

Série dos Seminários de Acompanhamento à Pesquisa

DEI
DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA
INDUSTRIAL

Número 31 | 10 2021

Problema de Programação de Máquinas Paralelas: uma abordagem *math-heuristic*

Autora:

Luana Mesquita Carrilho



Série dos Seminários de Acompanhamento à Pesquisa



Número 31 | 10 2021

Problema de Programação de Máquinas Paralelas: uma abordagem *math-heuristic*

Autora:

Luana Mesquita Carrilho

Orientador: Silvio Hamacher



CRÉDITOS:

SISTEMA MAXWELL / LAMBDA
<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/>

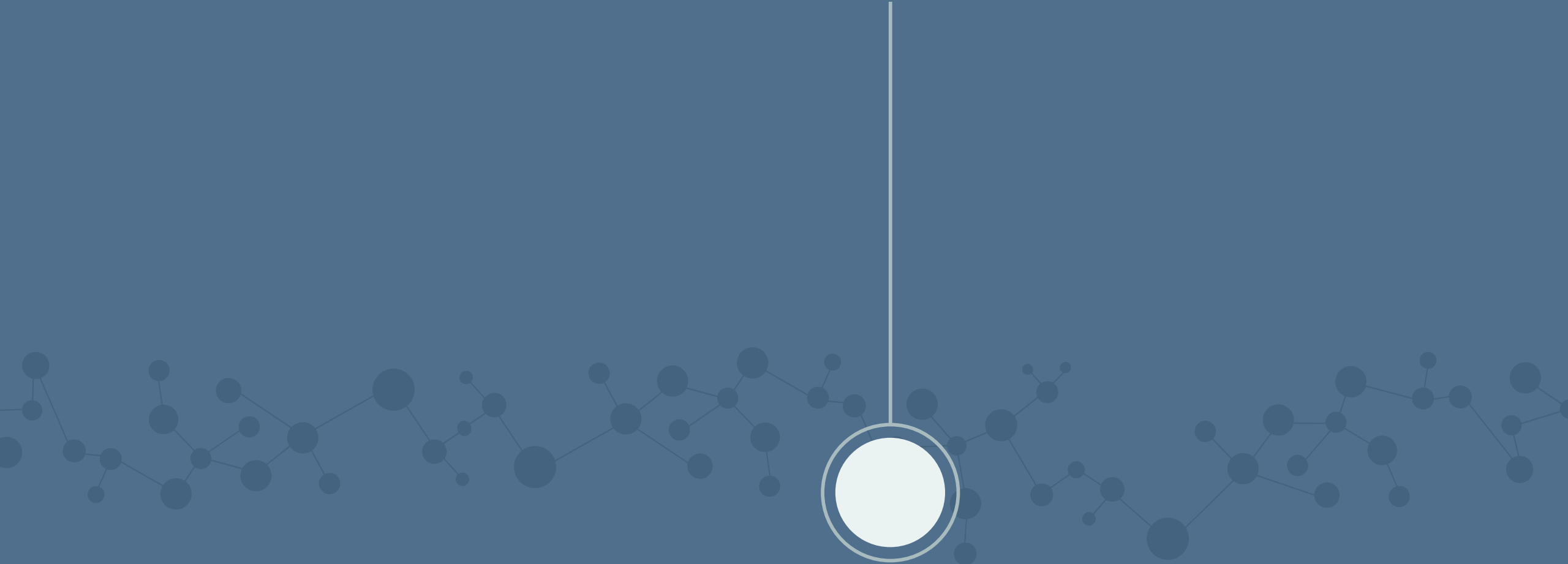
Organizadores: Fernanda Baião / Soraida Aguilar

Layout da Capa: Aline Magalhães dos Santos

Agenda

- Quem sou eu?
- Programação de Sondas
- Literatura
- Formulações matemáticas e Algoritmos
- Resultados Preliminares





Quem sou eu?



Luana Mesquita Carrilho

Rio de Janeiro, 27 anos

Doutoranda em Pesquisa Operacional no DEI PUC-Rio (5º período)

Pesquisadora no Instituto Tecgraf/PUC-Rio (desde 2016)

Mestrado em Transporte e Logística no DEI PUC-Rio (2019.1)

Formulação Bucket-Indexed: uma nova abordagem para resolver o problema de Programação de Máquinas Paralelas

Luana Carrilho, Silvio Hamacher, Tiago Andrade

Graduação em Engenharia de Produção na PUC-Rio (2017.1)

CORE: Decision Support System for Oil Rig Scheduling

Luana Carrilho, Mayra Villas Boas, Silvio Hamacher



DEI
DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA
INDUSTRIAL



TRABALHOS ACADÊMICOS

XLIX Simpósio Brasileiro
de Pesquisa Operacional
Blumenau, SC - 27 a 30 de Agosto



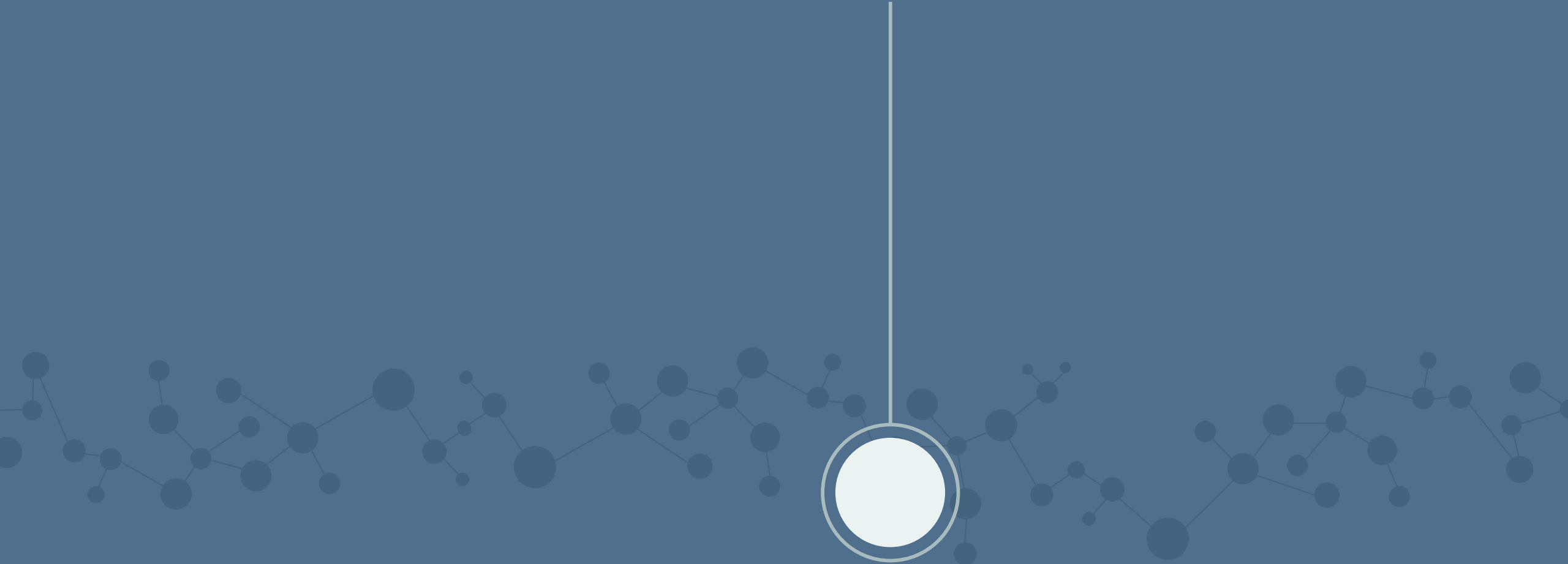
SANTOS, I. M. ; CARRILHO, L. M. ; OLIVEIRA, F. L. C. ; ANDRADE, T. ; RIBAS, G. . Offshore Oil Rig Scheduling Simulation: a multi-perspective approach. In: XLIX SBPO, 2017, Blumenau. Proceedings of the Brazilian Symposium on Operations Research. Rio de Janeiro - Brazil.: SOBRAPO, 2017. p. 2628-2639.

CARRILHO, L. M.; ANDRADE, T. ; RIBAS, G. ; HAMACHER, S. . Dimensionamento e sequenciamento de sondas usando a formulação bucket-indexed. In: L SBPO, 2018, Rio de Janeiro. Proceedings of the Brazilian Symposium on Operations Research, 2018.

MARCHESI, J. ; CARRILHO, L. M. ; GELLI, J. G. ; HAMACHER, S. ; SOUSA, P. H. M. S. . Otimização do planejamento de projetos: aplicação à construção de poços marítimos em uma indústria de Óleo e Gás. In: LI SBPO, 2019, Limeira SP. Proceedings of the Brazilian Symposium on Operations Research, 2019.

CARRILHO, L. M.; HAMACHER, S. ; ANDRADE, T. . A Bucket Indexed Formulation for Parallel Machine Scheduling Problem. In: 2019 INFORMS-ALIO INTERNATIONAL CONFERENCE, 2019, Cancun. INFORMS, 2019.

SOUSA, P. H. M. S. ; NOBREGA, M. V. S. ; ANDRADE, L. F. C. ; SILVA, M. V. M. ; ASSIS, H. R. ; MARIANI, B. L. ; CARRILHO, L. M. . Service Demand Forecasting using In-House Developed Specialized Software (Delfos) applied to Oil and Gas Industry. In: 2019 INFORMS-ALIO INTERNATIONAL CONFERENCE, 2019, Cancun. INFORMS, 2019.



Programação de Sondas

PROGRAMAÇÃO DE SONDAS

A Exploração e Produção (E&P) de petróleo é parte fundamental da cadeia de suprimentos na indústria de Óleo e Gás. As fases envolvem operações técnicas complexas e grandes investimentos.

[Suslick et al., 2009; Devold, 2013]



PROGRAMAÇÃO DE SONDAS

Segundo Irgens et al. [2008], a programação de sondas é uma das atividades mais importantes na indústria de Óleo e Gás.

Altos investimentos na aquisição de recursos e operações

Complexidade no sequenciamento dos poços devido às restrições técnicas e de precedência

Grande horizonte de planejamento

Complexidade na Programação de Sondas

Elevado preço das
sondas
(US\$ 400.000 –US\$ 600.000)



Incertezas do problema
(Geológicas, Econômicas,
Produção)



Figura 1. Sonda Semi-Submersível

PROGRAMAÇÃO DE SONDAS

Segundo Reid *et al.* [2016], a maioria dos planejamentos falham ao estimar prazos, orçamento e expectativas de produção

Necessidade de ferramentas de apoio à decisão para melhorar as análises

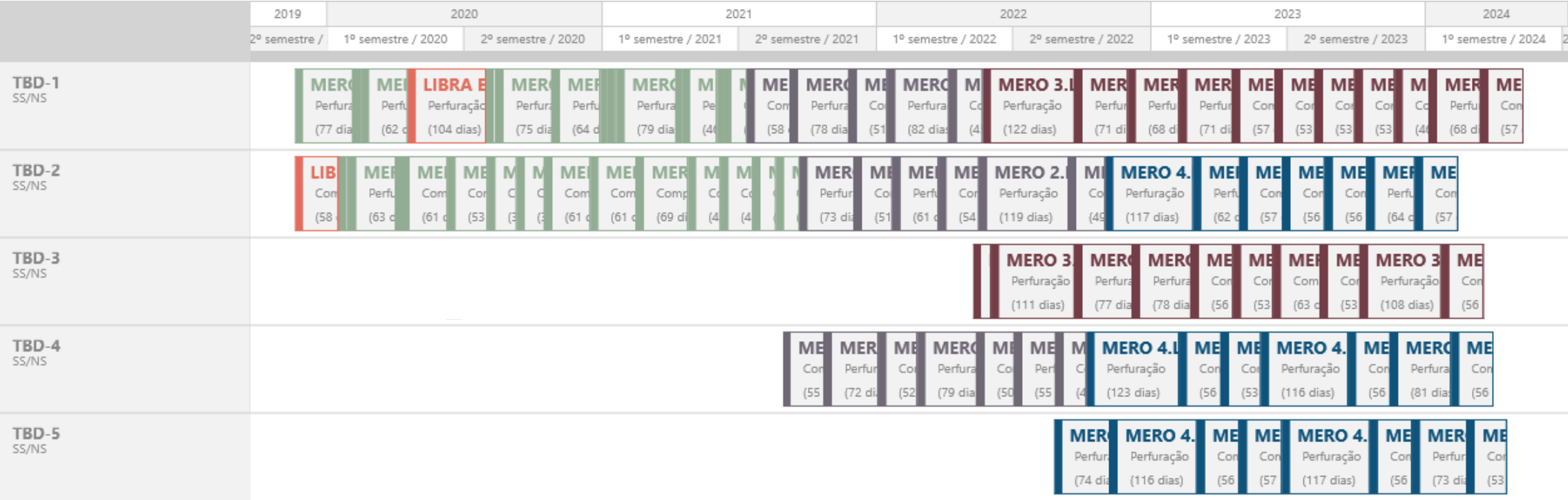


Figura 2. Programação de Sondas

PROGRAMAÇÃO DE SONDAS

CARACTERIZAÇÃO DAS INSTÂNCIAS



80 a 500

poços



Data de liberação (*release date*)

Data de entrega (*deadline*)

Precedência entre tarefas

Grandes tempos de processamento



20 a 70

sondas



Frota heterogênea

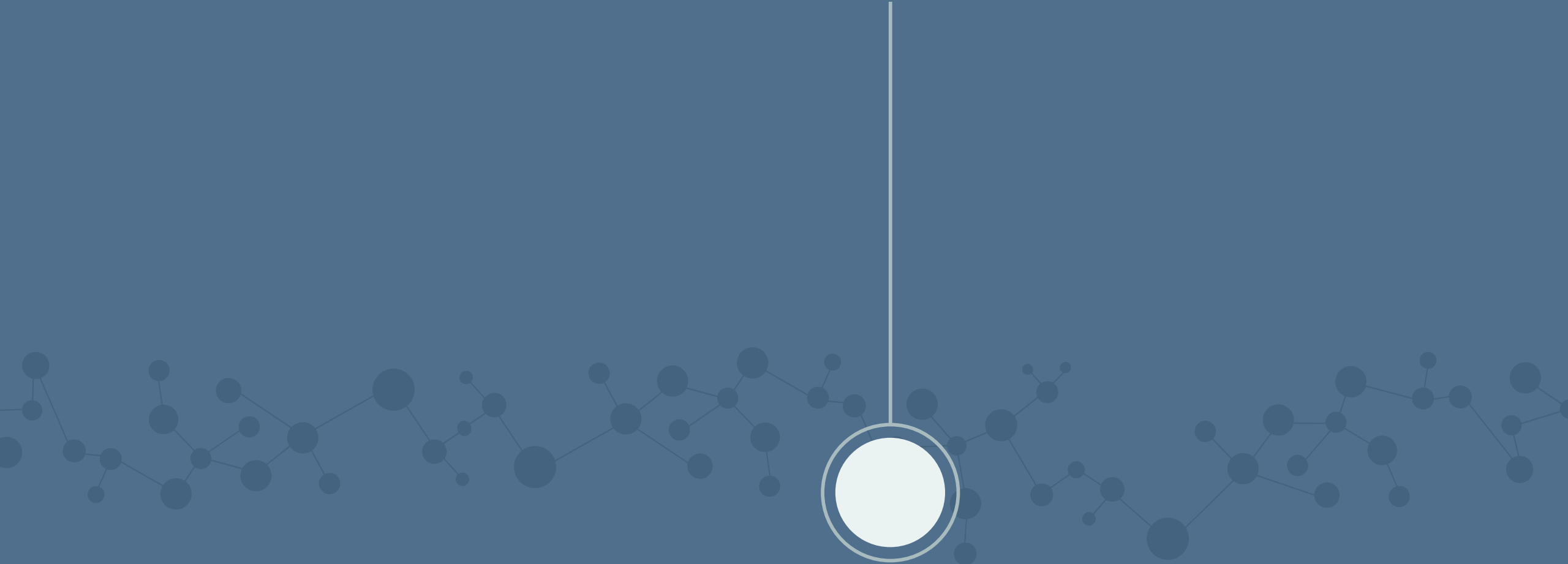
Períodos de Disponibilidade

Restrições técnicas e contratuais



03 a 10

anos



Literatura

LITERATURA

O problema de programação de sondas pode ser tratado como um problema de **programação de máquinas paralelas**

Tarefas dos poços = Jobs

Sondas = Máquinas



LITERATURA

O objetivo é alocar tarefas nos recursos disponíveis em determinados períodos de tempo com afim de otimizar alguma medida de desempenho.

[Pinedo, 2008]



LITERATURA

POR QUE ESTUDAR ESSE PROBLEMA

No contexto de **PROGRAMAÇÃO DE SONDAS**

- É um problema pouco estudado na literatura usando métodos exatos.
- A maioria dos autores abordam o problema em uma versão simplificada usando heurística e metaheurística.
- As instâncias são de portes reduzidos e as características e restrições do problema real são simplificadas.

Paiva et al. [2000], Aloise et al. [2006], Ribeiro et al. [2011], Pacheco et al. [2012], Ribeiro et al. [2012a]; Ribeiro et al. [2012b], Duhamel et al. [2012]



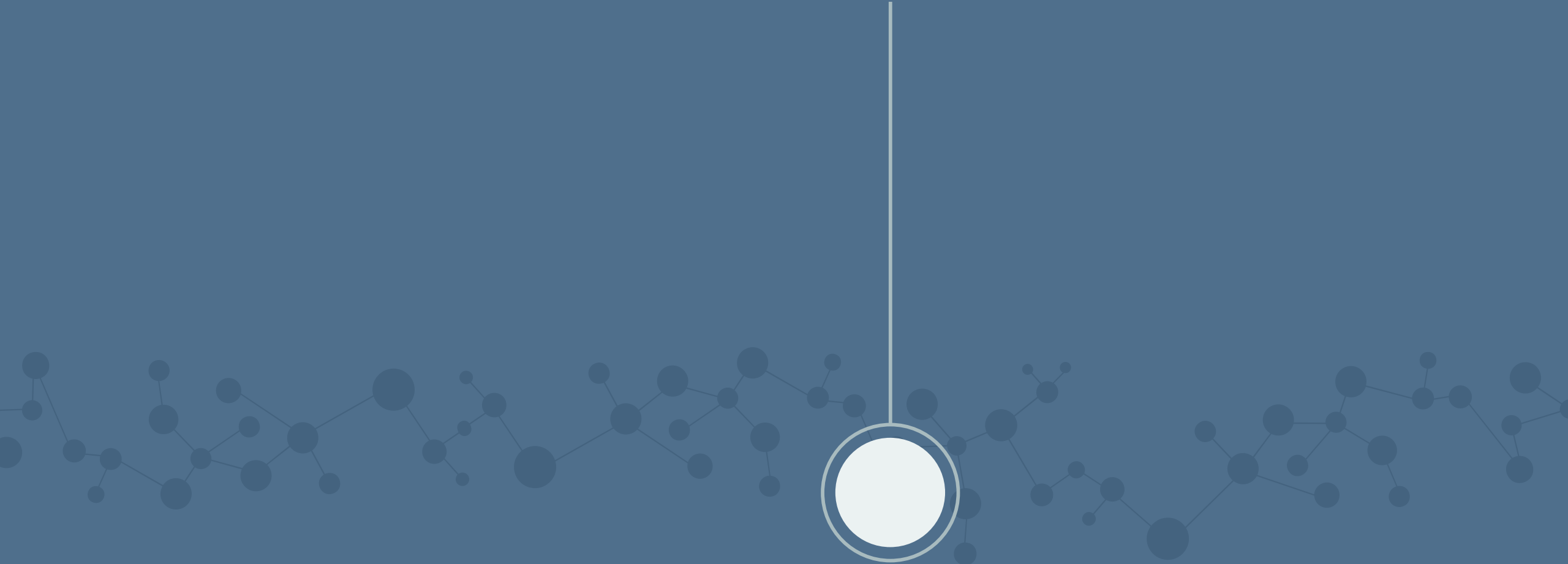
LITERATURA

POR QUE ESTUDAR ESSE PROBLEMA

No contexto de **PROGRAMAÇÃO DE MÁQUINAS PARALEL**

- Há um crescente interesse pela pesquisa de programação de máquinas paralelas que proporciona grandes avanços **no desenvolvimento de técnicas e melhores soluções para problemas práticos.**
[Behera, 2012; Kaabi e Harrath, 2014]
- É um problema NP-difícil em que a dificuldade dos problemas indica que o esforço computacional requerido para encontrar uma solução ótima aumenta exponencialmente com o porte da instância.
[MOKOTOFF, 2001]





Formulações matemáticas e Algoritmos

FORMULAÇÃO TIME-INDEXED

A formulação clássica time-indexed (TI), apresentada por Dyer e Wolsey (1990), é um método exato capaz de encontrar a solução ótima para problemas combinatórios.

A maioria dos problemas complexos de planejamento da produção são modelados com essa formulação.

[Boland et al. (2016)]

DESVANTAGEM

O tamanho do horizonte de planejamento cresce de maneira pseudopolinomial com o tamanho da instância, podendo ser intratável

[Van den Akker et al. (1999); Baptiste et al. (2009)]



$$\min \sum_{m \in M_j} \sum_{j \in J} \sum_{t \in [1, T]} x_{m,j,t} (t + p_j - 1) \quad (3-2)$$

$$\sum_{m \in M_j} \sum_{t \in [1, T]} x_{m,j,t} = 1 \quad \forall j \in J \quad (3-3)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in [t - p_j + 1, t]} x_{m,j,t} \leq 1 \quad \forall m \in M_j, \forall t \in [1, T] \quad (3-4)$$

$$\sum_{m \in M_{\hat{j}}} \sum_{t \in [1, T]} t \cdot x_{m,\hat{j},t} - \sum_{m \in M_j} \sum_{t \in [1, T]} t \cdot x_{m,j,t} \geq dif_{j,\hat{j}} \quad \forall (j, \hat{j}) \in J \mid prec_{j,\hat{j}} = 1 \quad (3-5)$$

$$x_{m,j,t} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \forall m \in M_j, \forall t \in T \mid existe X_{m,j,t} = 1 \quad (3-6)$$

Figura 3. Formulação Time-Indexed de Carrilho (2019)

FORMULAÇÃO BUCKET-INDEXED

A formulação bucket-indexed (BI) proposta por Boland et al. (2016) é um modelo de programação linear inteira mista baseado em uma discretização do horizonte em períodos de tempo chamados de buckets.

Carrilho (2019) estendeu a **formulação *bucket-indexed*** para resolver o problema de programação de máquinas paralelas.

$$\min \sum_{m \in M_j} \sum_{j \in J} \sum_{b \in [1, B]} \sum_{k \in K} \left((b + P_j + k - 2) z_{m,j,b,k} + v_{m,j,b+P_j+k-1,k} \right) \Delta \quad (4-1)$$

$$\sum_{m \in M_j} \sum_{b \in [1, B]} \sum_{k \in K} z_{m,j,b,k} = 1 \quad \forall j \in J \quad (4-2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{\hat{b} \in [b-P_j-k+1, b]} z_{m,j,\hat{b},k} \leq 1 \quad \forall m \in M_j, \forall b \in [1, B] \quad (4-3)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} u_{m,j,b,k} + v_{m,j,b,k} + \sum_{\hat{b} \in [b-P_j-k+1, b-1]} z_{m,j,\hat{b},k} \leq 1 \quad \forall m \in M_j, \forall b \in [1, B] \quad (4-4)$$

$$u_{m,j,b,k} + v_{m,j,b+P_j+k-1,k} = (2 - k - \pi_j) z_{m,j,b,k} \quad \forall m \in M_j, \forall j \in J, \forall b \in [1, B], \forall k \in K \quad (4-5)$$

$$\left((1 - k)(1 - \pi_j) + \frac{1}{\Delta} \right) z_{m,j,b,k} \leq u_{m,j,b,k} \quad \forall m \in M_j, \forall j \in J, \forall b \in [1, B], \forall k \in K \quad (4-6)$$

$$u_{m,j,b,k} \leq (1 - k\pi_j) z_{m,j,b,k} \quad \forall m \in M_j, \forall j \in J, \forall b \in [1, B], \forall k \in K \quad (4-7)$$

$$inicio_j = \sum_{m \in M_j} \sum_{b \in [1, B]} \sum_{k \in K} \left((b - 1) z_{m,j,b,k} - u_{m,j,b,k} \right) \Delta + \Delta + 1 \quad \forall j \in J \quad (4-11)$$

$$inicio_j - inicio_{\hat{j}} \geq dif_{j,\hat{j}} \quad \forall (j, \hat{j}) \in J \mid prec_{j,\hat{j}} = 1 \quad (4-12)$$

$$u_{m,j,R_j,0} \leq \rho_j z_{m,j,R_j,0} \quad \forall m \in M_j, \forall j \in J \mid 1 - \pi_j < \rho_j \leq 1 \quad (4-13)$$

$$u_{m,j,R_j,1} \leq \rho_j z_{m,j,R_j,1} \quad \forall m \in M_j, \forall j \in J \mid \rho_j \leq 1 - \pi_j \quad (4-14)$$

$$\bar{\delta}_j z_{m,j,\bar{D}_j,0} \leq u_{m,j,\bar{D}_j,0} \quad \forall m \in M_j, \forall j \in J \mid 1 - \pi_j < \bar{\delta}_j \leq 1 \quad (4-15)$$

$$\bar{\delta}_j z_{m,j,\bar{D}_j,1} \leq u_{m,j,\bar{D}_j,1} \quad \forall m \in M_j, \forall j \in J \mid \bar{\delta}_j \leq 1 - \pi_j \quad (4-16)$$

Figura 4. Formulação Bucket-Indexed de Carrilho (2019)

FORMULAÇÃO BUCKET-INDEXED

A ideia da formulação é discretizar o horizonte de planejamento em buckets.

O tamanho do bucket (Δ) é definido por $1 \leq \Delta \leq \min_j p_j$

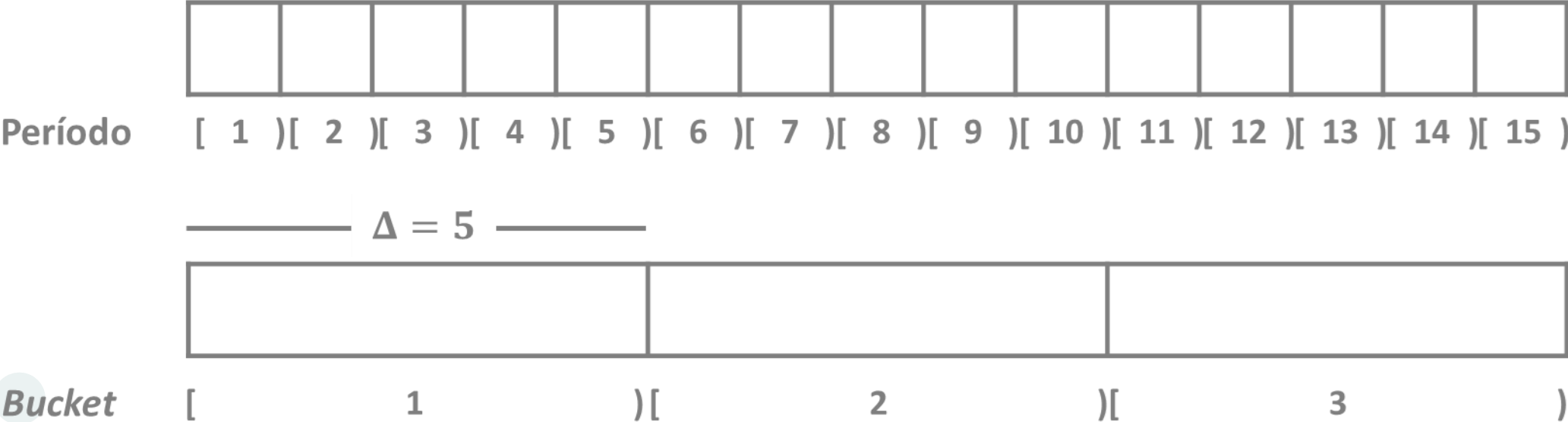
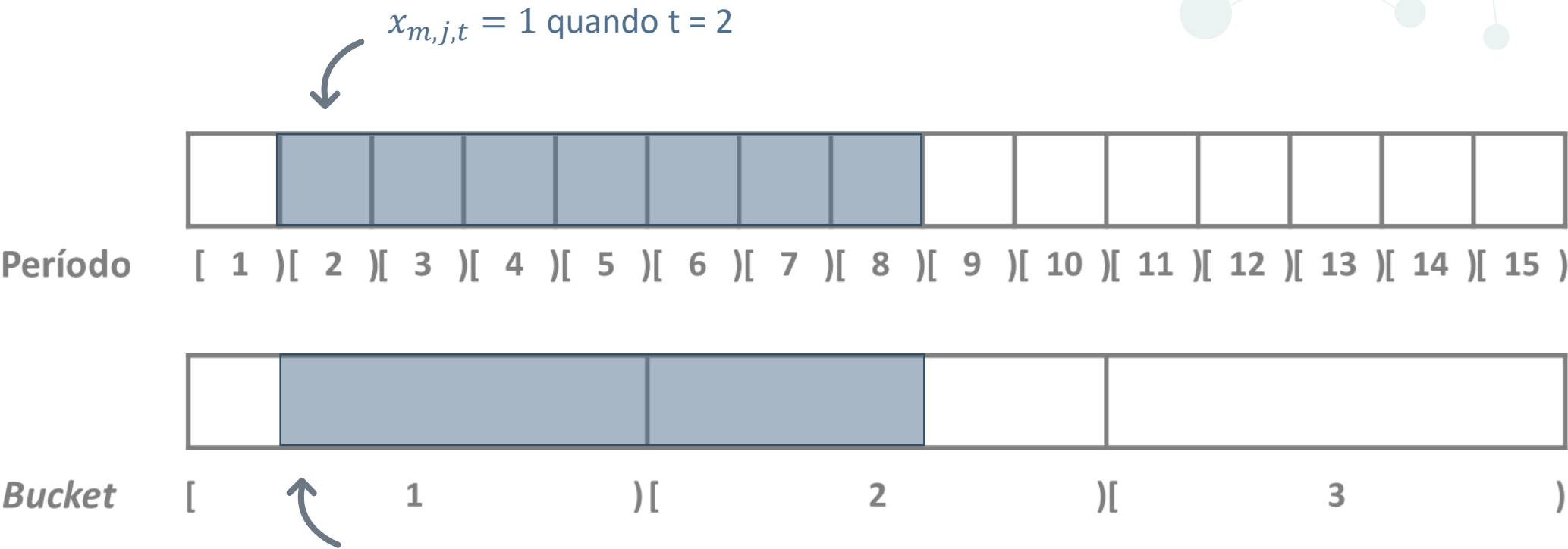


Figura 5. Horizonte de Planejamento discretizado em períodos e *buckets*

FORMULAÇÃO BUCKET-INDEXED



DESVANTAGEM

O desempenho da formulação bucket-indexed é prejudicado por tamanho de buckets $\Delta \leq 2$, pois esta formulação nestes casos gera o dobro de variáveis que a formulação time-indexed.

FIX-AND-OPTIMIZE MATH-HEURISTIC

Outra alternativa é utilizar abordagens de math-heuristics para o problema.

O fix-and-optimize utiliza uma solução inicial viável e iterativamente busca melhores soluções, a partir do procedimento de fixar parte das variáveis.

O algoritmo testado a cada iteração sorteia um par de máquina as quais serão otimizadas e todo o restante da solução é fixada.

Algorithm 4: Fix-and-optimize heuristic ($P(x(t), y(t))$, FB, IS, BS, n, rep_it)

```
Define FB;  
Define n;  
IS:= RF Solution;  
BS:= Obj. Func. of Initial Solution; and Bucket Size of IS  
FixIntegerVariables ( $x(t) \mid t \in \text{FB}$ );  
rep_it:=1;  
while rep_it <= n do  
    Solve  $P(x(t), y(t))$ ;  
    If Obj. func. of P < BS then  
        BS:= Obj. Func. of P; and Bucket Size of P  
        rep_it:=1  
    else  
        rep_it:=it+1;  
    endif;  
    Redefine Fixed Block;  
endwhile;  
GetLastSolution BS
```

FB – Fixed Blocks

n – max # of iterations without improvement

IS – Initial Solution

BS – Best Solution

OBJETIVO DA PESQUISA



Soluções viáveis para instâncias
com **baixo tempo computacional**



TI

Formulação proposta
por Carrilho (2019)

Algumas instâncias
são intratáveis

BI

Formulação proposta
por Carrilho (2019)

**Todas as soluções
alcançaram menores
tempos**

Algumas instâncias
são intratáveis

fix&opt TI

Nova implementação

Tempos das soluções
equiparados ao ou
maiores

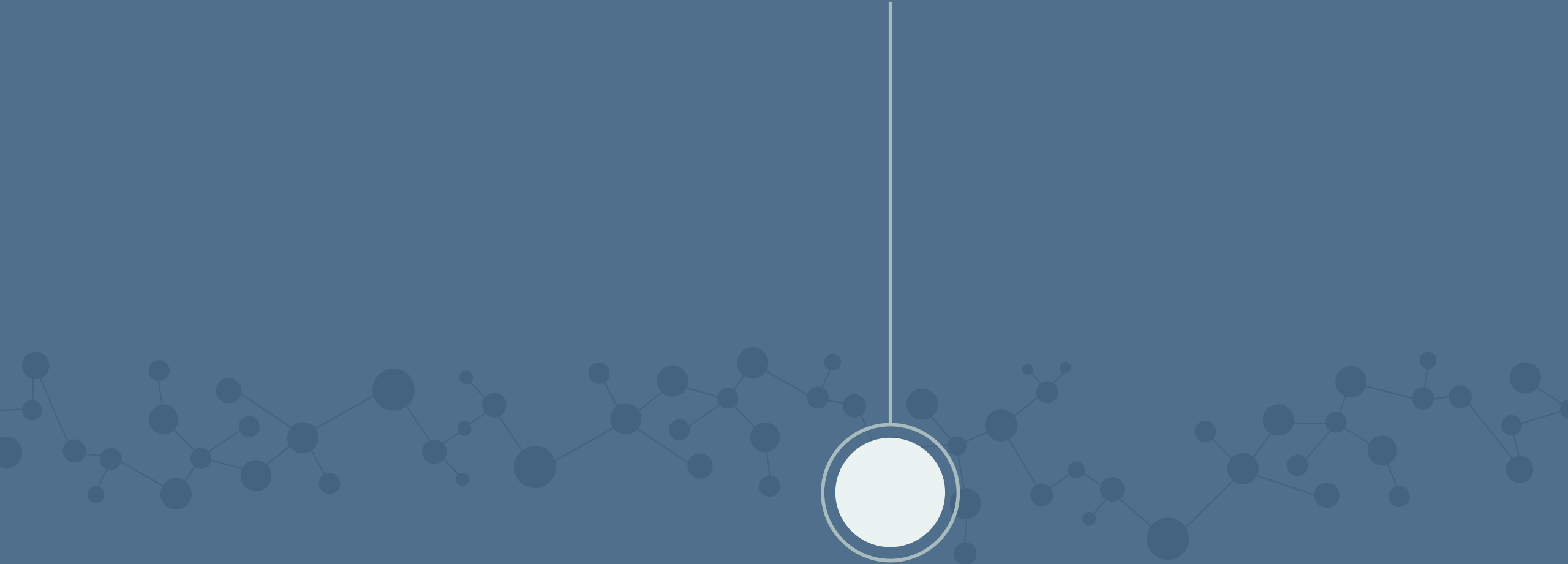
Algumas instâncias
são intratáveis

fix&opt BI

Nova implementação

Expectativa!
Tempos das soluções
menores

Resolver instâncias
até o momento
intratáveis



Resultados Preliminares

RESULTADOS PRELIMINARES



Os testes foram executados em um computador
Intel® Core™ | i-8550 CPU | 1.80 GHz | 20.00 GB RAM.

O modelo foi implementado em Julia usando JuMP.


Solver: Gurobi 8.1.0

O tempo limite foi de 3600s



GUROBI
OPTIMIZATION

RESULTADOS PRELIMINARES



Instância	# Tarefas	# Sondas	# Períodos	# <i>Buckets</i>	Δ
1	15	10	2464	36	69
2	68	31	2401	62	39
3	110	32	2261	162	14
4	100	35	2296	329	7
5	324	41	2345	336	7
6	638	73	2464	353	7

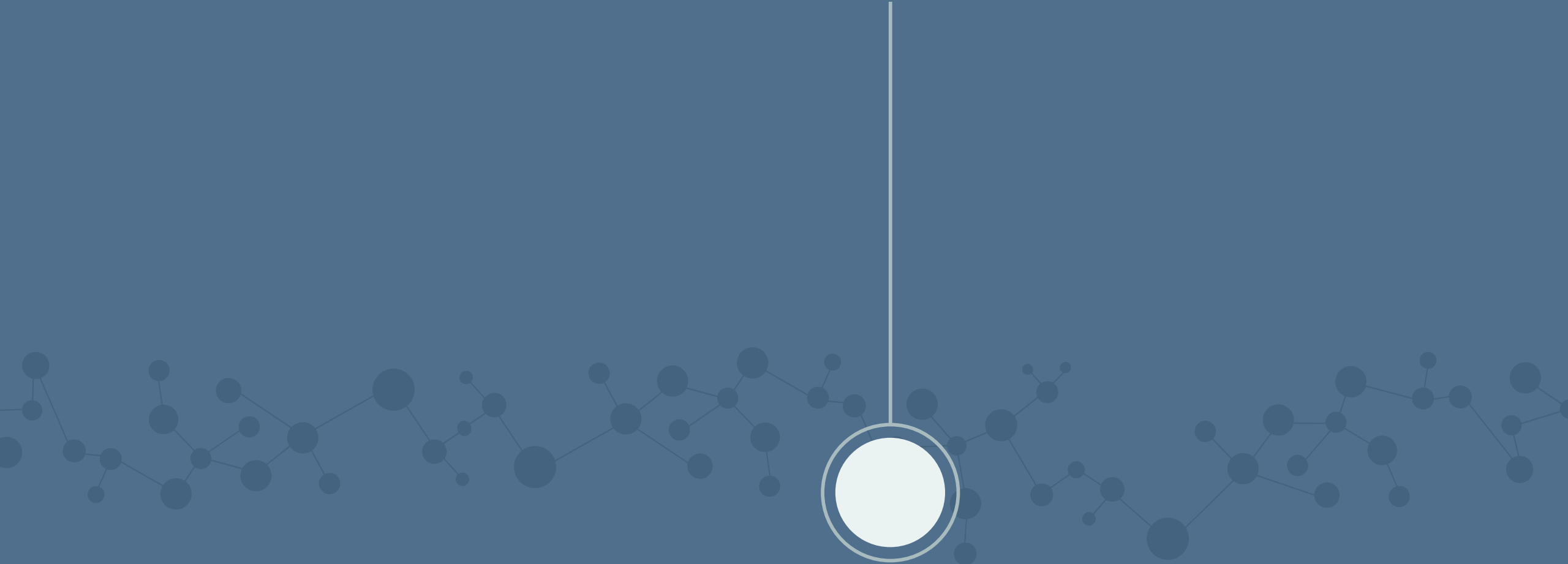
Instâncias reais da indústria de Óleo & Gás



RESULTADOS PRELIMINARES

Instância	# Tarefas	# Sondas	# Períodos	# Buckets	Δ	TI	BI	fix&opt TI	fix&opt BI
1	15	10	2464	36	69	0,32	0,01	0,01	0,01
2	68	31	2401	62	39	40,27	0,92	12,52	1,02
3	110	32	2261	162	14	68,79	7,87	21,38	6,88
4	100	35	2296	329	7	31,75	10,55	9,87	8,45
5	324	41	2345	336	7	955,81	179,25	297,18	99,85

Resultados: todos os testes obtiveram o mesmo resultado. Os tempos estão em segundos



Obrigada!