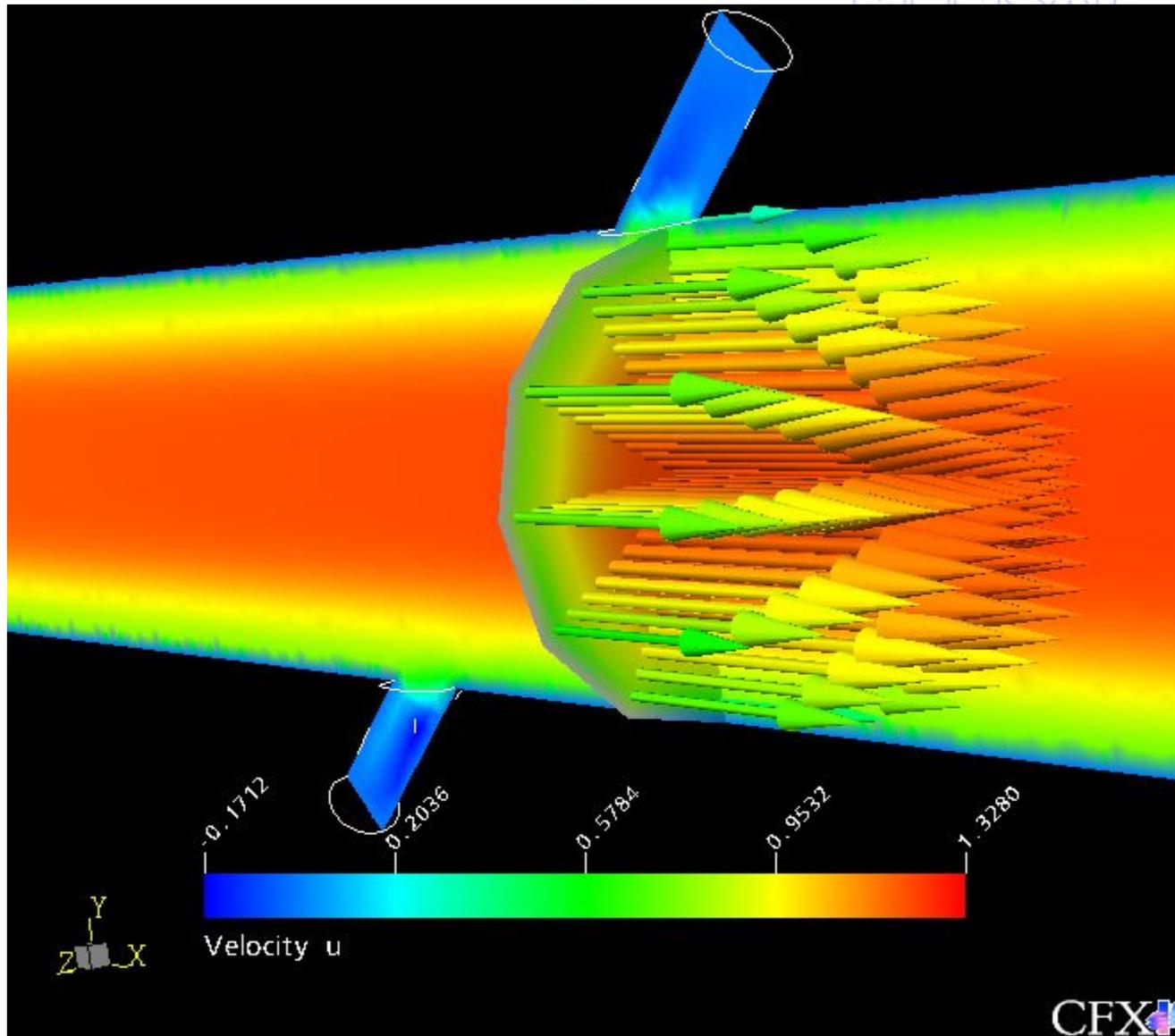
Tempo de trânsito à jusante ( $t_{12}$ ) < Tempo de trânsito a montante ( $t_{21}$ )

# ENCONTRO TÉCNICO MENSAL

TECNOLOGIAS  
EM AERODINÂMICA

apoio

São Paulo



# 6. Desafios do Pré-sal

## • 6.4. medição analítica em linha

- requisitos adicionais dos sistemas de medição:
  - remoção e injeção de CO<sub>2</sub>,
  - acompanhamento rigoroso da eficiência do sistema de dessulfurização do gás natural ( evitar corrosão nas linhas e acessórios) pela análise de H<sub>2</sub>S,
  - acompanhamento da eficiência do sistema de tratamento de água para descarte ou reinjeção (TOG adequado).
- analisadores em linha de processo (instrumentação analítica): instrumentos problemáticos, pois dependem de um controle efetivo de seu desempenho operacional
  - acompanhamento operacional: comparações periódicas com os valores obtidos por amostragem e análises de laboratório.



São Paulo  
Seccion



## 6. Desafios do Pré-sal

- 6.5. compensação de CO<sub>2</sub> nas correntes de gás exportado e queimado
  - a injeção de CO<sub>2</sub>:
    - para sequestro de carbono que seria lançado à atmosfera.
  - teor de CO<sub>2</sub> nas correntes de gás exportado e queimado (normalmente desprezado):
    - demandará pleitos de ordem ecológica e econômica, neste caso visando um incentivo à melhor eficiência operacional.

# 6. Desafios do Pré-sal

## • 6.6. medição multifásica:

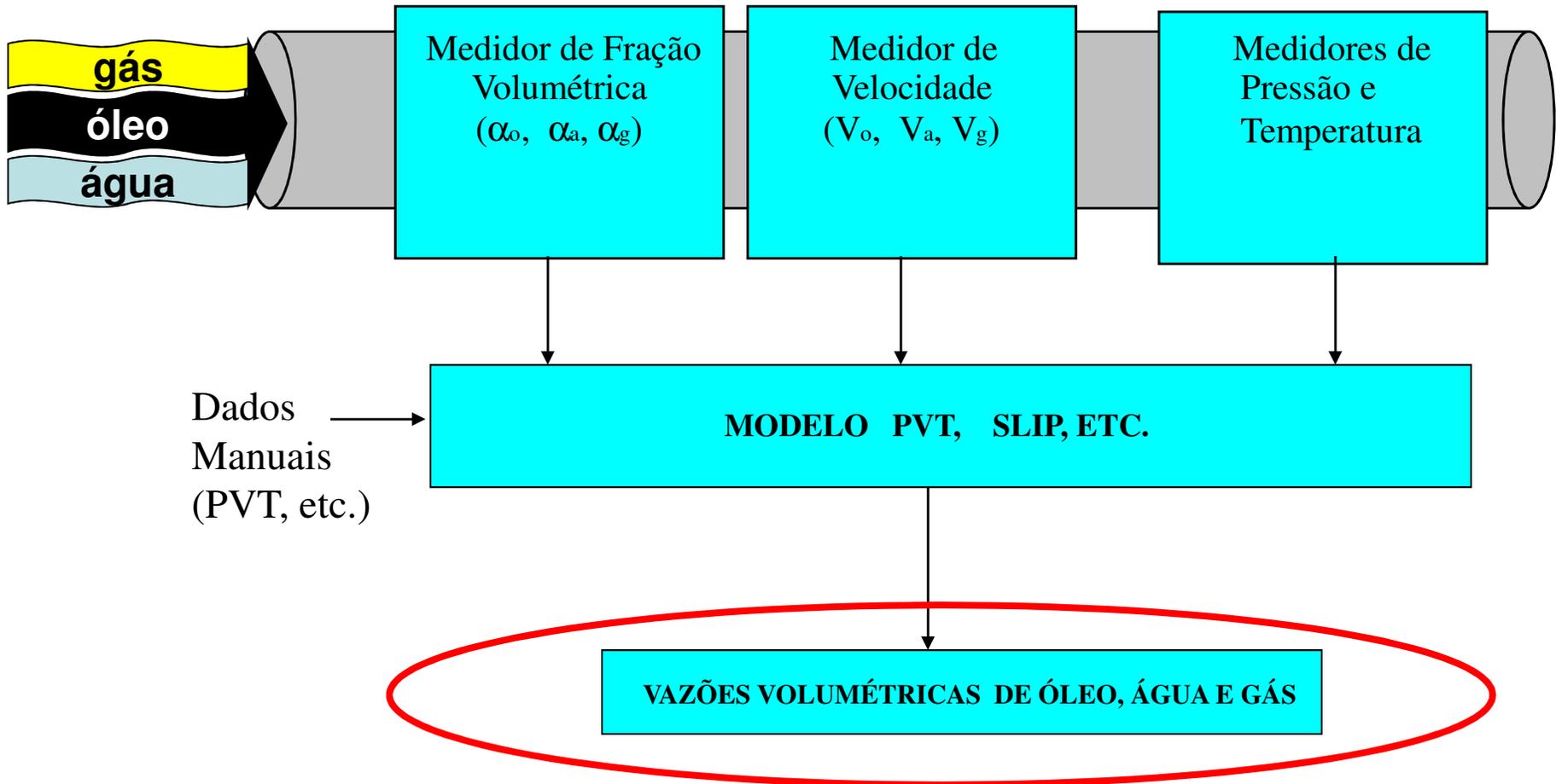
- para simplificar os processos:
  - **medidores multifásicos e de gás úmido serão necessários para a apropriação dos volumes aos poços e às concessões de produção**
    - melhor controle efetivo operacional (ex. operações de “gas-lift”)
    - possibilidade de otimização da produção.
- **Em nível internacional: status de tecnologia consolidada.**
- **No Brasil: faltam dados sobre disponibilidade e confiabilidade.**
- **Aspectos importantes: verificação periódica e atualização de parâmetros de composição dos fluidos. Muitas vezes, sua utilização nos projetos os viabilizam economicamente.**

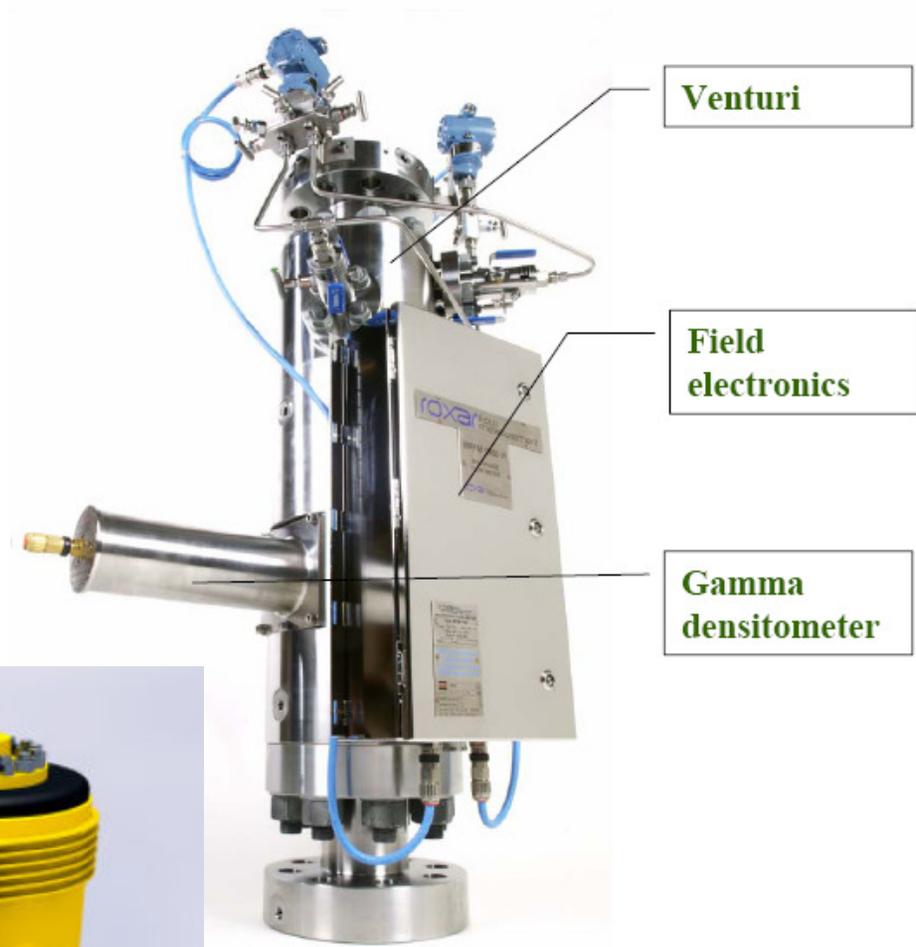


São Paulo  
Seccion



## MEDIDOR MULTIFÁSICO



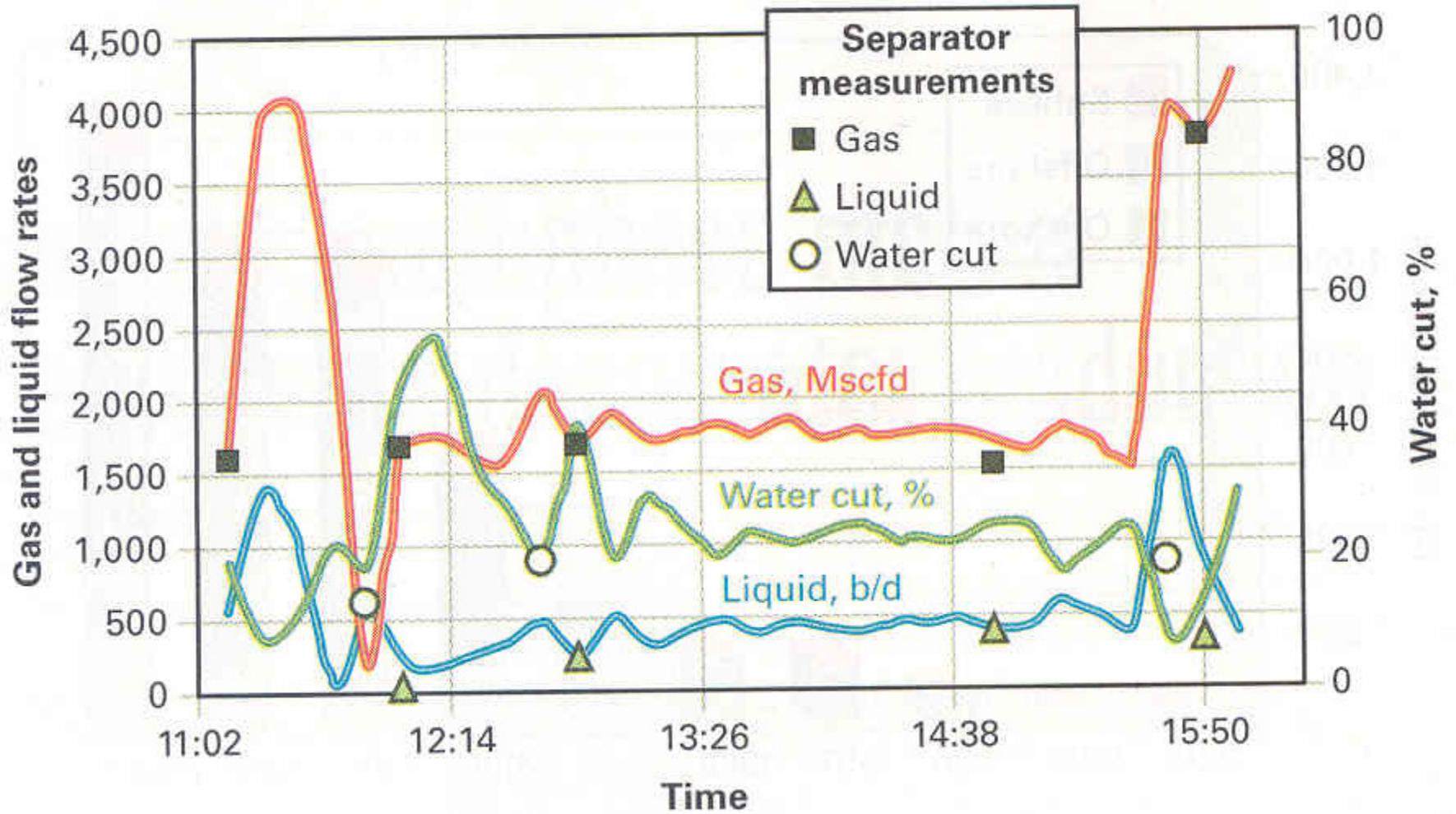


medição multifásica



# COMPARISON OF MULTIPHASE, SEPARATOR MEASUREMENTS

Fig. 4



## 6. Desafios do Pré-sal

- 6.7. medição criogênica do GNLE
  - Possibilidade de processar o gás natural produzido no alto mar com a geração de GNL (Gás Natural Liquefeito)
    - medir este fluido em condições criogênicas e em alta pressão.
  - As unidades de GNLE (Unidades de Liquefação de Gás Natural Embarcada) são uma das soluções tecnológicas de transporte para escoar o gás natural produzido nas camadas de Pré-sal.
  - Analisar: calibração e verificação periódica dos medidores de vazão nestas condições extremas

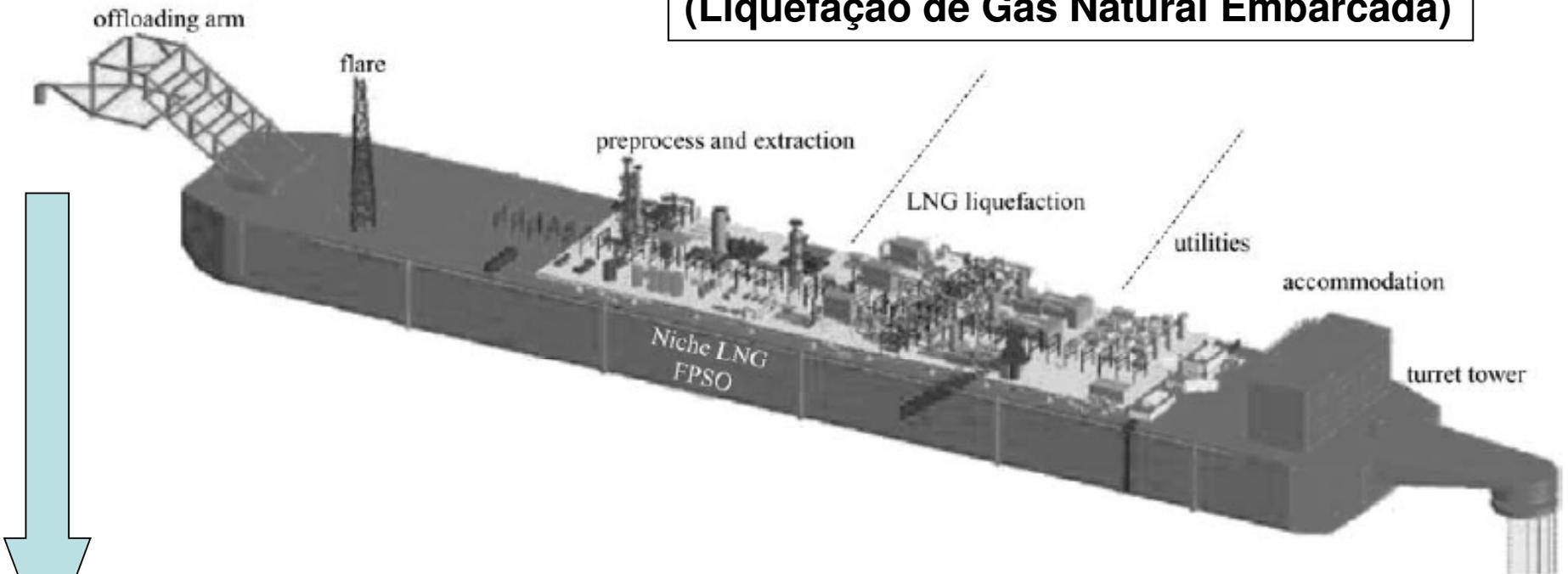


São Paulo  
Seccion



LNG-FPSO

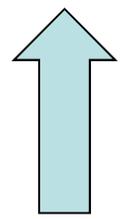
**Unidades de GNLE  
(Liquefação de Gás Natural Embarcada)**



**Navio LNG**



**Gás Produzido dos FPSOs**



## 7. Conclusões (1/2)

- Há grandes desafios para a medição de petróleo e gás natural nos campos do Pré-sal: grandes vazões, controle efetivo das variáveis secundárias associadas, tais como os contaminantes no gás natural, e a operação em níveis fora dos limites das normas convencionais, como é o caso das altas temperaturas e altas pressões.
- Medidores de vazão com grandes diâmetros são difíceis de calibrar e transportar e, assim, deverão ser disponibilizadas facilidades de calibração e verificação *in loco*, a fim de simplificar a logística e os procedimentos operacionais. Validar as verificações em laboratórios em terra utilizando fluidos alternativos.

## 7. Conclusões (2/2)

- Aspectos como medição de CO<sub>2</sub> injetado nos campos, medição de gás de tocha, medição analítica em linha (teor de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e umidade no gás natural), medição multifásica e medição em condições criogênicas serão objeto de consolidação tecnológica nos próximos dez anos.
- O sequestro de carbono que possa ser lançado à atmosfera será objeto de regulamentação nas correntes de gás com teores de CO<sub>2</sub> exportado e queimado. Tal conteúdo, normalmente desprezado e contabilizado como se gás natural fosse, demandará pleitos de ordem ecológica e econômica, neste caso visando um incentivo à melhor eficiência operacional.



*Obrigado!*

**[jose.pinheiro@petrobras.com.br](mailto:jose.pinheiro@petrobras.com.br)**

00001110101011100111

# INVISTA EM VOCÊ

Cursos de Qualificação Profissional  
ISA Distrito 4

"COMO MEDIR A VAZÃO DE LÍQUIDOS E GASES" 19 a 22 de outubro

## INFORMAÇÕES

ISA - Distrito 4

Av. Ibirapuera, 2120 - Conjuntos 164/165 - 04028-001 - São Paulo, SP

Telefone: (11) 5053-7404

[michelle@isadistrito4.org.br](mailto:michelle@isadistrito4.org.br)



*ISA - International Society of Automation™*

**América do Sul**  
Distrito 4

**ISA DISTRITO 4 - Associação Sul-Americana de Automação**

Av. Ibirapuera, 2120 - Conjuntos 164/165 - CEP: 04028-001 - São Paulo/SP

Telefone: (11) 5053-7404

[treinamento@isadistrito4.org.br](mailto:treinamento@isadistrito4.org.br)