

Série dos Seminários de Acompanhamento à Pesquisa

DEI
DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA
INDUSTRIAL

Número 40 | 06 2022

Impacto da agregação de preços em zonas no exercício unilateral de poder de mercado em um mercado hidrotérmico por ofertas

Autor:

João Pedro Mattos Costa



Série dos Seminários de Acompanhamento à Pesquisa

Número 40 | 06 2022

Impacto da agregação de preços em zonas no exercício unilateral de poder de mercado em um mercado hidrotérmico por ofertas

Autor:

João Pedro Mattos Costa

Orientador: Prof. Dr. Bruno Fânzeres do Santos

CRÉDITOS:

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

Organizadores: Fernanda Baião / Soraida Aguilar

Layout da Capa: Aline Magalhães dos Santos



Apresentação pessoal



João Pedro Mattos Costa



UFRJ

Graduação em Engenharia Elétrica – DEE/UFRJ (2011 - 2018)

Ênfase em Sistemas de Potência



Graduação Sanduíche – TU Ilmenau (2014 - 2015)

Programa Ciências sem Fronteiras Alemanha



PUC
RIO

Mestrando em Engenharia Industrial – DEI/PUC-Rio (2020 -)

Operações e Negócios em Engenharia > Gestão de Negócios > Análise de decisão



ONS
Operador Nacional
do Sistema Elétrico

Estagiário – GET-2/EGP (2016 - 2018)

Superação de equipamentos e estudos de curto-circuito aplicados a acesso e leilões de geração e transmissão



ONS
Operador Nacional
do Sistema Elétrico

Trainee IV – EI (2018 - 2019)

Eng. Estratégia Organizacional I - TE (2020 -)

Planejamento Estratégico, Programa de Participação nos Resultados, Indicadores de Desempenho, Plano Diretor de Desenvolvimento Tecnológico, Prospecção Tecnológica



Apresentação pessoal



João Pedro Mattos Costa

Mestrando em Engenharia Industrial – DEI/PUC-Rio

Ingresso: 2020.2

Período atual: 4º

Área de concentração: Operações e Negócios em Engenharia

Linha de pesquisa: Gestão de Negócios

Projeto de Pesquisa: Análise de decisão

Orientador: Prof. Dr. Bruno Fânzeres do Santos



PUC
RIO

Período 1: Mercado de Capitais, Análise de Decisão e Risco e Economia da Energia (DEE)

Período 2: Programação Linear (DEE), Modelagem e Simulação de Energia Renovável Variável, Programação Matemática e Probabilidade e Estatística

Período 3: Optimization under Uncertainty e Monitoria em Análise de Decisão e Risco

Período 4: Projeto de Dissertação



Objetivos da apresentação



Compartilhar a linha de raciocínio até definição da pesquisa



Relatar histórico da discussão no Brasil e aspectos regulatórios envolvidos



Apresentar principais fundamentos teóricos e gaps na literatura



Apresentar a hipótese, pergunta de pesquisa e proposta da dissertação

Índice



Contextualização

Formação do preço da energia: metodologia, processo, alternativas



Motivação

Indústria x Academia



Fundamentação teórica

Base teórica e *gaps*



Proposta da dissertação

Hipótese, perguntas e objetivos do trabalho



Conclusão e dúvidas

Principais conclusões, estágio atual da pesquisa e próximos passos

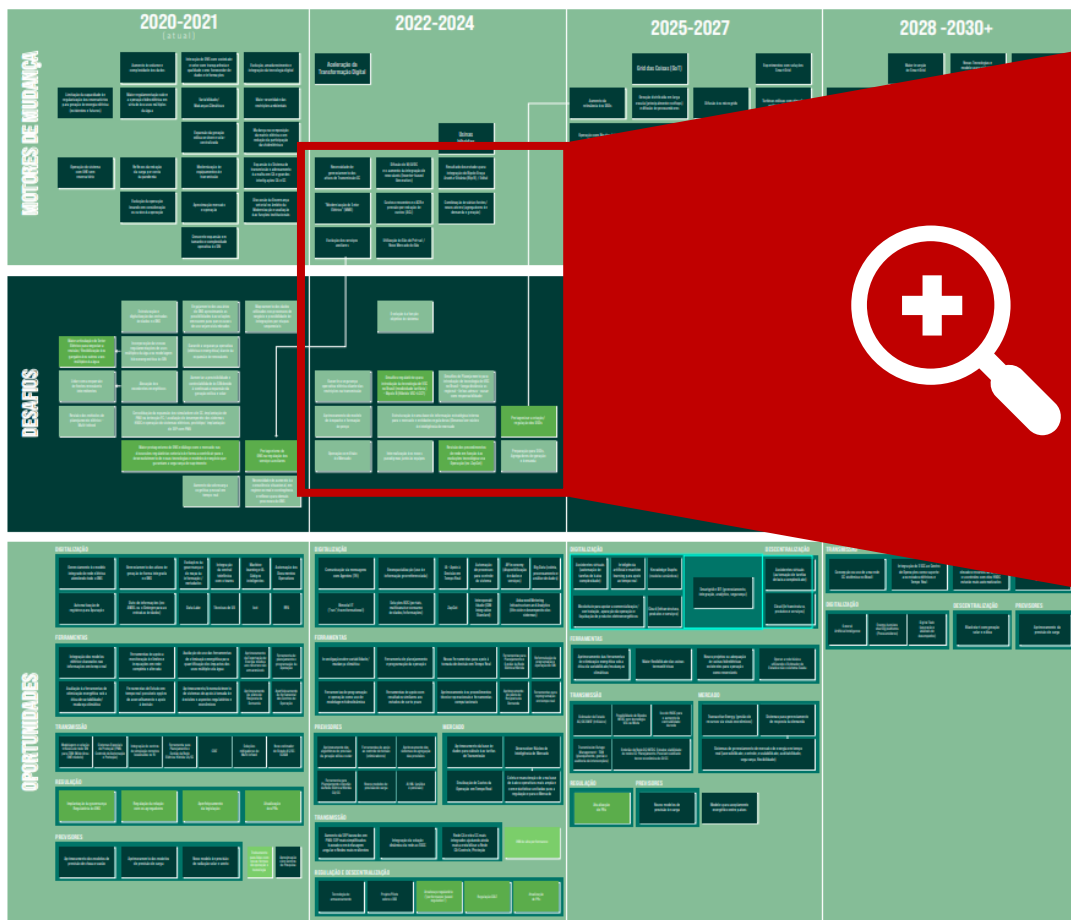
A decorative background featuring a network of dark blue nodes of varying sizes connected by thin lines, spanning horizontally across the middle of the image. A vertical white line descends from the top center to a white circle containing the number 1.

1

Motivação

Motivação

Cenário Tecnológico do ONS Consolidado



Motores de
Mudança

Desafios

2022-2024

"Modernização do
Setor Elétrico"
(MME)

Aprimoramento do
modelo de despacho e
formação de preço



ONS como Cooperador Técnico do Projeto de P&D
ANEEL PD-00403-0050/2020 "Propostas de
metodologias para a formação de preços por oferta
no Brasil" – Engie/PSR + ONS + CCEE

Links: [Cenário Tecnológico](#) e [Paper XXVI SNPTEE \(2022\)](#)

Motivação

- Formação de preços é um assunto relevante para o Setor Elétrico
- Interesse pessoal por otimização
- Visão: Tornar-se um interlocutor nessa temática

Mas afinal...

- O que é e o que diz a “Modernização do Setor Elétrico”?
- Como é formado hoje o preço da energia elétrica no Brasil?
- Formação de preços por oferta – o que é? quais são as diferenças?



2

Contextualização

Contextualização - Mundo

- Processo de abertura dos mercados de energia elétrica
 - Garantir competitividade
 - Ampliação da descarbonização da matriz elétrica
 - Aumento da penetração de fontes de energia renovável
 - Maior autonomia dos consumidores
 - Aumento da penetração dos recursos energéticos distribuídos
- **Preço da energia precisa ser aderente à realidade e deve induzir comportamentos desejáveis dos competidores do mercado**

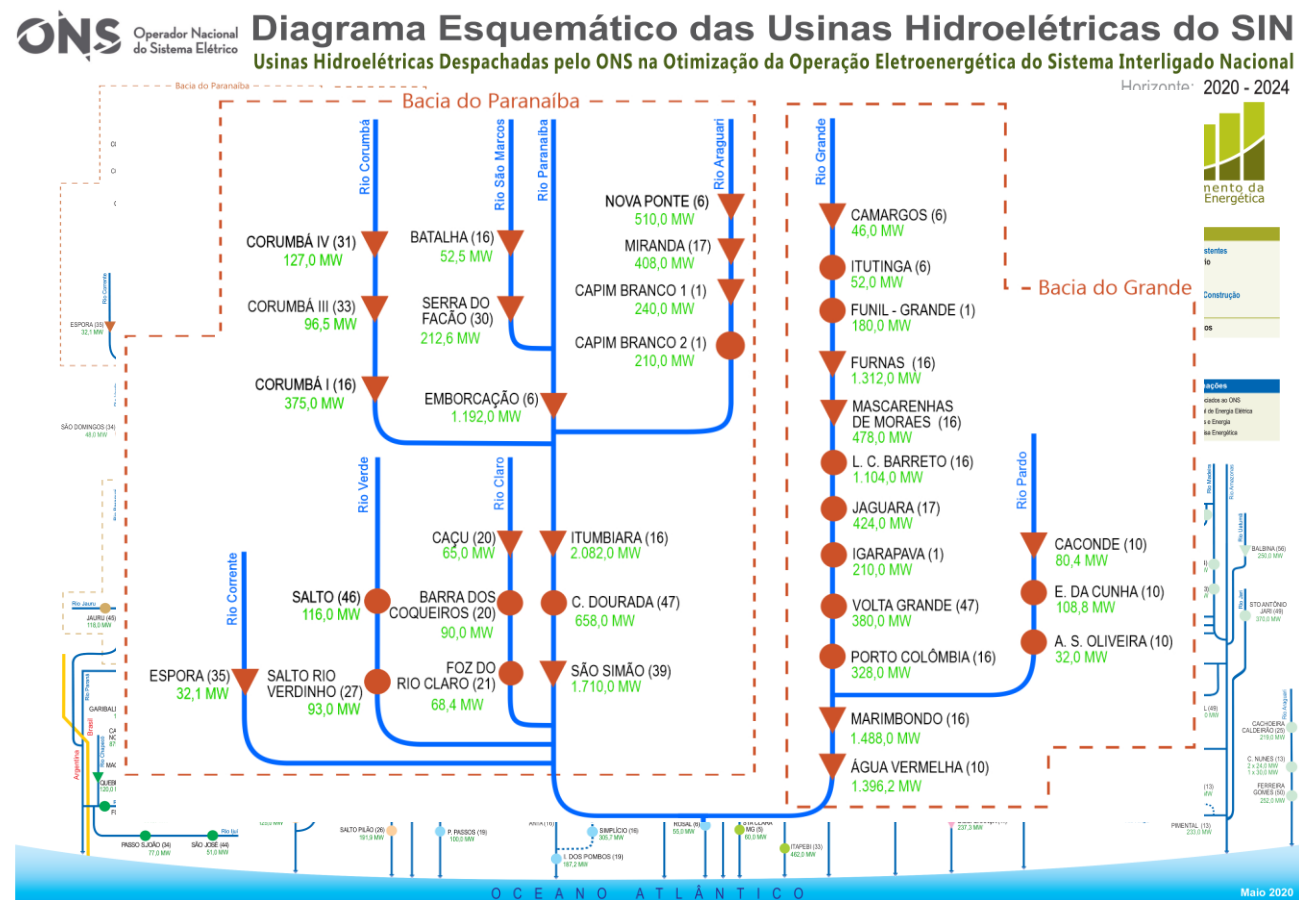


Contextualização – Mercado brasileiro e formação de preço

- Grandes transformações no SEB desde a década de 90
- Consulta Pública nº 033/2017 do MME → organização de um grupo de trabalho (GT) para conduzir a modernização do marco regulatório do SEB (Portaria MME nº 187/2019)
- GT Modernização
 - Relatório final com as principais tratativas para os próximos anos
 - Modernização do mecanismo de formação de preço
- Mecanismo vigente: “por custos auditados”
 - Baseado em uma cadeia de modelos de otimização eletroenergética
 - Cálculo do preço ótimo da energia a partir das informações dos custos de geração prestadas pelos agentes e auditadas pelo Regulador

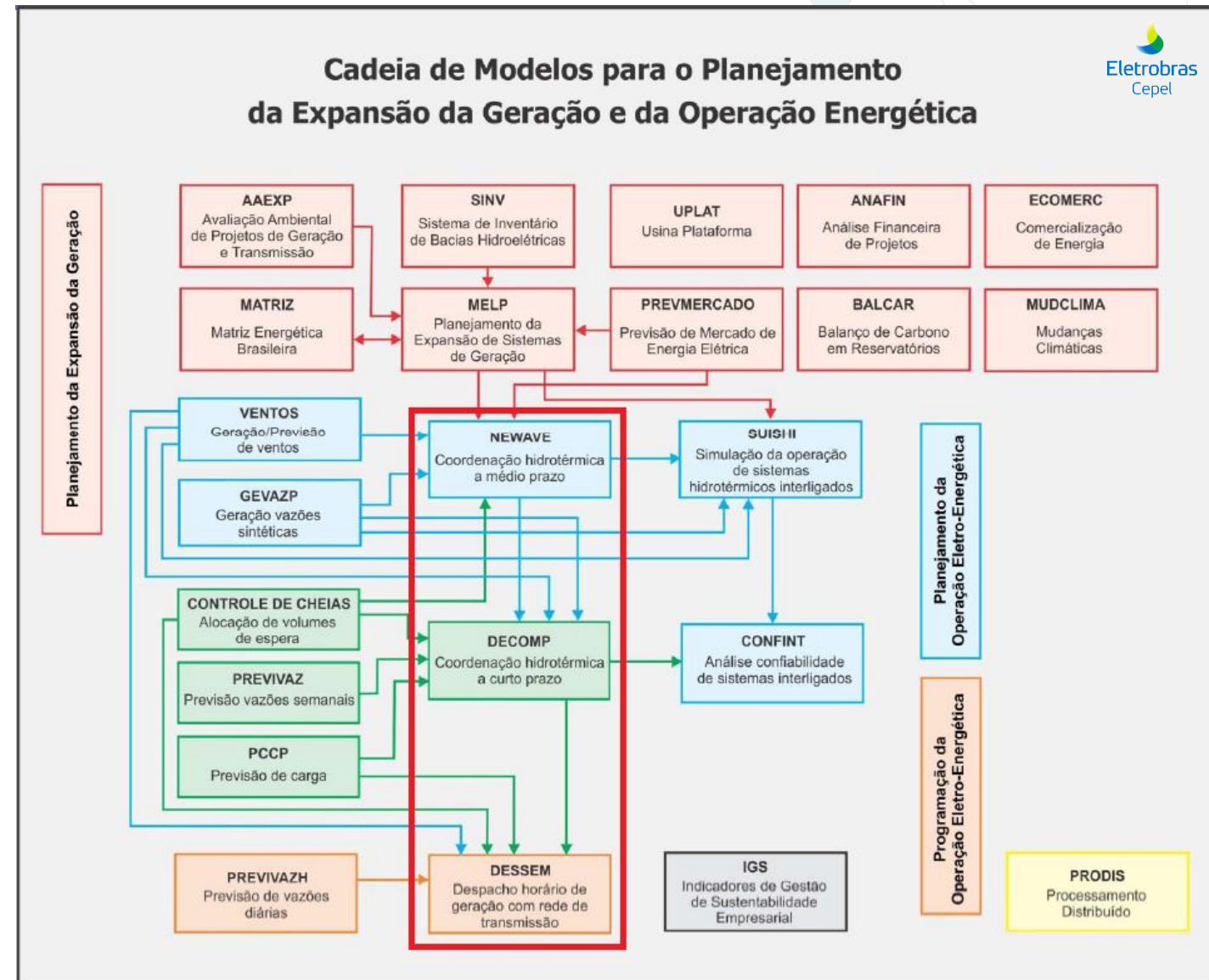
Planejamento e programação de sistemas hidrotérmicos

- Sistema hidro-termo-eólico
- Incertezas
 - Rede, condições hidrológicas, carga, previsão eólica e solar
 - Estocasticidade
- Acoplamento temporal
 - Multiestágio
- Acoplamento espacial
 - Cascatas com múltiplos proprietários
- Cadeia de modelos de otimização



Cadeia de modelos do Setor Elétrico - NEWAVE, DECOMP e DESSEM

- CEPEL
- ONS – operação, CCEE – preço
- Divisão do problema em horizontes
- Simplificação x Detalhamento



Cadeia de modelos do Setor Elétrico - NEWAVE, DECOMP e DESSEM

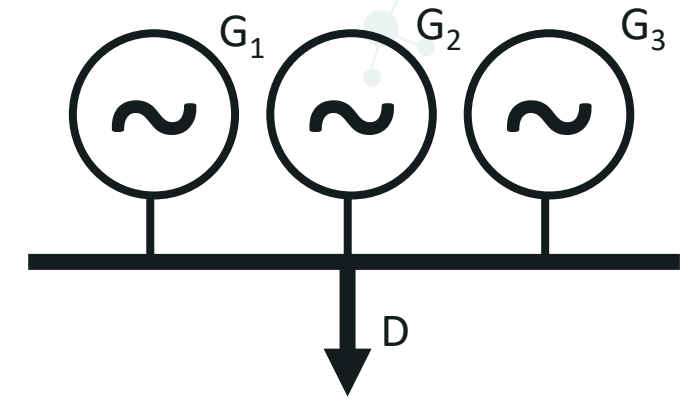
| Modelo | Prazo | Horizonte | Discretização | Representação | Resolução | Saídas |
|--------|------------|---------------------------------|------------------------------------|---|-----------|---|
| NEWAVE | Médio | 10 anos (5 anos) | Mensal | Reservatórios equivalentes, intercâmbios | PDDE | FCF para DECOMP |
| DECOMP | Curto | 2 meses a 1 ano (2 meses) | Semanal por patamar de carga | Usinas individualizadas , restrições elétricas | PDD | FCF para DESSEM CMOs semanais por patamar de carga |
| DESSEM | Curtíssimo | 2 semanas (1 semana) | Semi-horária | Unidades geradoras, rede modelada por fluxo DC | PLIM | CMO semi-horário Unit commitment |

Sistema térmico de uma barra, monoestágio

Exemplo 1

| | g_j | c_j |
|-------|---------|------------|
| G_1 | 0 | R\$ 0 |
| G_2 | 50 | R\$ 2.500 |
| G_3 | 140 | R\$ 14.000 |
| Total | 190 MWh | R\$ 16.500 |

$$\begin{aligned} \min_{g_j} \quad & \sum_{j=1}^{nG} C_j g_j \\ \text{s. a.} \quad & \sum_{j=1}^{nG} g_j = D, \quad \forall j \in nG \\ & 0 \leq g_j \leq \bar{G}_j, \quad \forall j \in nG \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} C_1 &= 150 \text{ R\$/MWh} & \bar{G}_1 &= 200 \text{ MW} \\ C_2 &= 50 \text{ R\$/MWh} & \bar{G}_2 &= 50 \text{ MW} \\ C_3 &= 100 \text{ R\$/MWh} & \bar{G}_3 &= 150 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$D = 190 \text{ MW}$$

Sistema térmico de uma barra, monoestágio

Exemplo 2

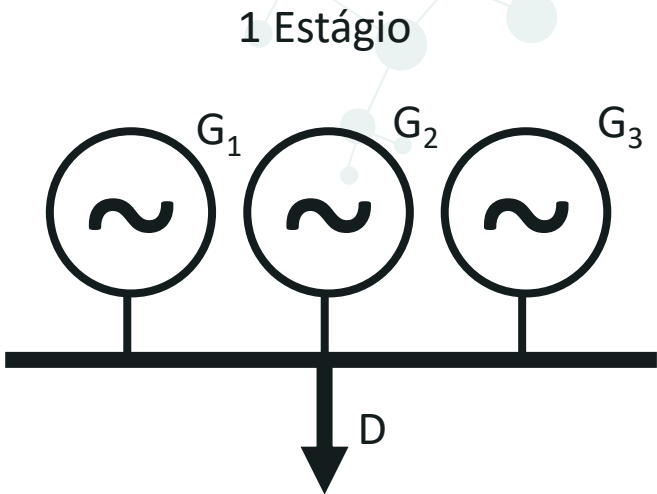
| | g_j | c_j |
|-------|---------|------------|
| G_1 | 0 | R\$ 0 |
| G_2 | 50 | R\$ 2.500 |
| G_3 | 141 | R\$ 14.100 |
| Total | 191 MWh | R\$ 16.600 |

$$\min_{g_j} \sum_{j=1}^{nG} C_j g_j$$

$$\begin{aligned} \text{s. a. } & \sum_{j=1}^{nG} g_j = D, \\ & 0 \leq g_j \leq \bar{G}_j, \end{aligned} \quad \forall j \in nG : \pi$$

$\pi = \text{R\$ } 100/\text{MWh}$

Custo de oportunidade: CMO e PLD



$$\begin{aligned} C_1 &= 150 \text{ R\$/MWh} & \bar{G}_1 &= 200 \text{ MW} \\ C_2 &= 50 \text{ R\$/MWh} & \bar{G}_2 &= 50 \text{ MW} \\ C_3 &= 100 \text{ R\$/MWh} & \bar{G}_3 &= 150 \text{ MW} \end{aligned}$$

$D = 191 \text{ MW}$

Sistema térmico de três barras, modelo de transporte, monoestágio

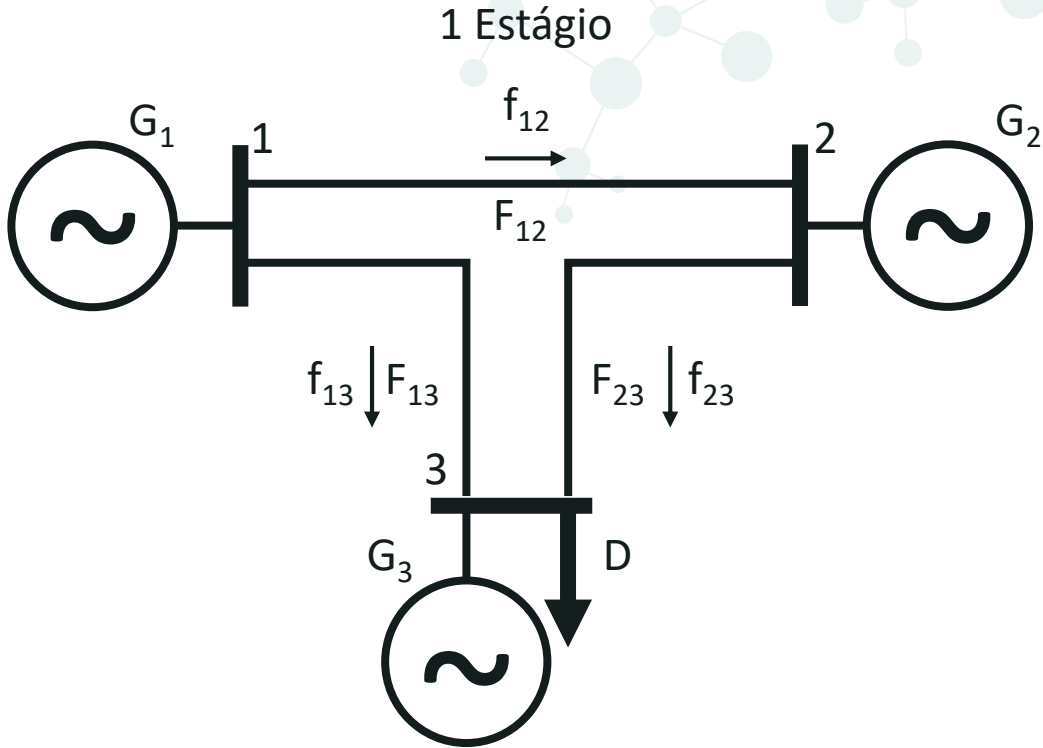
Exemplo 3

| | g_j | c_j |
|-------|---------|------------|
| G_1 | 10 | R\$ 1.500 |
| G_2 | 30 | R\$ 1.500 |
| G_3 | 150 | R\$ 15.000 |
| Total | 190 MWh | R\$ 18.000 |

| | f_{ij} |
|----------|----------|
| F_{12} | -20 |
| F_{13} | 30 |
| F_{23} | 10 |

Restrições encarecem,
mas retratam a
realidade

$\pi = \text{R\$ } 100/\text{MWh}$



$C_1 = 150 \text{ R\$/MWh}$ $C_2 = 50 \text{ R\$/MWh}$ $C_3 = 100 \text{ R\$/MWh}$


$\overline{G}_1 = 200 \text{ MW}$ $\overline{G}_2 = 50 \text{ MW}$ $\overline{G}_3 = 150 \text{ MW}$



$\overline{F}_{12} = 20 \text{ MW}$ $\overline{F}_{13} = 70 \text{ MW}$ $\overline{F}_{23} = 10 \text{ MW}$

$D = 190 \text{ MW}$

Preço de Liquidação das Diferenças – PLD

- Preço *spot* do mercado livre de energia: π
- Custo de oportunidade
- Gerado pelo DESSEM: PLD horário
- Oficial desde 01/01/2021



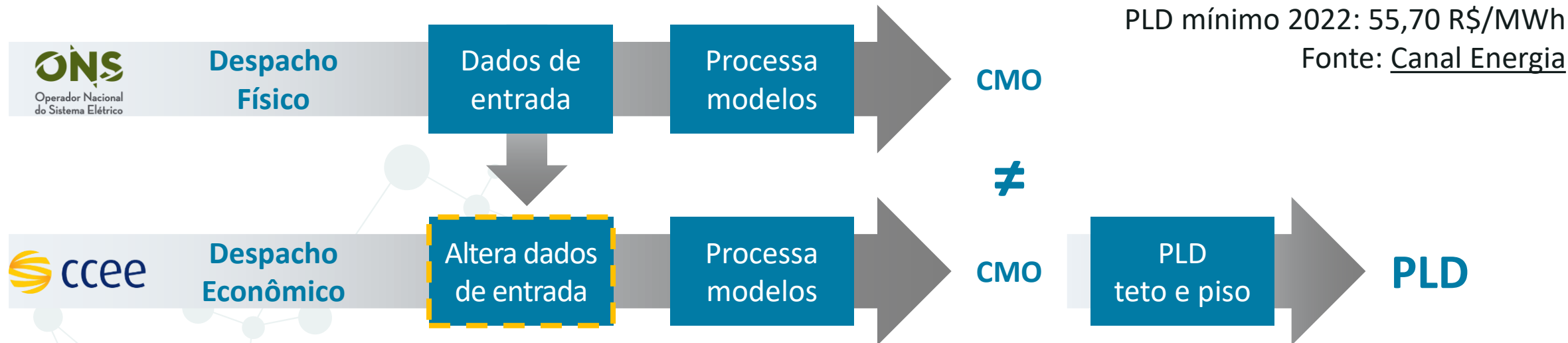
|  Preço de Liquidação das Diferenças (Valores em R\$/MWh) | | | | |
|--|--------------------------|------------------|------------------------|--------------------|
|  Hora vigente 16:00 às 16:59 - 08/06/2022 Hoje | | | | |
| PLD Horário | SE/CO - SUDESTE 55,99 | S - SUL 55,99 | NE - NORDESTE 55,99 | N - NORTE 55,99 |
| Média Diária | 55,81 | 55,81 | 55,81 | 55,81 |

Fonte: site da CCEE

Link: histórico de preços

Cálculo do PLD

- Igual ao CMO: mesma cadeia de modelos
- CCEE recebe dados do ONS e faz alterações
 - Unidades em teste e restrições elétricas internas dos submercados
 - Preço zonal



Discussão sobre a formação do preço da energia no Brasil

- Alternativa estudada: “por oferta”
 - Competidores ofertam preços e quantidades (em detrimento dos custos auditados)
 - Alternativa que promoveria o aumento da eficiência econômica ao preço da eletricidade e a melhoria da resposta da demanda à oferta para o contexto brasileiro
 - Monitoramento e controle do poder de mercado e para coibição de abusos de mercado é um dos principais desafios
 - Mecanismo amplamente utilizado internacionalmente: EUA, México, Austrália e mercados como o Nordpool, entre outros
- A preocupação com o exercício de poder de mercado é comum a todos esses mercados e países e é intrínseca à aplicação desse modelo.
- Fica a cargo do órgão monitorador de mercado coibir o abuso do poder de mercado, para que não ocorra uma transferência indesejada de renda dos compradores para os vendedores.

Monitoramento de poder de mercado

- Poder de mercado: habilidade de um comprador ou vendedor alterar o preço do mercado de seu preço competitivo, alterando seu ponto de equilíbrio e aumentando sua receita individual
 - Preço competitivo: vendedores que ofertam ao seu custo marginal de oportunidade e compradores que ofertam à sua disposição para contratar
- Monitoramento do mercado: análises *ex-ante* e *ex-post*
 - *Ex-post* → feita com base nos dados históricos
 - *Ex-ante* → uso de indicadores (ex: Herfindahl-Hirschman Index) e simulações e para prospectar cenários e comportamentos do mercado
 - Se destaca o uso de Modelos de Equilíbrio, que simulam o comportamento racional dos competidores e encontram o chamado ponto de equilíbrio do mercado

Equilíbrio de Nash

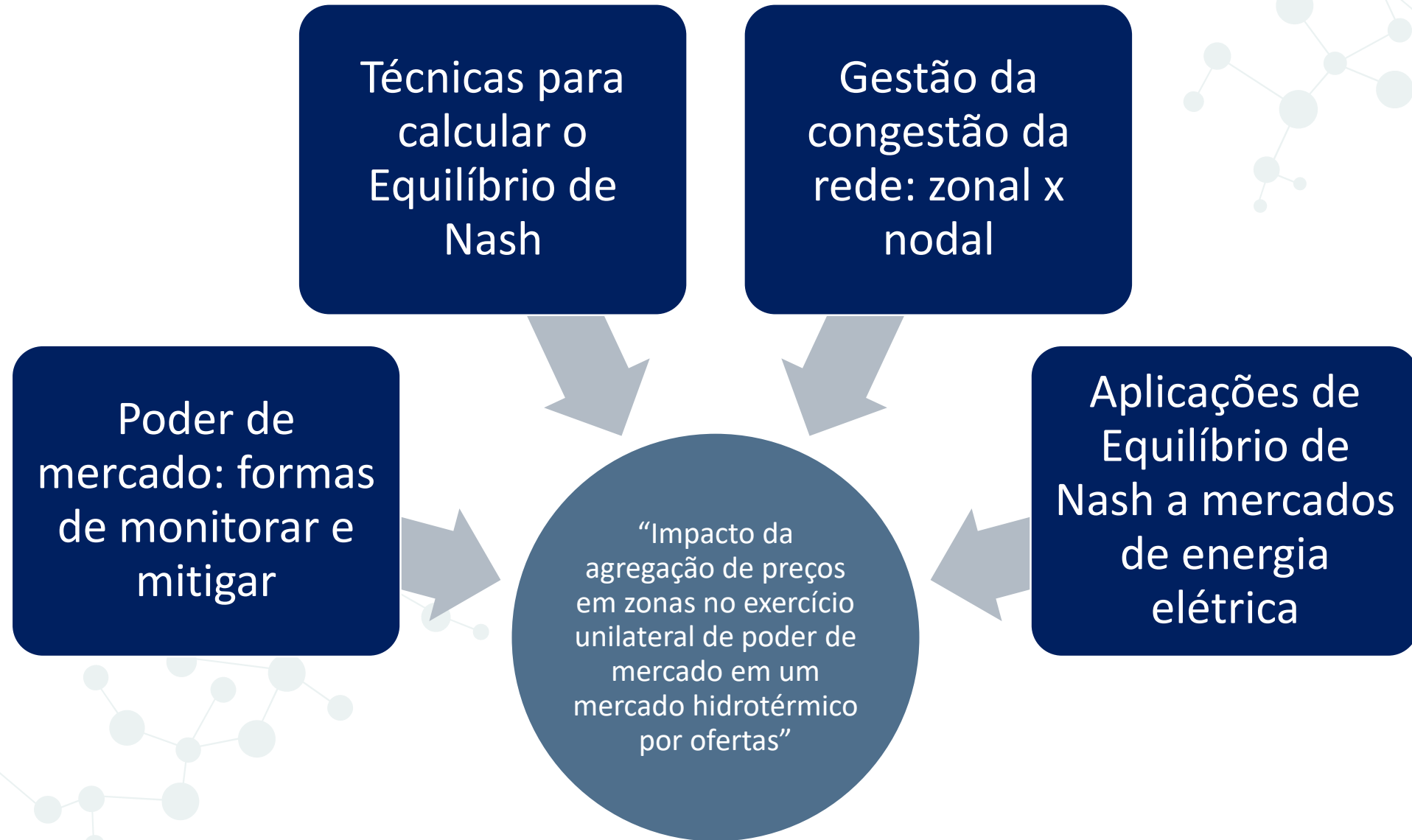
- Vem sendo amplamente utilizado em estudos sobre mercados de eletricidade
- Conceitos baseados na Teoria dos Jogos Não-Cooperativos: os competidores montam sua estratégia em benefício próprio.
- Objetivo do jogo:
 - Encontrar um par preço/quantidade para cada competidor, de tal forma que nenhum deles tenha incentivos para alterar sua oferta quando alcançado o equilíbrio
 - Partindo do equilíbrio, quando um competidor altera sua oferta, permanecendo os demais em equilíbrio, seu resultado piora - e isso vale para todos os competidores.
- Aplicações: definição da estratégia ótima de oferta do competidor e o monitoramento do exercício unilateral de poder de mercado



3

Fundamentação teórica

Grandes temas



- Barroso L. A.; Carneiro R. D.; Granville S.; Pereira M. V.; Fampa M. H. C. 2006. Nash equilibrium in strategic bidding: a binary expansion approach, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 629-638, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873127.

- Fanzeres, B.; Street, A.; Pozo, D. 2020. A Column-and-Constraint Generation Algorithm to Find Nash Equilibrium in Pool-Based Electricity Markets, Electr. Power Syst. Res., 189, 106806.

- Cruz M.P., Finardi E.C., de Matos V.L., Luna J.P. 2016. Strategic bidding for price-maker producers in predominantly hydroelectric systems, Electric Power Systems Research, vol. 140, Pages 435-444, ISSN 0378-7796.

- Poder de mercado: Wolak, Borenstein



Gaps na literatura

- Por conta da perspectiva da Modernização do SEB, o número de trabalhos estudando a aplicação ao caso brasileiro vem crescendo significativamente, inclusive por meio de Projetos de P&D
- Por se tratar de um assunto ainda em fase de estudos para a aplicação no Brasil, a temática do exercício de poder de mercado, extremamente relevante ao contexto de um mercado desse tipo, ainda não é abordada com frequência em trabalhos acadêmicos para o caso brasileiro, somente para outros mercados estrangeiros
- A aplicação do Equilíbrio de Nash a mercados hidrotérmicos ainda é limitada
 - Desafio do tempo computacional



4

Proposta da dissertação

Hipótese, perguntas e objetivos

- A agregação dos preços em zonas mitiga o exercício unilateral de poder de mercado
- É possível aplicar um modelo de equilíbrio ao caso brasileiro (hidrotérmico) e observar o exercício de poder de mercado?
- A limitação dos valores ofertados também pode ajudar a mitigar o exercício de poder de mercado?

Hipótese, perguntas e objetivos

- Implementar e aplicar o Equilíbrio de Nash para calcular o ponto de equilíbrio de um mercado de energia elétrica com uso de dados reais do mercado brasileiro
 - Problema binível, no qual o problema superior visa a maximização da receita do competidor líder e o inferior trata do despacho/mercado de energia (problema do agente e problema do operador)
 - O Equilíbrio de Nash será encontrado a partir da implementação iterativa do problema para todos os jogadores (carrossel)
- Comparar os casos onde os competidores são remunerados ao preço nodal ou preço zonal

Modelagem – Mercado por ofertas (problema do operador)

- Agentes/competidores ofertam um par preço/quantidade, de acordo com a sua própria estratégia de maximização de receita
- Preço uniforme: todos os agentes remunerados pelo preço de *clearing* π (em detrimento ao modelo *pay-as-bid*)
- Preço calculado pelo despacho econômico
 - Variável dual da equação de balanço (custo de oportunidade)
- Demanda inelástica
- Mercado zonal: preço único (em detrimento do preço nodal)

$$\begin{aligned} \min_{g_i} \quad & \sum_{i=1}^n p_i g_i \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{i=1}^n g_i = d, \quad : \pi \\ & 0 \leq g_i \leq q_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

sendo:

p_i o preço ofertado pelo agente i ; g_i o montante gerado pelo agente i ; d a demanda; q_i a quantidade ofertada pelo agente i ; π o preço de clearing

Modelagem – Comportamento dos competidores (problema do agente)

- Desafio: definir sua estratégia de forma a garantir a maximização de sua receita líquida, enquanto os outros competidores também o fazem
- Oferta um par preço/quantidade, sob a incerteza das ofertas dos concorrentes e do preço de *clearing* do mercado.
- *Price maker* → tem poder de influenciar nos preços
- *Price taker* → não é capaz de influenciar o preço do sistema e oferta preço igual ao seu custo de produção

$$R_i(q_i, \mathbf{q}_{-i}) = \max_{g, \pi} (\pi - p_i) g_i$$

sendo:

R_i a receita líquida do competidor i ; q_i a quantidade ofertada pelo competidor i ; \mathbf{q}_{-i} o vetor de quantidades ofertadas pelos outros competidores fora i ; π o preço de *clearing*; p_i o preço ofertado pelo competidor i ; g_i o montante gerado pelo competidor i ;

Modelagem – Equilíbrio de Nash

- Ponto de equilíbrio do mercado, a partir do qual nenhum competidor tem incentivos para alterar sua oferta
- Partindo do equilíbrio, quando um competidor altera sua oferta, permanecendo os demais em equilíbrio, seu resultado piora - e isso vale para todos os competidores

$$R_i(q_i^e, \mathbf{q}_{-i}^e) \geq R_i(q_i, \mathbf{q}_{-i}^e), \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

sendo:

R_i a receita líquida do competidor i ; q_i^e a quantidade ofertada pelo competidor i no equilíbrio; \mathbf{q}_{-i}^e o vetor de quantidades ofertadas pelos outros competidores fora i no equilíbrio; q_i a quantidade ofertada pelo competidor i fora do equilíbrio

Modelagem – Modelo completo

- Modelagem possível por MPEC e EPEC
 - Não resolvidos computacionalmente de forma eficiente
- Multiplicação de variáveis de decisão introduzem não-convexidade → técnicas para linearizar
- Para encontrar o ponto de equilíbrio \mathbf{q}^e
 - Solução de um sistema de inequações de larga escala com número combinatório de equações
- Técnicas de solução
 - Substituição por condições de KKT → não garante otimalidade
 - Solução iterativa → pode apresentar dificuldade de convergência, mas tem boa perspectiva de otimalidade

Modelagem – Modelo implementado

- Problema de dois níveis: maximização da receita do competidor, sujeito ao despacho econômico
- q_i é a variável de decisão do primeiro nível, g_i é a variável de decisão do segundo nível e π é a variável dual da equação de balanço
- Função objetivo bilinear (produto de duas variáveis de decisão, π e g) → abordagem de Fortuny-Amat-McCarl
- Equilíbrio de Stackelberg
 - Um competidor é o líder, que toma a ação, os demais jogadores apenas reagem no nível de baixo
 - Para transformar em Nash → algoritmo iterativo (carrossel)
- Uso do pacote BilevelJuMP e solver Gurobi

$$\max_{q_i} (\pi - p_i)g_i$$

$$\text{s.a.} \quad 0 \leq q_i \leq Q_{max}$$

$$(g_i, \pi) \in \underset{g_i}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n p_i g_i$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i=1}^n g_i = d$$

$$0 \leq g_i \leq q_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

sendo:

π o preço de *clearing*; p_i o preço ofertado pelo competidor i ; g_i o montante gerado pelo competidor i ; q_i a quantidade ofertada pelo competidor i ; Q_{max} a capacidade máxima de geração do competidor i ; d a demanda;



5

Conclusão

Conclusão

- O tema possui grande perspectiva de aplicação e está alinhado ao futuro do setor elétrico
- O SEB carece de interlocutores no tema
- O custo computacional ainda é um desafio
- A experiência internacional deve nos ajudar a desenvolver nossas próprias análises

Próximos passos:

- Finalizar o Projeto de Dissertação
 - Aplicação em um sistema de teste
- Seguir com a revisão bibliográfica
 - Congestão da rede
- Finalização ainda em 2022

**Obrigado!
Dúvidas?**

João Pedro Mattos Costa
jcosta.poli.ufrj@gmail.com

