

# Série dos Seminários de Acompanhamento à Pesquisa

**DEI**  
DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA  
INDUSTRIAL

Número 05 | 05 2021

## Avaliação de Usinas Híbridas por meio da Teoria de Opções Reais

Autor(es):

Diego Nascimento Maia



# Série dos Seminários de Acompanhamento à Pesquisa

Número 05 | 05 2021

## Avaliação de Usinas Híbridas por meio da Teoria de Opções Reais

Autor(es):

Diego Nascimento Maia

### CRÉDITOS:

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

Organizadores: Fernanda Baião / Soraida Aguilar

Layout da Capa: Aline Magalhães dos Santos

# AGENDA

- **Apresentação pessoal**
- **Objetivo**
- **Contextualização**
- **Metodologia**
- **Resultados Preliminares**
- **Referências**



# APRESENTAÇÃO PESSOAL



## DIEGO NASCIMENTO MAIA

- Engenheiro De Computação (IME)
  - Pesquisador desde 2015 no Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL)
  - Início do Mestrado: 2018.2
  - Orientador: Luiz Eduardo Brandão
  - Co-orientador: Fábio Rodrigo Batista
  - Área de Concentração e Linha de Pesquisa: Finanças e Análise de Investimentos / Finanças Corporativas
- 

# OBJETIVO

➤ **Determinar o melhor modelo de negócios para um agente gerador de energia elétrica no Brasil, considerando as seguintes possibilidades:**

✓ Investir em uma usina de uma tecnologia

■ Eólica

■ Solar

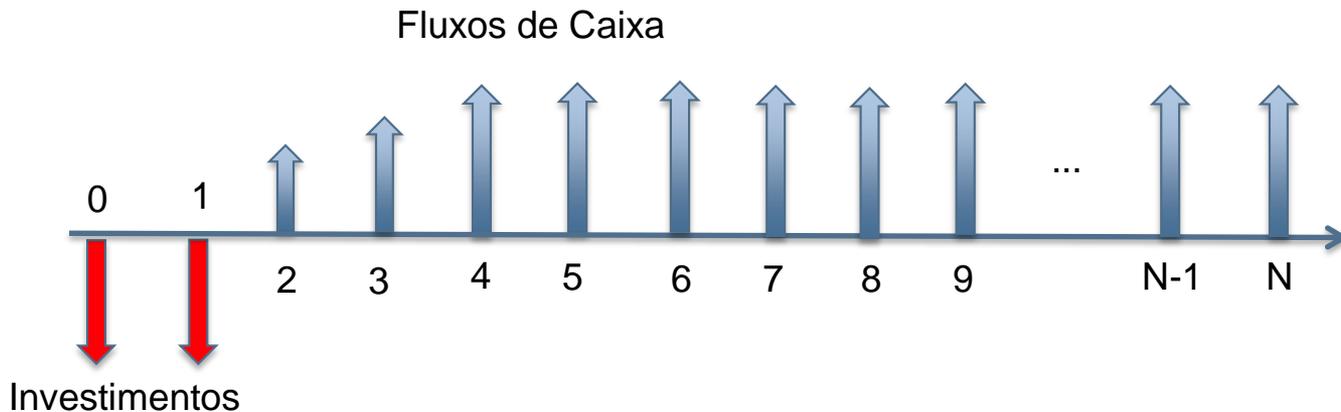
✓ Investir em um arranjo híbrido

■ Eólica + Solar

■ Eólica + Solar + Bateria

# CONTEXTUALIZAÇÃO

## ➤ Análise Econômico-Financeira de Projetos



Receitas

-

Despesas

=

Fluxo de Caixa



INDICADORES DE VIABILIDADE

VPL e TIR

Receita com Energia Gerada  
Receita no MCP

Operação & Manutenção  
Arrendamento da Terra  
Uso do Sist. De Transmissão  
Despesas no MCP

Para Projetos de Geração de Energia

# CONTEXTUALIZAÇÃO

- **Geração Eólica e Solar estão entre as fontes de geração que mais crescem na matriz energética brasileira**



# CONTEXTUALIZAÇÃO



- Geração Eólica e Solar estão entre as fontes de geração que mais crescem na matriz energética brasileira

FONTE <sup>(a)</sup>	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
<b>RENOVÁVEIS</b>	<b>138.284</b>	<b>140.002</b>	<b>141.026</b>	<b>142.036</b>	<b>148.366</b>	<b>154.196</b>	<b>158.776</b>	<b>163.741</b>	<b>168.739</b>	<b>173.814</b>	<b>178.915</b>
HIDRO <sup>(b)</sup>	101.288	101.899	101.935	101.935	102.139	102.139	102.139	102.523	102.942	103.436	103.958
OUTRAS RENOVÁVEIS:	36.996	38.103	39.091	40.101	46.227	52.057	56.637	61.217	65.797	70.377	74.957
PCH e CGH	6.385	6.610	6.787	6.898	7.207	7.545	7.845	8.145	8.445	8.745	9.045
EÓLICA	15.017	15.370	15.477	15.742	20.263	24.475	27.475	30.475	33.475	36.475	39.475
BIOMASSA <sup>(d)</sup> + BIOGÁS	13.412	13.643	13.790	13.840	14.135	14.415	14.695	14.975	15.255	15.535	15.815
SOLAR CENTRALIZADA	2.182	2.480	3.037	3.622	4.622	5.622	6.622	7.622	8.622	9.622	10.622
<b>NÃO RENOVÁVEIS</b>	<b>22.672</b>	<b>24.474</b>	<b>25.779</b>	<b>25.779</b>	<b>27.705</b>	<b>29.293</b>	<b>29.239</b>	<b>33.114</b>	<b>35.319</b>	<b>36.916</b>	<b>42.059</b>
URÂNIO	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	1.990	3.395	3.395	3.395	3.395
GÁS NATURAL <sup>(d)</sup>	12.921	14.436	15.741	15.741	17.859	21.234	22.662	25.679	28.315	31.339	36.190
CARVÃO	3.017	3.017	3.017	3.017	3.017	3.017	3.017	3.017	3.017	1.790	2.083
ÓLEO COMBUSTÍVEL <sup>(e)</sup>	3.697	3.697	3.697	3.697	3.697	2.510	1.028	657	226	25	25
ÓLEO DIESEL <sup>(e)</sup>	1.047	1.333	1.333	1.333	1.141	542	542	366	366	366	366
<b>TOTAL DO SIN</b>	<b>160.956</b>	<b>164.476</b>	<b>166.805</b>	<b>167.814</b>	<b>176.070</b>	<b>183.489</b>	<b>188.015</b>	<b>196.855</b>	<b>204.059</b>	<b>210.729</b>	<b>220.974</b>

Fonte: PDE 2029

163%

387%

37%

# CONTEXTUALIZAÇÃO



## ➤ Conceito de Usina Híbrida

- ✓ “Uma instalação de geração de energia que converte energia primária em energia elétrica e que consiste em mais de um módulo de geração de energia conectado a uma rede em um ponto de conexão.”



Fonte: WindEurope

# CONTEXTUALIZAÇÃO



- **Geração Eólica e Solar estão entre as fontes de geração que mais crescem na matriz energética brasileira**
    - ✓ **Hibridização pode aumentar a atratividade de projetos anteriormente inviáveis**
    - ✓ **Complementaridade na geração dessas fontes**
      - Geração Solar ocorre no período diurno
      - Por exemplo, em localidades no Nordeste a geração eólica ocorre com maior intensidade no período noturno
      - Utilização mais eficiente da rede elétrica
    - ✓ **Regulamentação necessária**
      - Em discussão desde 2017
      - Consulta pública em 2019
      - Agenda Regulatória ANEEL 2020 - 2021
- 

# CONTEXTUALIZAÇÃO



## ➤ Projeto Híbrido Eólica + Solar

- ✓ Ganhos sinérgicos de Custos na Construção e na Operação da Usina
- ✓ *Curtailment*
- ✓ Efeito *Portfólio*

## ➤ Armazenamento em Baterias

- ✓ Aproveitamento da diferenças de preços durante um dia
  - ✓ Redução de custo da tecnologia
  - ✓ Redução do *Curtailment*
- 

# RISCOS ENVOLVIDOS

## ➤ Fontes de Geração

- ✓ Geração Eólica: Vento
- ✓ Geração Solar: Irradiância Solar
- ✓ Complementaridade entre Eólica e Solar



## ➤ Preço da Energia no Mercado de Curto Prazo

**PLD**  
PREÇO DE  
LIQUIDAÇÃO DAS  
DIFERENÇAS

# RISCOS ENVOLVIDOS



PLD  
PREÇO DE  
LIQUIDAÇÃO DAS  
DIFERENÇAS

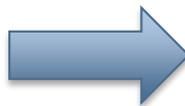
## ➤ Preço da Energia no Mercado de Curto Prazo

- ✓ Atualmente: Preço por semana por Submercado
  - ✓ A partir de 2021: Preço por hora por Submercado
    - Modelo tem previsão de 1 semana
    - Como fica análise de 30 anos do projeto híbrido?
- 

# RISCOS ENVOLVIDOS

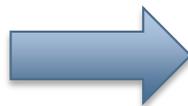
## ➤ Tratamento relativo ao PLD Horário

Histórico  
PLD Horário  
Desde Abril/18



Perfil Mensal para  
um dia do mês

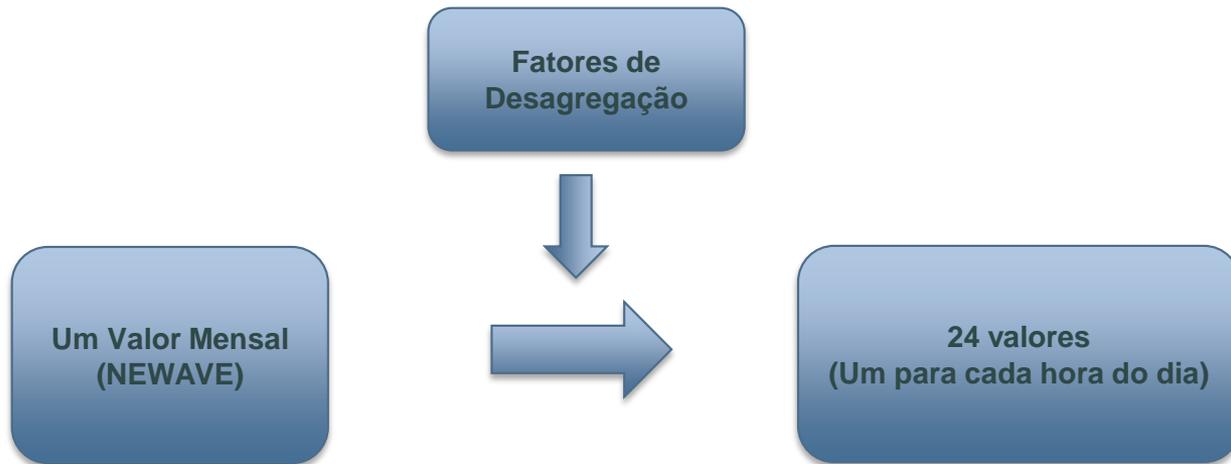
Análise Mensal  
de 30 Anos



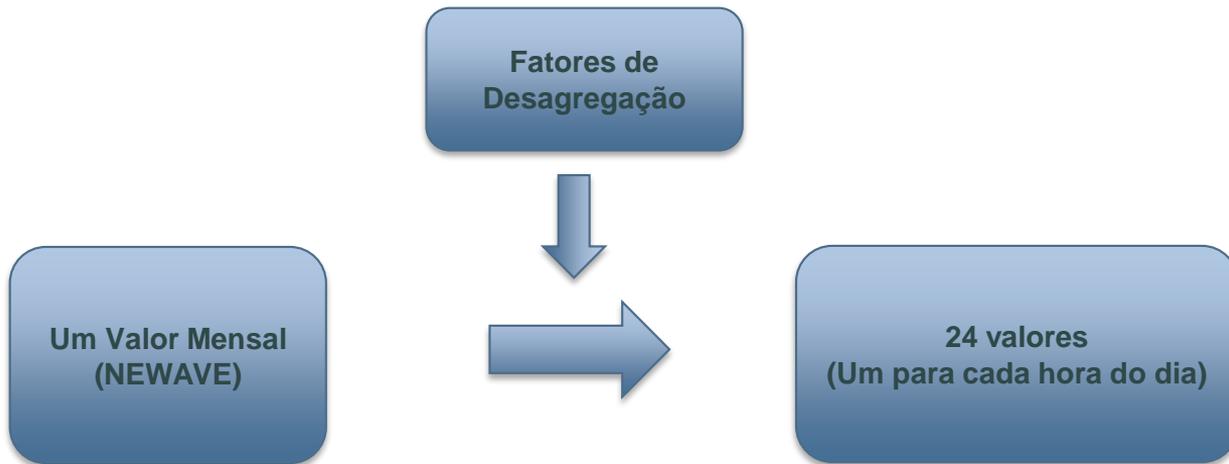
Análise Horária  
De 30 Anos

- ✓ O que muda com PLD Horário?
  - Exposição ao PLD durante o dia

# RASCUNHO



# RASCUNHO



# TEORIA DAS OPÇÕES REAIS



## ➤ **Opção Financeira**

- ✓ Instrumento financeiro que atribui ao comprador o direito de comprar ou vender determinado ativo numa data ou até uma data

## ➤ **Opção Real**

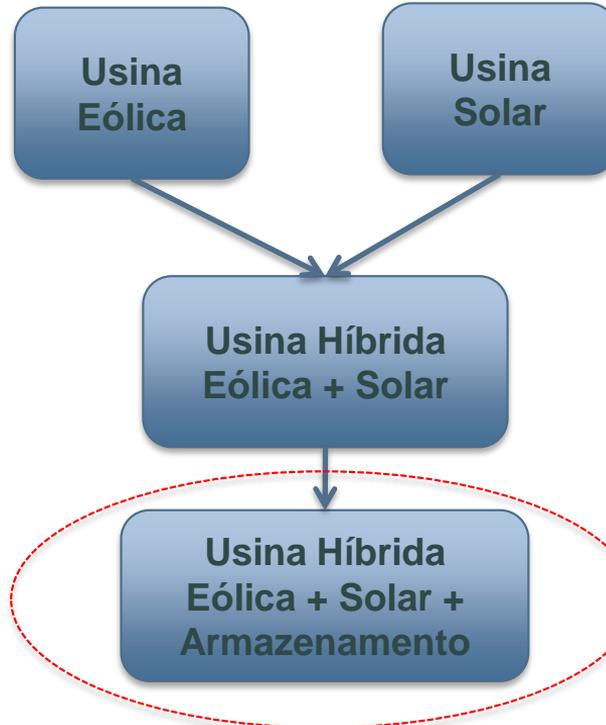
- ✓ Ativos Reais (tangíveis) em vez de ativos financeiros
- ✓ Exemplo do cotidiano: Passagem Aérea Reembolsável
- ✓ Exemplo em avaliação de projetos: Adiar investimento em um projeto

## ➤ **Princípios da Teoria**

- ✓ Flexibilidade Gerencial
  - ✓ Incerteza
  - ✓ Irreversibilidade
- 

# TEORIA DAS OPÇÕES REAIS

- Teoria das Opções Reais aplicado às Usinas Híbridas



# METODOLOGIA



Análise determinística individual dos empreendimentos



Análise determinística do arranjo híbrido dos empreendimentos



Análise de dados das séries históricas de geração eólica e solar por meio de reanálise



Análise de Risco dos fatores de risco nas análises individuais e híbrida



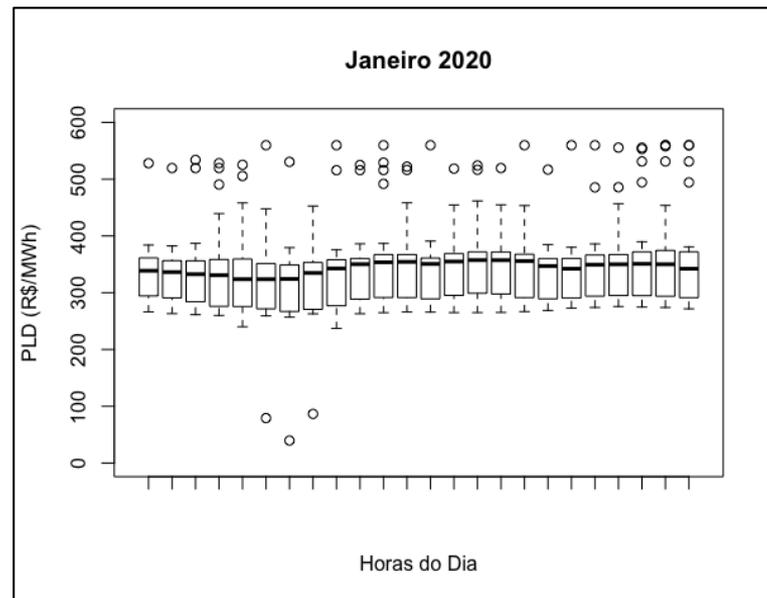
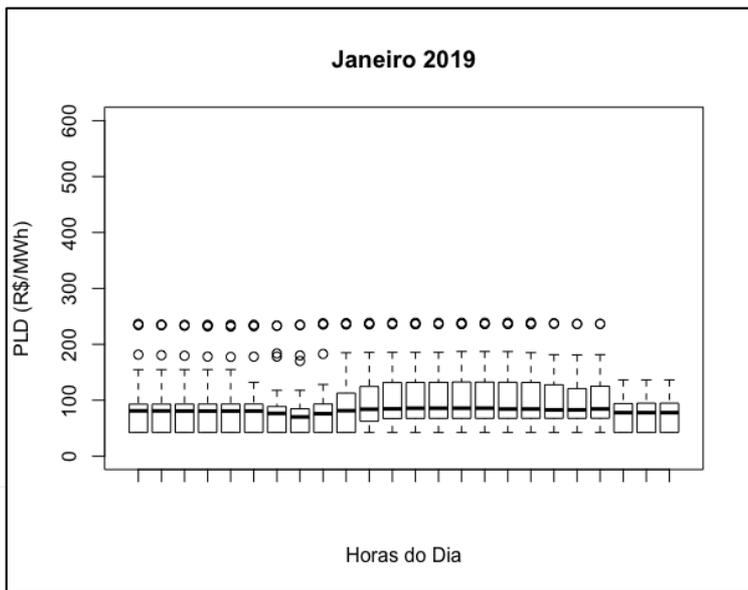
Análise do arranjo híbrido com o uso de baterias de armazenamento



# RESULTADOS PRELIMINARES

➤ Boxplots para cada hora do dia no mês

✓ Exemplo: Janeiro



# REFERÊNCIAS

- ZAMBELI, M.S., FARIA, J. M, SOUZA, A.A., Metodologia Para Análise De Risco Com PLD Horário, XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, Brasil, 2019.
- MME, EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, Brasília, Brasil, 2019.
- WINDEUROPE. Renewable Hybrid Power Plants: Exploring the Benefits and Market Opportunities, Brussels, Belgium, 2019.
- KLONARI, V., Exploring the Viability of Hybrid Wind-Solar Power Plants, 4th International Hybrid Power Systems Workshop, Crete, Greece, 2019.
- DAS, K., Enhanced Features of Wind-Based Hybrid Power Plants, 4th International Hybrid Power Systems Workshop, Crete, Greece, 2019.



OBRIGADO!

DIEGO.N.MAIA@GMAIL.COM



# METODOLOGIA

- **Análise do Arranjo Híbrido com o uso de Baterias**
  - Especificação da bateria;
  - Avaliação da opção de se investir no uso de baterias para o arranjo híbrido estudado



# METODOLOGIA

- **Análise determinística individual dos empreendimentos**
  - Especificação das características técnicas de uma usina eólica, e outra solar fotovoltaica, separadamente
  - Obtenção de série histórica de geração, em base mensal, para cada usina isoladamente;
  - Geração de diferentes cenários de produção energética, em base mensal, para cada usina separadamente;
  - Obtenção de diferentes cenários de PLDs em base mensal;
  - Realização de uma análise de risco de cada projeto separadamente

# METODOLOGIA



- **Análise determinística do arranjo híbrido dos empreendimentos**
    - Determinação de quais características individuais seriam alteradas em função do arranjo híbrido e posterior especificação da usina
    - Em base mensal, realização de uma análise de risco do arranjo híbrido;
    - Levantamento de perfil típico da geração eólica e solar fotovoltaica, em base horária, no local de desenvolvimento da usina;
    - Levantamento de perfil típico do PLD horário no submercado de desenvolvimento da usina;
    - Obtenção de cenários de PLDs e geração em base horária;
    - Realização de uma análise de risco da usina híbrida em base horária.
- 

# CONTEXTUALIZAÇÃO

- Regulamentação necessária

HOJE



100MW



20MW



120MW

EM ESTUDO



100MW



20MW



100MW