Encontro Nacional do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP - 2026

Metodologias e Procedimentos para Análise de Confiabilidade de Linhas de Ancoragem

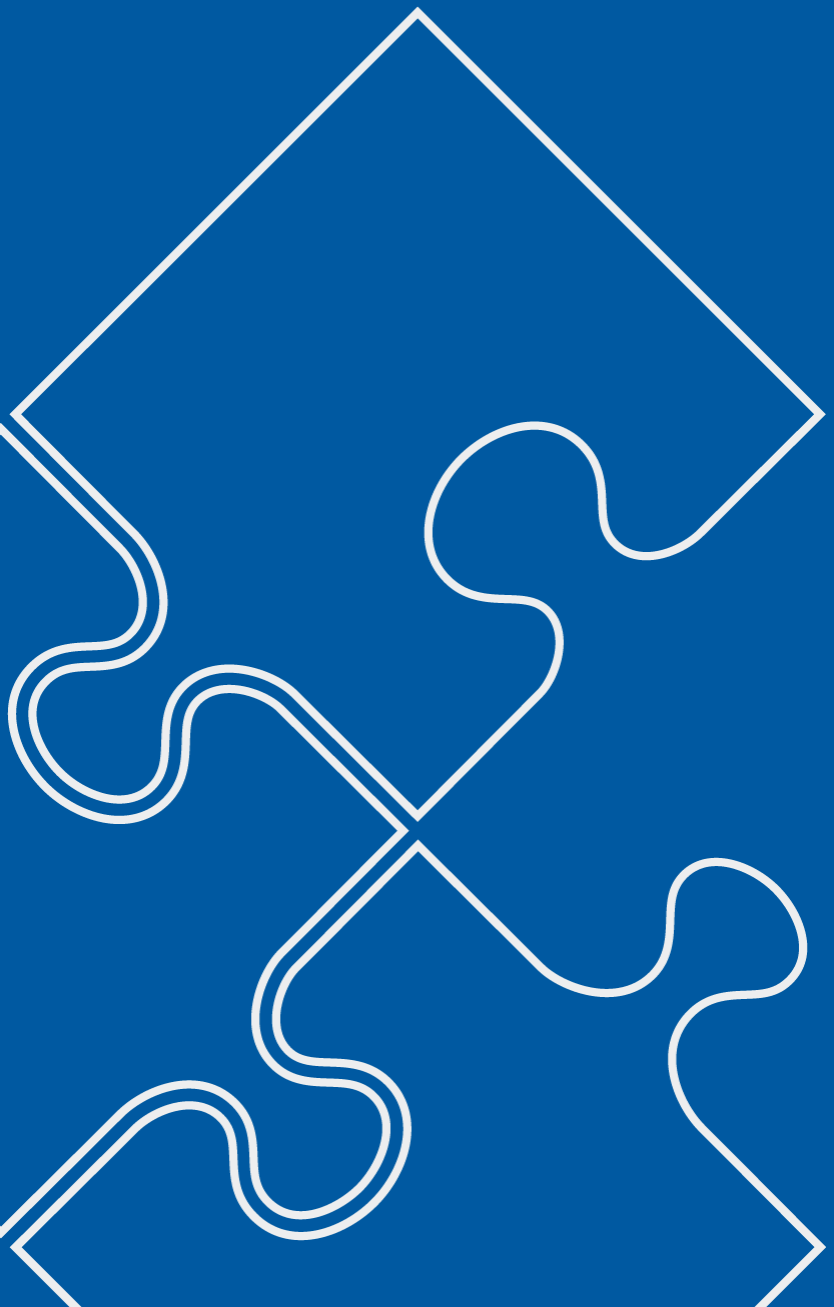
Bruna da Silva Gomes; Fernando Jorge Mendes de Sousa; Marina Leivas Simão

PRH 7.1

Graduação

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Gestão:



Apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil.

Processo nº 2025/17621-5

Contextualização e Sistema de Ancoragem

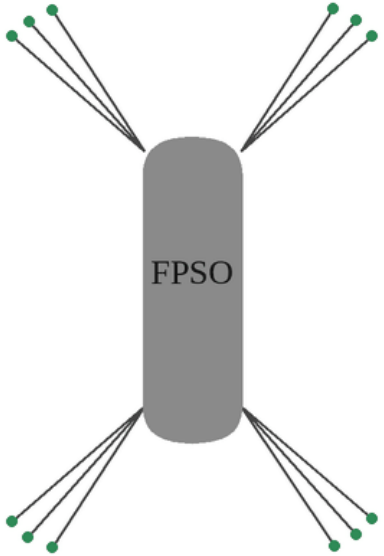
Expansão da produção *Offshore*



FPSO plataforma P-68
Fonte: Petrobras, 2022

- **Águas Profundas: Lâmina d'água superior a 2000 metros**
- **Plataformas FPSO: Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência**
- **Integridade Operacional: Necessidade de contenção de movimentos extremos**

Sistema de Ancoragem *Spread Mooring*



- **O sistema de ancoragem tem como objetivo manter a posição média do flutuante, limitando o *passeio da unidade*, que consiste no deslocamento da plataforma no plano**

Contextualização e Sistema de Ancoragem

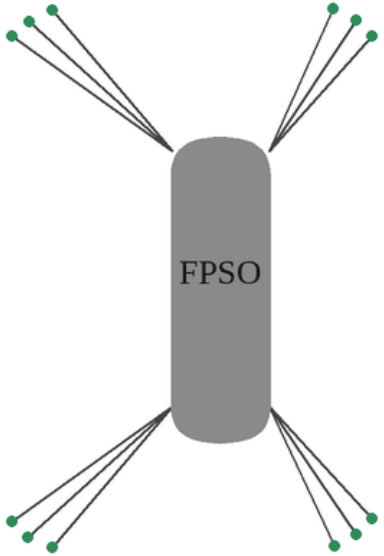
Expansão da produção *Offshore*



FPSO plataforma P-68
Fonte: Petrobras, 2022

- Águas Profundas: Lâmina d'água superior a 2000 metros
- Plataformas FPSO: Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência
- Integridade Operacional: Necessidade de contenção de movimentos extremos

Sistema de Ancoragem *Spread Mooring*



- O sistema de ancoragem tem como objetivo manter a posição média do flutuante, limitando o ***passeio da unidade***, que consiste no deslocamento da plataforma no plano

Contextualização e Sistema de Ancoragem

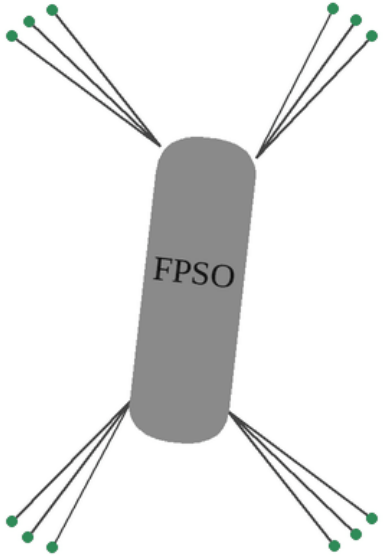
Expansão da produção *Offshore*



FPSO plataforma P-68
Fonte: Petrobras, 2022

- **Águas Profundas: Lâmina d'água superior a 2000 metros**
- **Plataformas FPSO: Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência**
- **Integridade Operacional: Necessidade de contenção de movimentos extremos**

Sistema de Ancoragem *Spread Mooring*



- **O sistema de ancoragem tem como objetivo manter a posição média do flutuante, limitando o *passeio da unidade*, que consiste no deslocamento da plataforma no plano**

Contextualização e Sistema de Ancoragem

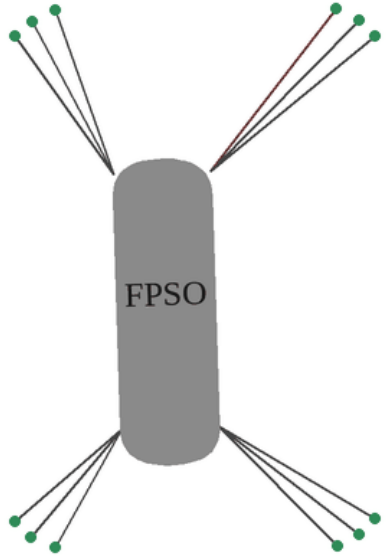
Expansão da produção *Offshore*



FPSO plataforma P-68
Fonte: Petrobras, 2022

- Águas Profundas: Lâmina d'água superior a 2000 metros
- Plataformas FPSO: Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência
- Integridade Operacional: Necessidade de contenção de movimentos extremos

Sistema de Ancoragem *Spread Mooring*



- O sistema de ancoragem tem como objetivo manter a posição média do flutuante, limitando o ***passeio da unidade***, que consiste no deslocamento da plataforma no plano

Contextualização e Sistema de Ancoragem

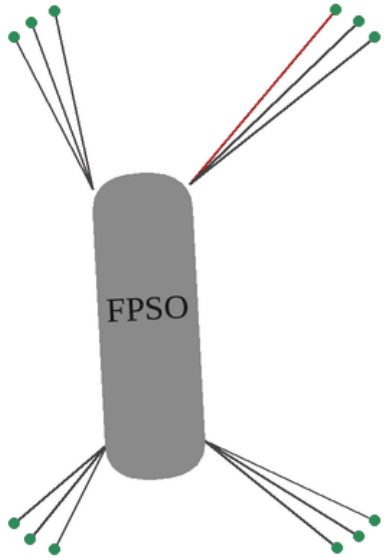
Expansão da produção *Offshore*



FPSO plataforma P-68
Fonte: Petrobras, 2022

- Águas Profundas: Lâmina d'água superior a 2000 metros
- Plataformas FPSO: Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência
- Integridade Operacional: Necessidade de contenção de movimentos extremos

Sistema de Ancoragem *Spread Mooring*



- O sistema de ancoragem tem como objetivo manter a posição média do flutuante, limitando o ***passeio da unidade***, que consiste no deslocamento da plataforma no plano

Contextualização e Sistema de Ancoragem

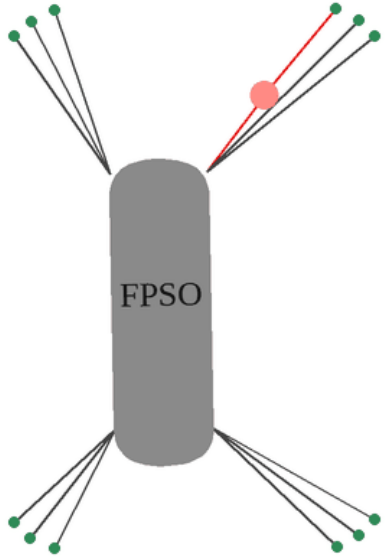
Expansão da produção *Offshore*



FPSO plataforma P-68
Fonte: Petrobras, 2022

- Águas Profundas: Lâmina d'água superior a 2000 metros
- Plataformas FPSO: Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência
- Integridade Operacional: Necessidade de contenção de movimentos extremos

Sistema de Ancoragem *Spread Mooring*



- O sistema de ancoragem tem como objetivo manter a posição média do flutuante, limitando o ***passeio da unidade***, que consiste no deslocamento da plataforma no plano

Contextualização e Sistema de Ancoragem

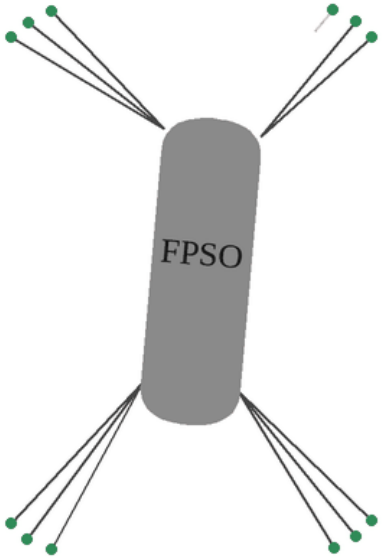
Expansão da produção *Offshore*



FPSO plataforma P-68
Fonte: Petrobras, 2022

- **Águas Profundas: Lâmina d'água superior a 2000 metros**
- **Plataformas FPSO: Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência**
- **Integridade Operacional: Necessidade de contenção de movimentos extremos**

Sistema de Ancoragem *Spread Mooring*



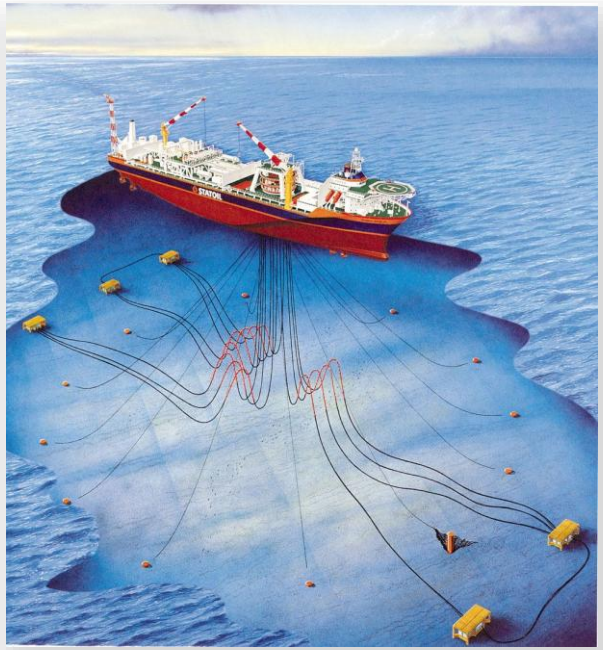
- **O sistema de ancoragem tem como objetivo manter a posição média do flutuante, limitando o *passeio da unidade*, que consiste no deslocamento da plataforma no plano**

Motivação

Estados de mar e contornos ambientais

A resposta estrutural é determinada pela ocorrência simultânea de ações ambientais no chamado **estado de mar**

- **Ações ambientais:**
  Ondas, ventos e correntes
- **Os parâmetros usuais:**
  A altura e o período das ondas, velocidade dos ventos e correntes e suas respectivas direções de propagação
- **Contornos ambientais:**
  Combinações de H_s e T_p associadas a um período de retorno, definidas a partir da dependência estatística entre as duas variáveis



FPSO e linhas de ancoragem
Fonte: Statoil, 2006

Motivação

Base de dados

A base de dados utilizada é extensa o suficiente a fim de evitar resultados muito simplificados

Locação e período:
Bacia de Santos, para um período de 25 anos

Frequência:
A cada 3 horas

Componentes:
Ondas *sea* e *swell*

	Sea			Swell			Vento		Corrente	
Data / hora	Hs (m)	Tp (s)	θ (°)	Hs (m)	Tp (s)	θ (°)	V (m/s)	θ (°)	V (m/s)	θ (°)
01/01/2010 00:00	1,42	6,8	42	1,65	12,1	178	9,6	45	0,14	228
01/01/2010 03:00	1,51	7,0	44	1,62	12,3	176	9,9	47	0,16	231
01/01/2010 06:00	1,73	7,4	39	1,58	12,4	177	10,5	41	0,19	233
01/01/2010 09:00	1,98	7,9	35	1,55	12,6	174	11,2	37	0,22	236
01/01/2010 12:00	2,24	8,3	31	1,49	12,8	173	11,8	33	0,25	239
01/01/2010 15:00	2,10	8,1	28	1,46	12,9	171	11,5	30	0,23	241
01/01/2010 18:00	1,84	7,6	33	1,44	13,1	172	10,8	35	0,20	238
01/01/2010 21:00	1,60	7,2	40	1,47	13,0	175	10,1	42	0,17	234

Objetivos

Abordagem Condicional vs. Teoria das Cópulas

O objetivo principal é investigar o impacto da modelagem probabilística conjunta de variáveis ambientais na definição dos contornos ambientais, estabelecendo modelos que capturem a dependência entre os parâmetros H_s e T_p

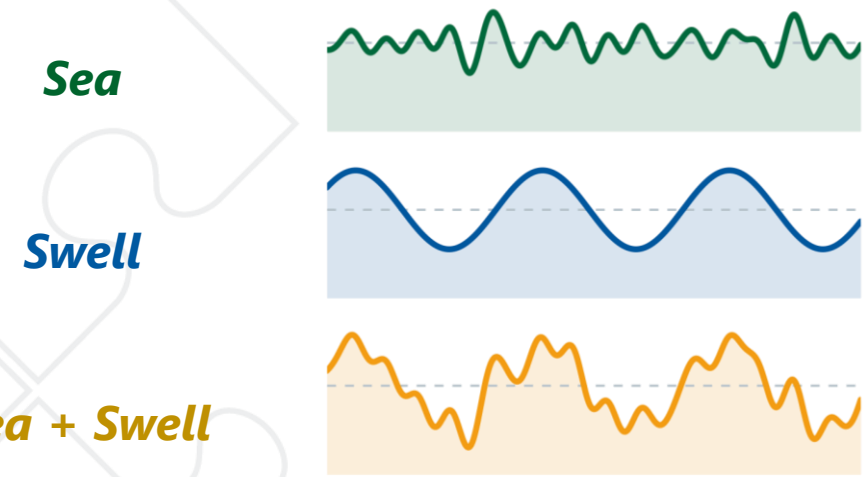
- ✓ **Busca-se, principalmente, uma boa representação da dependência estatística entre as variáveis**
- ✓ **Avaliação comparativa direta entre a Abordagem Condicional e a Teoria das Cópulas**

Metodologia

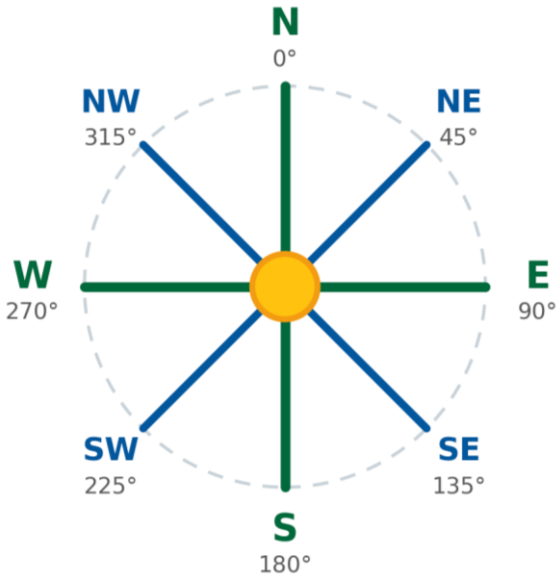
Base de dados

Os dados foram segregados em oito direções principais de propagação e analisados de forma independente para as componentes *sea* e *swell*

Componentes *sea* e *swell*



Oito direções principais de propagação



Metodologia

Abordagem Condicional vs. Teoria das Cópulas

Abordagem Condicional

$$f_{Hs,Tp}(hs, tp) = f_{Hs}(hs) \cdot f_{Tp|Hs}(tp, hs)$$

A partir de:

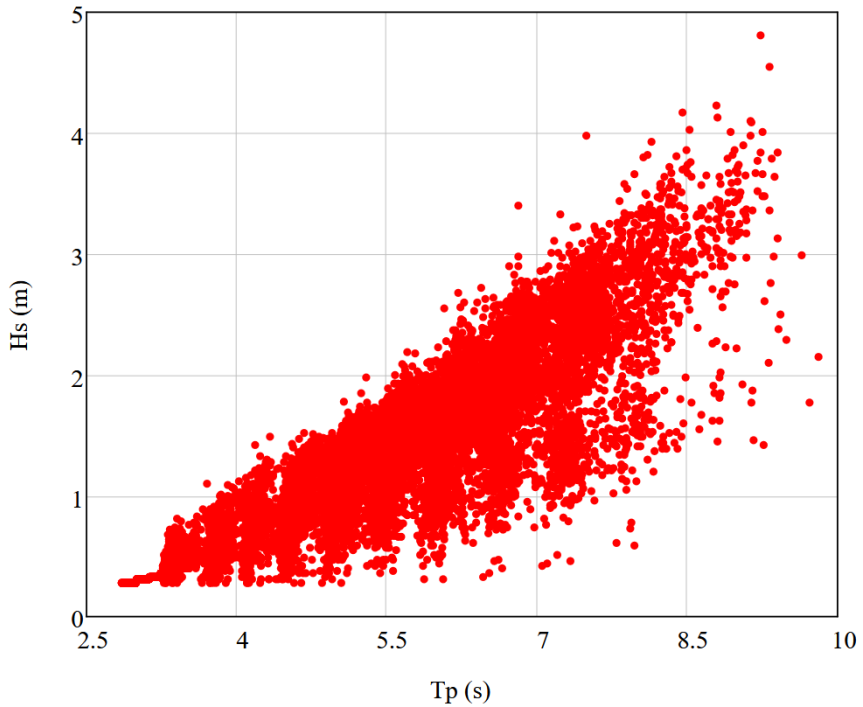
- Distribuição marginal de H_s
- Distribuição condicional de T_p dado H_s

Teoria das Cópulas

$$F_{Hs,Tp}(hs, tp) = C(F_{Hs}(hs), F_{Tp}(tp))$$

A partir de:

- Distribuição marginal de H_s
- Distribuição marginal de T_p
- Cópula gaussiana, definida pela correlação de Pearson (ρ)



Dispersão de *Hs* e *Tp* (direção E)

Metodologia - Abordagem Condicional

Fundamentos teóricos

A distribuição conjunta é definida a partir da teoria de probabilidade condicional

$$P(A|B) = \frac{P(B \cap A)}{P(B)}$$

$$P(B \cap A) = P(B) \cdot P(A|B)$$

$$f_{Tp|Hs}(tp, hs) = \frac{f_{Hs,Tp}(hs, tp)}{f_{Hs}(hs)}$$

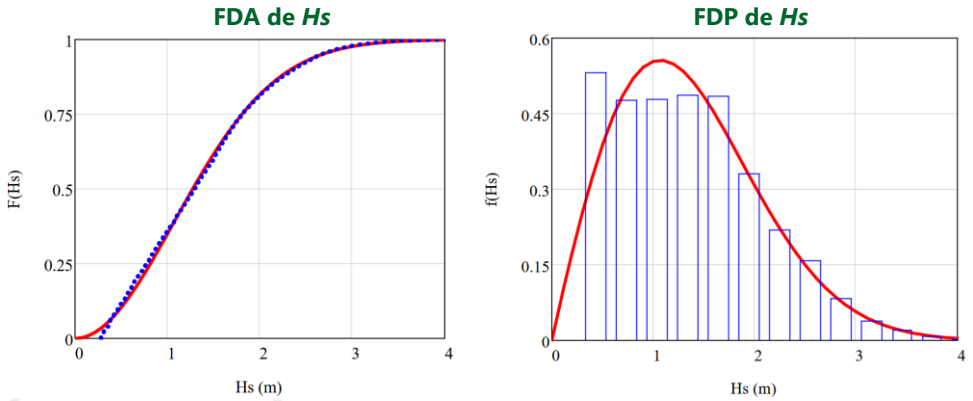
$$f_{Hs,Tp}(hs, tp) = f_{Hs}(hs) \cdot f_{Tp|Hs}(tp, hs)$$

Em que $f_{Tp|Hs}(tp, hs)$ é ajustada por uma função Lognormal segundo recomendação da DNV:

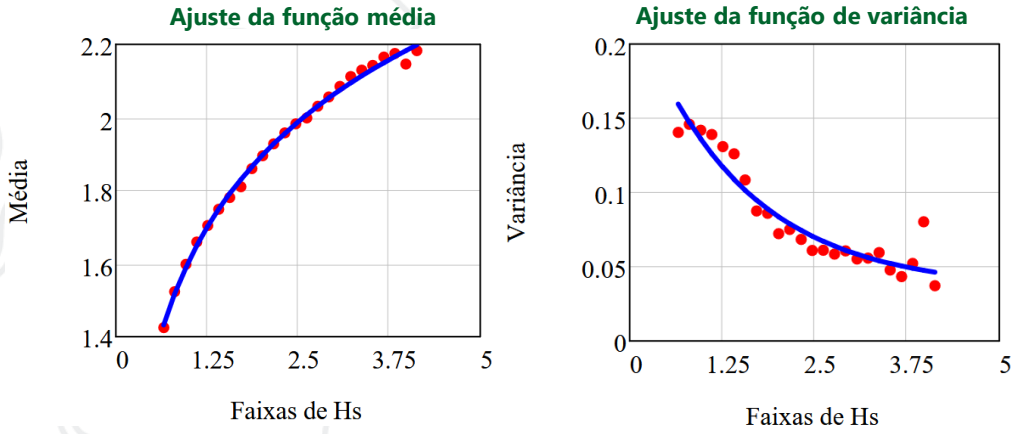
$$f_{Tp|Hs}(tp, hs) = \frac{1}{tp \cdot \xi_{tp}(hs) \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{ln(tp) - \lambda_{tp}(hs)}{\xi_{tp}(hs)}\right)^2\right)$$

Metodologia - Abordagem Condicional

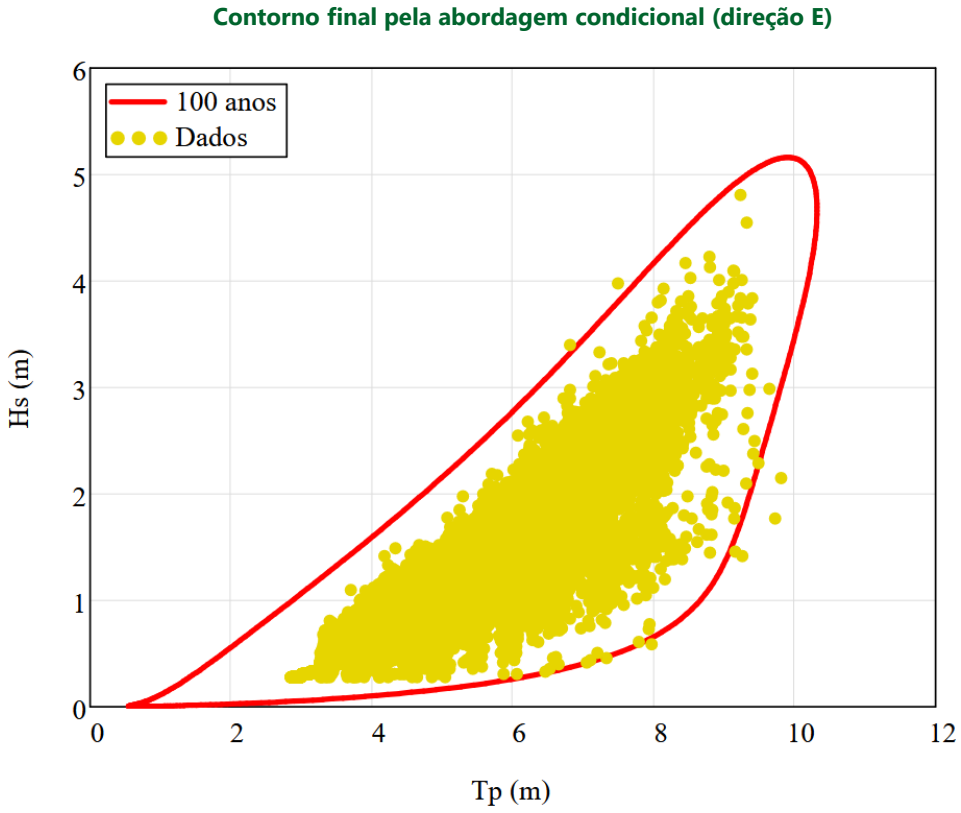
1. Distribuição marginal de H_s



2. Distribuição conjunta de T_p dado H_s



3. Contorno ambiental



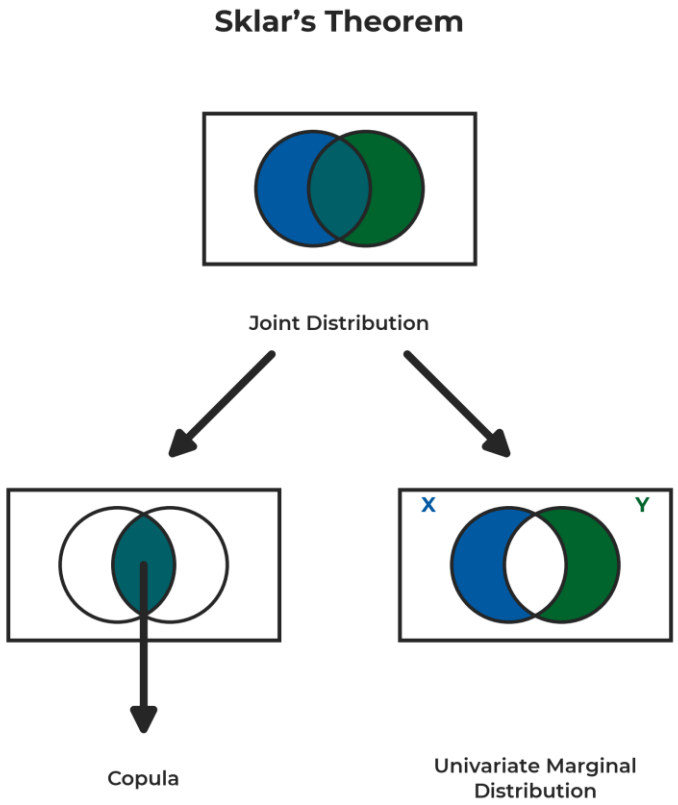
Metodologia - Teoria das Cópulas

Fundamentos teóricos

- **Característica:**
  Separa o ajuste das distribuições marginais da modelagem da estrutura de dependência

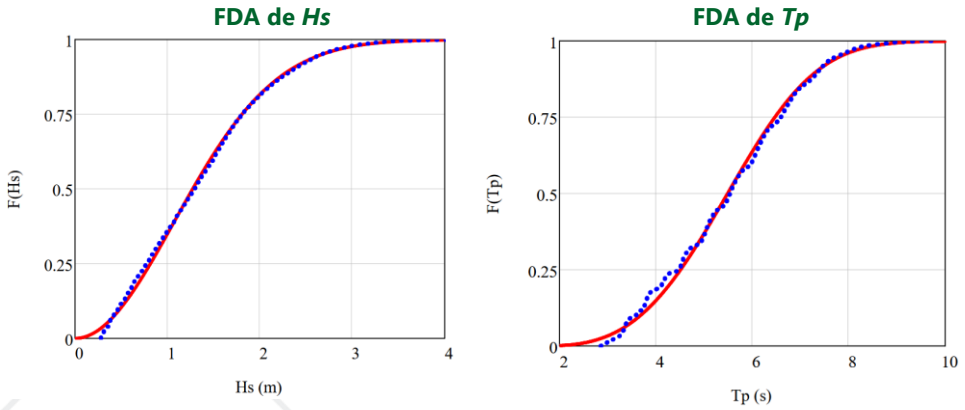
- **Teorema de Sklar:**
  A distribuição conjunta é obtida ligando as marginais por uma função cópula
  $F_{Hs,Tp}(hs, tp) = C(F_{Hs}(hs), F_{Tp}(tp))$

- **Cópula gaussiana:**
  Definida pelo coeficiente de correlação de Pearson (ρ) entre as variáveis



Metodologia - Teoria das Cópulas

1. Distribuição marginal de H_s e T_p



2. Cópula gaussiana

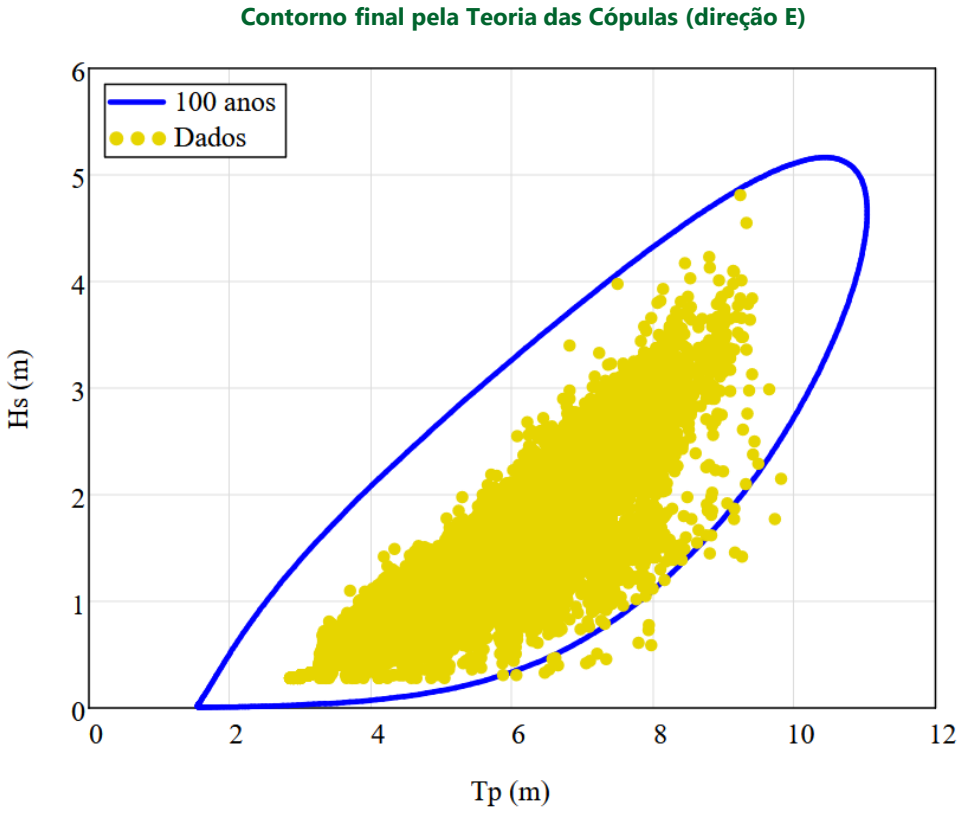
Definida através da correlação de Pearson (ρ)

$$\rho = \frac{\sum(hs_i - \overline{hs}) \cdot (tp_i - \overline{tp})}{\sqrt{\sum(hs_i - \overline{hs})^2 \cdot (tp_i - tp)^2}}$$

$$\boldsymbol{\rho = 0,88}$$

Para a direção E

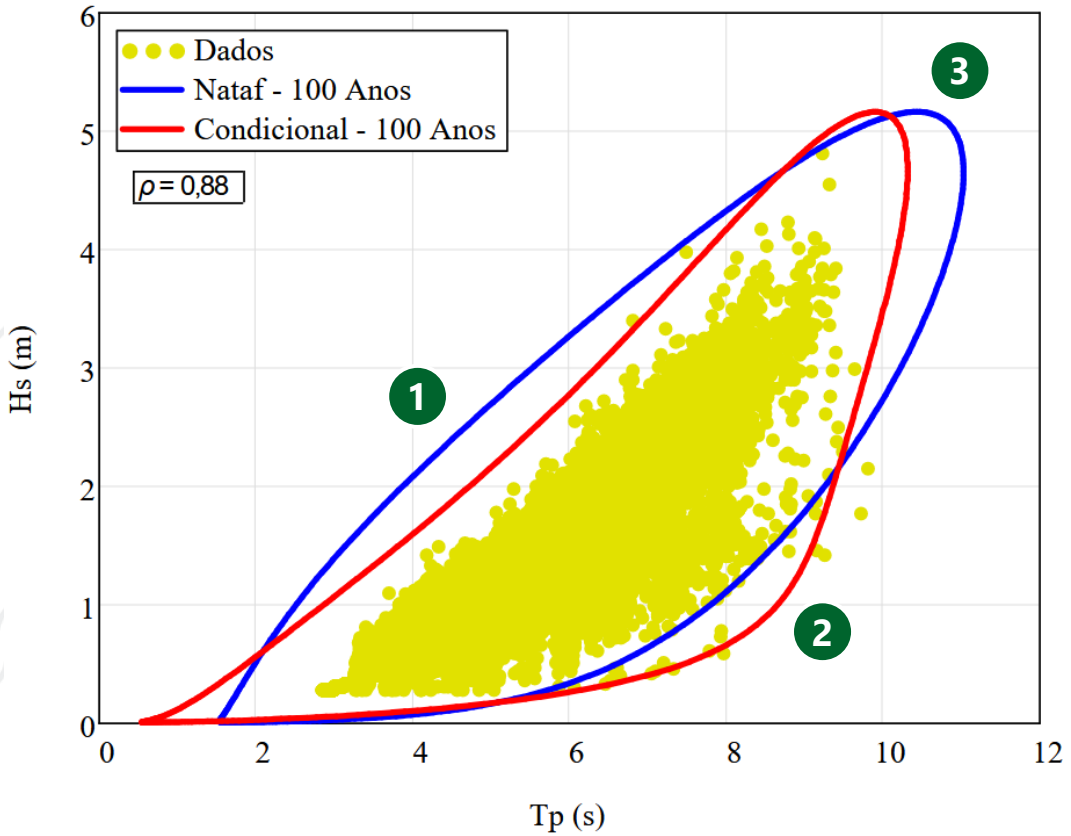
3. Contorno ambiental



Resultados

Contornos ambientais finais

Cada contorno delimita as combinações de H_s e T_p associadas ao período de retorno de 100 anos



Contornos finais das duas metodologias (direção E)

1 **Valores médios de H_s**

O ajuste pela Cópula gaussiana possui mais pares fora dos dados, sendo melhor ajustados na abordagem condicional

2 **Valores inferiores de H_s**

Melhor ajustados também pela Abordagem Condicional, que seguiu com o contorno nos valores mais dispersos da tendência

3 **Valores máximos de H_s**

Valor máximo de H_s igual nas duas abordagens devido ao uso da mesma distribuição marginal da variável

Conclusões

Principais observações e próximos passos

- A metodologia foi aplicada em todas as direções, exceto nas que possuíam baixa porcentagem de ocorrência (<5%)
- O contorno ambiental depende das distribuições utilizadas entre as variáveis
- Direções onde H_s e T_p possuem baixa correlação os contornos são menos aderentes aos dados

Próximos passos

1. Análise

Aplicar os contornos ambientais à análise das linhas do sistema de ancoragem

2. Comparação dos métodos

Comparar o impacto da escolha do método

3. Sensibilidade

Avaliar a sensibilidade dos resultados aos diferentes ajustes dos parâmetros

Referências Bibliográficas

SIMÃO, M. L.; SAGRILO, L. V. S.; VIDEIRO, P. M. A Multi-Dimensional Long-Term Joint Probability Model for Environmental Parameters. *Ocean Engineering*, v. 255, 111470, 2022.

GNING, M. Modelagem Probabilística Conjunta de Variáveis Ambientais via Teoria de Cópulas. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2026

HAVER, S.; WINTERSTEIN, S. R. Environmental Contour Lines: A Method for Estimating Long-Term Extremes by a Short-Term Analysis. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, v. 116, p. 116-127, 2009

MOSQUERA, I. A. M. Modelo de Função de Probabilidade Conjunta de Parâmetros Ambientais Usando a Transformada de Nataf. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

RUI, S. et al. A review on mooring lines and anchors of floating marine structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 199, 114547, 2024.

prh anp

Encontro Nacional do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP - 2026

Obrigada!

anp | Gestão: FAPESP



Bruna da Silva Gomes

Dados para contato:

bruna.gomes@poli.ufrj.br

LinkedIn


prh anp


anp
Gestão:
FAPESP