



**CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.**  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)

Agosto/2025

# Modelagem *Data-Driven* de Sensores Elétricos: IA como Aliada na Qualidade de Energia

Leonardo A. A. Souza

Pesquisador-Tecnologista (LAMAT/DIELE)

## Contexto Inicial do Case

### Modelagem Multi-harmônica de Transdutores de Medição

(Defesa de Doutorado – Julho/2023)



Modeling of a Resistive Voltage  
Divider by Rational Functions:  
Uncertainty Evaluation  
(IEEE TIM - 2021)

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9310699>

Abordagem Linear



Data-driven Modeling of  
Nonlinear Transducers for  
Harmonic Measurements  
(IEEE TIM - 2025)

<https://ieeexplore.ieee.org/document/11099535>

Abordagem Não-Linear

# Premissas Básicas

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



## Como a IA é utilizada nesta abordagem orientada por dados?

A IA é um campo vasto que abrange diversas técnicas conhecidas.

As **Redes Neurais** são uma ferramenta poderosa dentro desse campo.

E os dados são o combustível (simulados ou medidos).

# Premissas Básicas

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



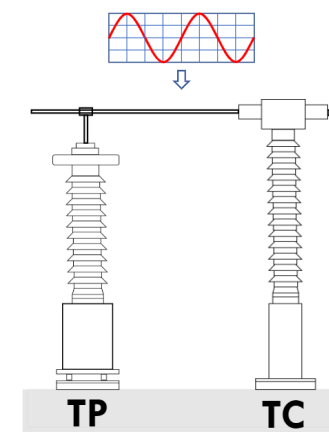
## Sensores Elétricos

*“são transdutores de medição que recebem uma grandeza de entrada elétrica (tensão ou corrente) e fornecem uma grandeza de saída elétrica (tensão ou corrente), mantendo uma **relação especificada e conhecida entre ambas.**”*

No âmbito do desenvolvimento:

*Transformadores de Instrumento (TPs, TCs, TPCs, etc) <<< ALTA TENSÃO*

*DT Resistivos/Indutivos, Shunts, Sensores de Corrente, etc <<< BAIXA TENSÃO*



FATURAMENTO  
MONITORAMENTO  
PROTEÇÃO

# Premissas Básicas

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)

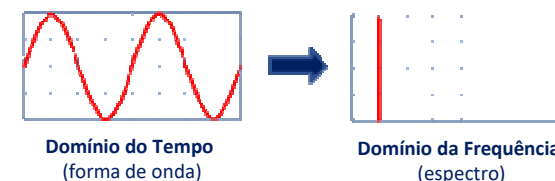


## Harmônicos em Qualidade de Energia

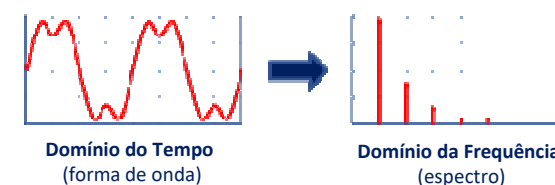
*“São gerados principalmente por cargas não lineares e por saturação magnética em transformadores.”*

*“Distorcem a forma de onda senoidal original, introduzindo frequências múltiplas da fundamental (60 Hz/50 Hz).”*

### SINAL PURAMENTE SENOIDAL



### SINAL NÃO-SENOIDAL DISTORÇÃO HARMÔNICA



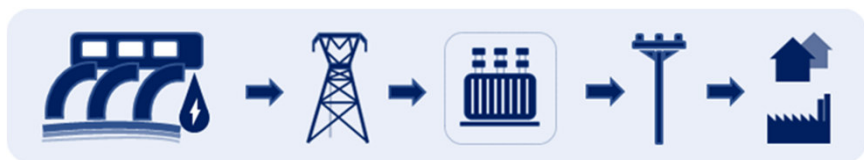
*Normas de referência com limites:*  
*IEEE 519-2014 (sistemas de potência)*  
*IEC 61000-3-2 (equipamentos)*

# Cenário Evolutivo do Setor Elétrico

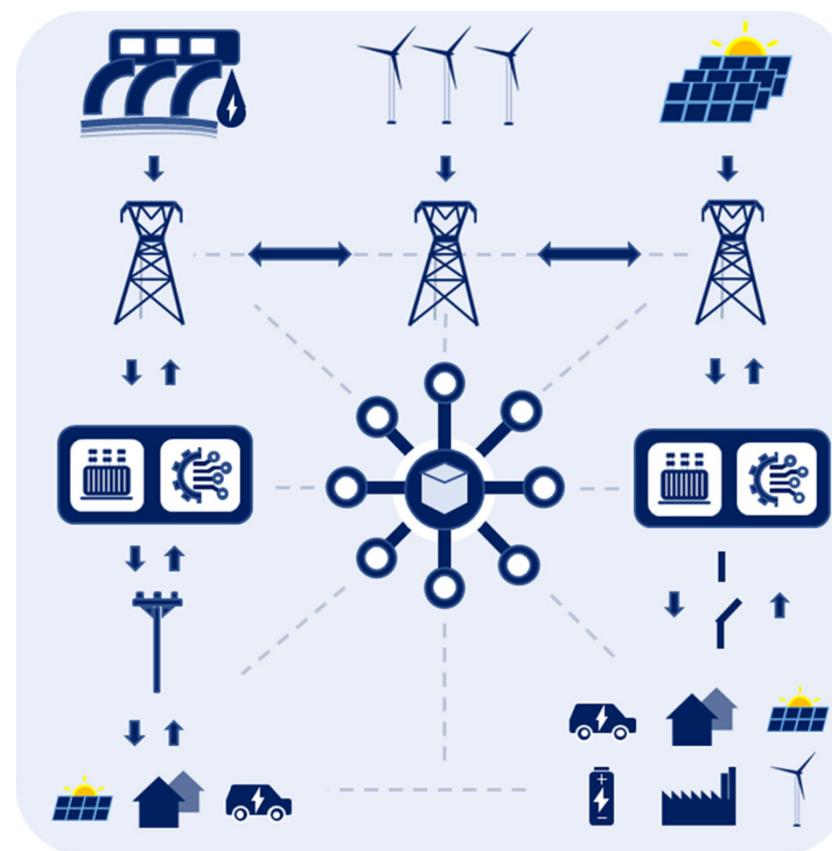
**CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.**  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



CENÁRIO 1



CENÁRIO 2

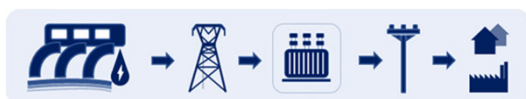


# Cenário Evolutivo do Setor Elétrico

**CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.**  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



CENÁRIO 1

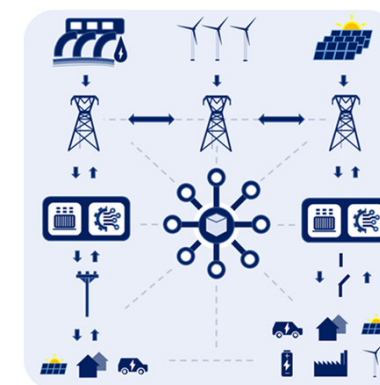


- + integração dos recursos energéticos distribuídos
- + diversificação de cargas
- + equipamentos conectados
- + digitalização do setor



- + impacto na Qualidade de Energia**
- + necessidade de monitoramento
  - + pontos de sensoriamento em frequência
  - + análise em ampla faixa de frequência

CENÁRIO 2



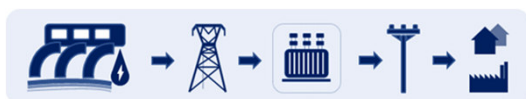


# Cenário Evolutivo do Setor Elétrico

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



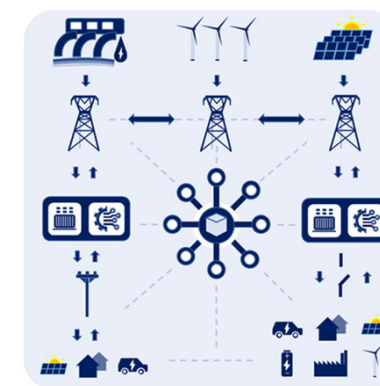
CENÁRIO 1



- + integração dos recursos energéticos distribuídos
- + diversificação de cargas
- + equipamentos conectados
- + digitalização do setor

- + impacto na Qualidade de Energia
- + necessidade de monitoramento
- + pontos de sensoriamento em frequência
- + análise em ampla faixa de frequência

CENÁRIO 2



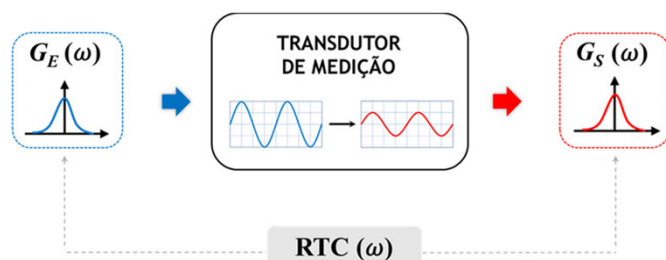
Sugestões para atualização de procedimentos de medição e das normas da área

**Revisão  
IEC 61869**  
(Requisitos para TI)



# Impacto nos Sensores Elétricos

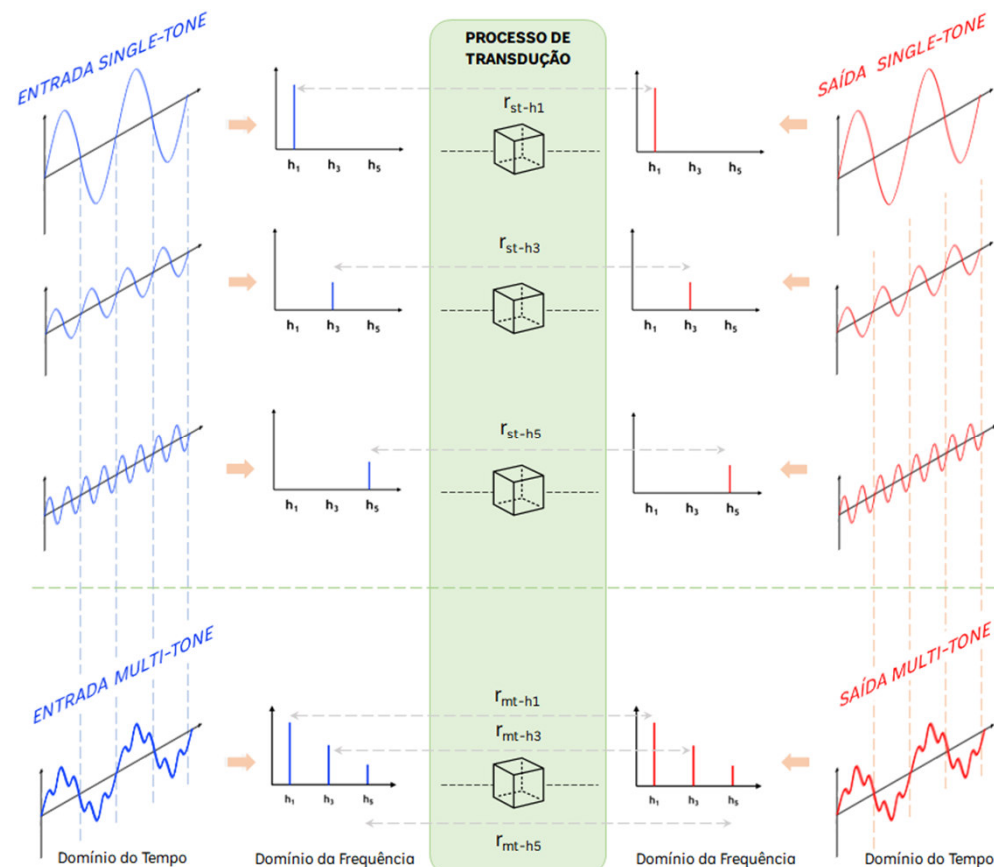
**CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.**  
gov.br/inmetro



$$RTC(\omega) = \frac{G_E(\omega)}{G_S(\omega)} = \frac{|G_E(\omega)|\angle\theta_E(\omega)}{|G_S(\omega)|\angle\theta_S(\omega)}$$

$$r(\omega) = \frac{|G_E(\omega)|}{|G_S(\omega)|}$$

$$\Delta\theta(\omega) = \angle\theta_E(\omega) - \angle\theta_S(\omega)$$



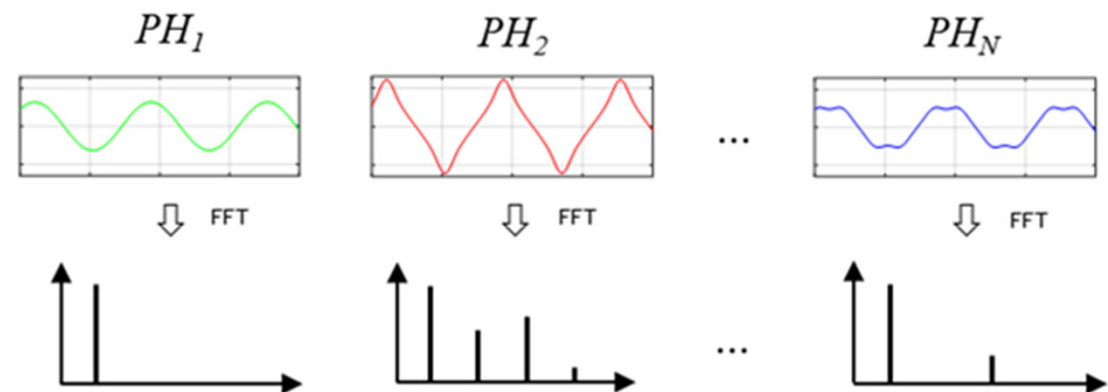
## Solução adotada

Perfis Harmônicos (PH) diversos

Como quantificar a interação  
entre componentes?

Como mapear a não-linearidade?

Como incluir a distribuição dos dados?



Uso de IA (Redes Neurais)

# Uso de Redes Neurais

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



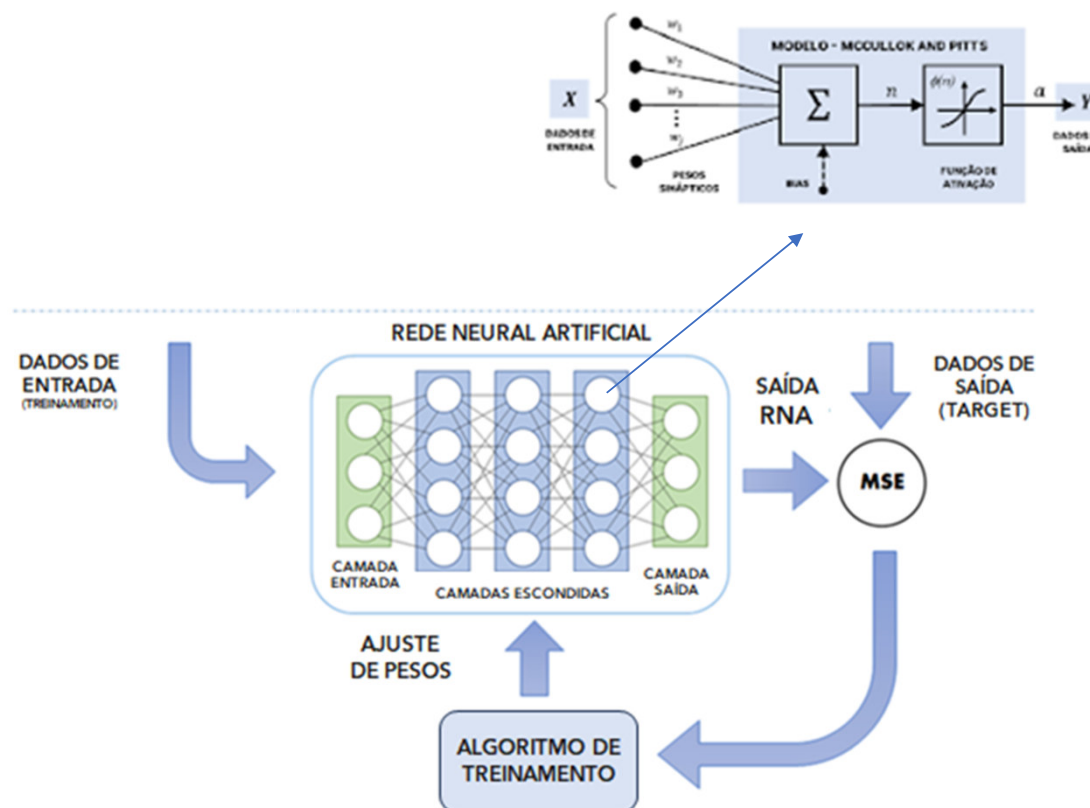
Mapeamento de relações não-lineares

RNAs *feedforward backpropagation*

Aprendizado supervisionado

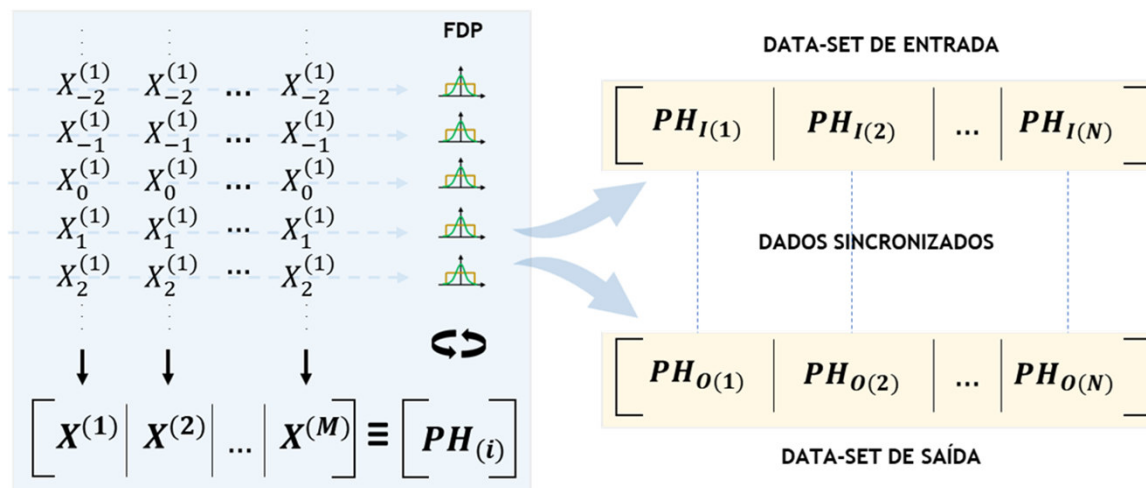
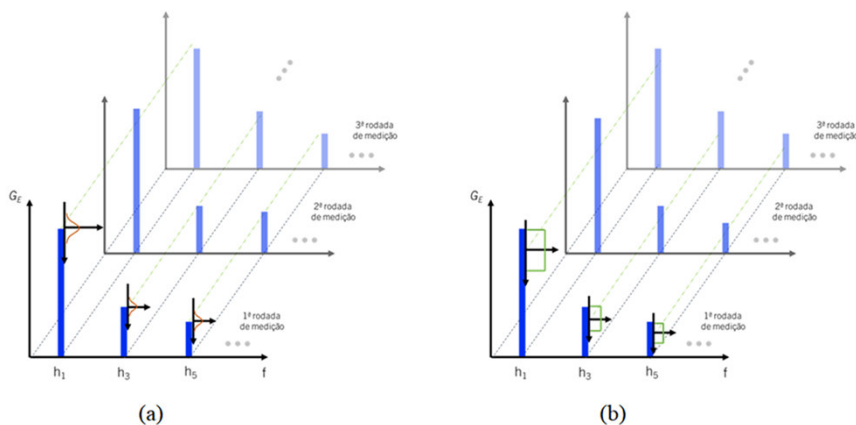
Algoritmo *Levenberg-Marquardt*

*Toolbox do Matlab*



# Montagem do *data-set*

## PERFIS HARMÔNICOS

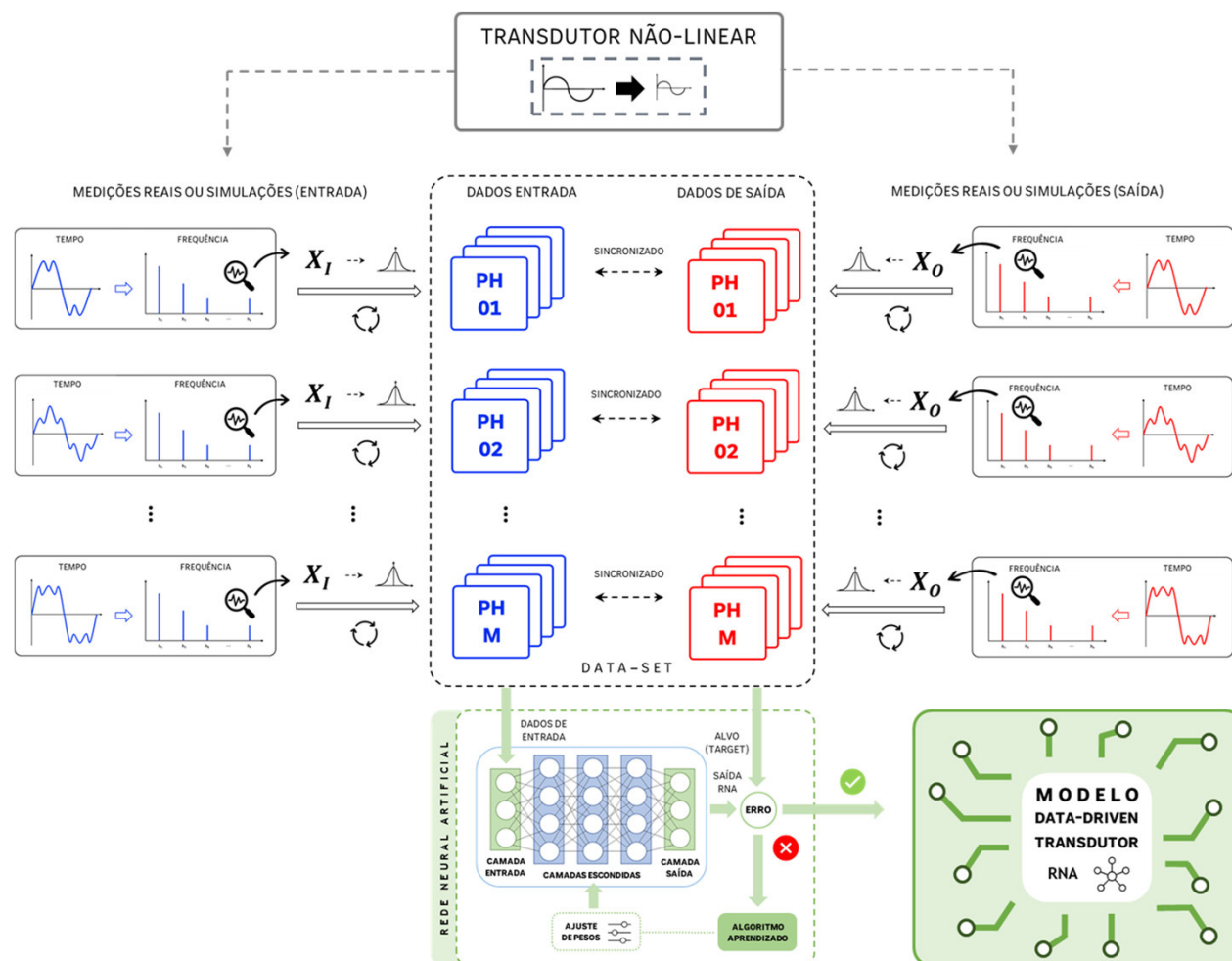


Condições de operação distintas

Medições reais ou simuladas

# Metodologia *Data-driven*

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)

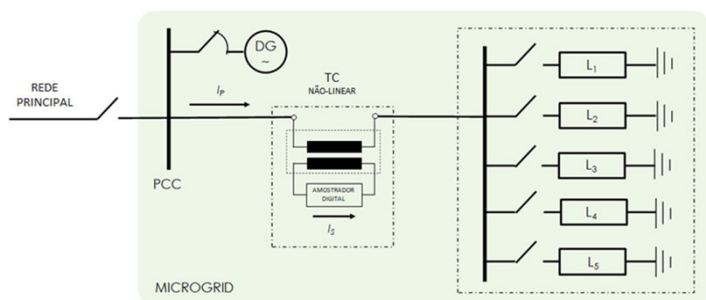


# Caso teste #1

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
gov.br/inmetro

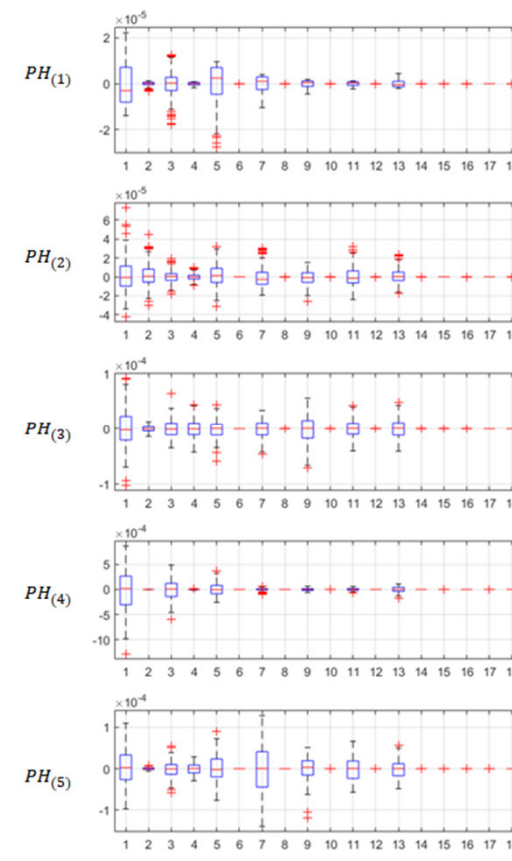
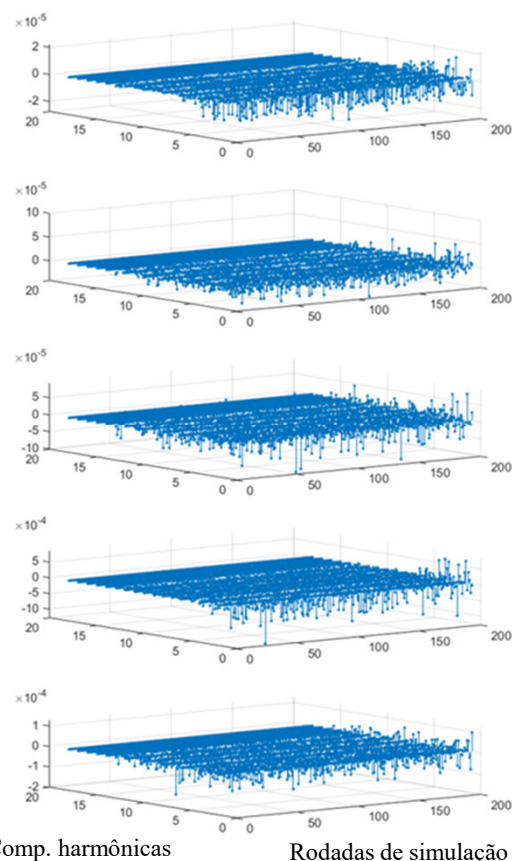


Modelagem *data-driven*  
de TC não-linear operando  
em uma *Micro Grid*  
(Medições Simuladas)



PH	Tipo	Componentes Harmônicas
1	Resistiva	1 <sub>100%</sub>
2	Não-linear	1 <sub>100%</sub> , 2 <sub>10%</sub> , (3,4) <sub>4%</sub>
3	Não-linear	1 <sub>100%</sub> , 3 <sub>10%</sub> , 5 <sub>5%</sub> , (7,9,11,13) <sub>4%</sub>
4	Não-linear	1 <sub>100%</sub> , (5,7,11,13) <sub>10%</sub>
5	Não-linear	1 <sub>100%</sub> , 3 <sub>20%</sub> , 5 <sub>40%</sub> , (7,9) <sub>10%</sub> , (11,13) <sub>4%</sub>

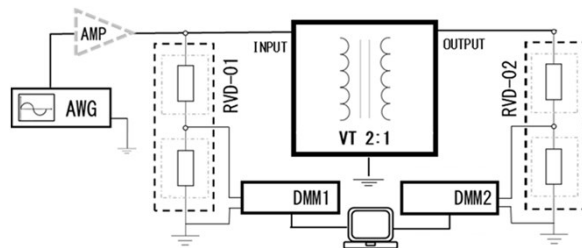
Desvio relativo



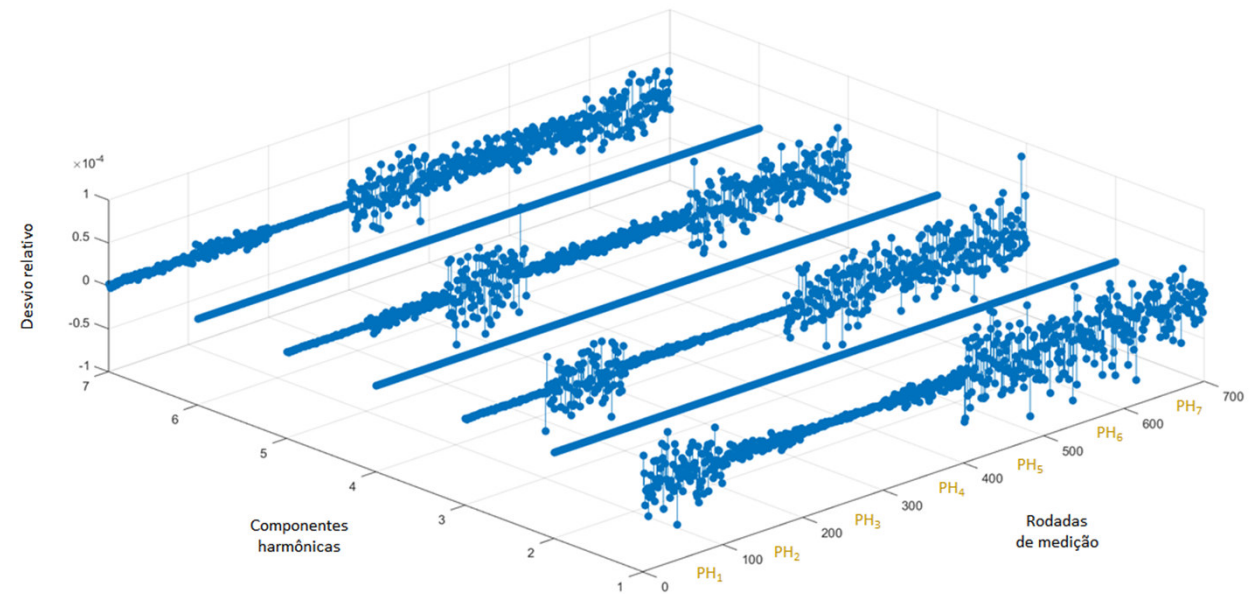
Comp. harmônicas

## Caso teste #2

Modelagem *data-driven* de  
TP padrão a partir de medições  
reais de amplitude



Desvios relativos entre o modelo *data-driven* e as  
medições de cada componente harmônica (todos os PHs)



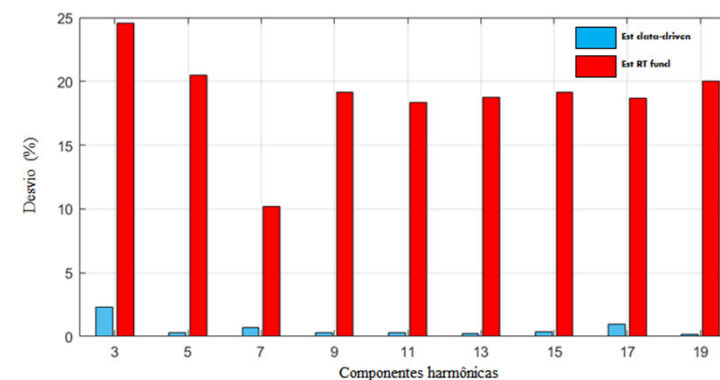
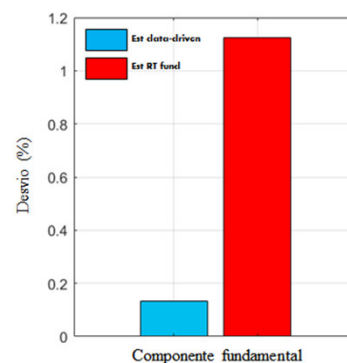
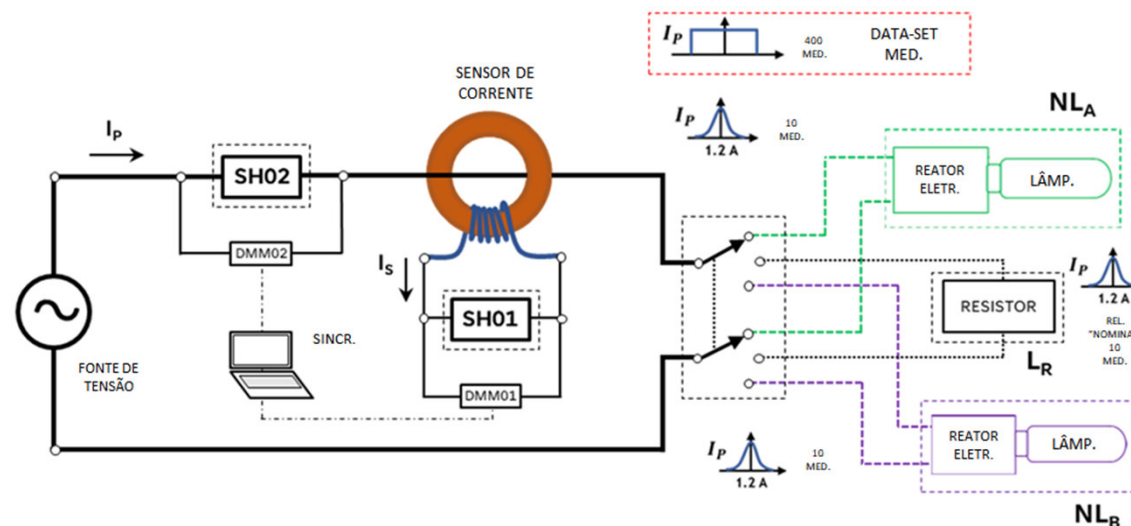
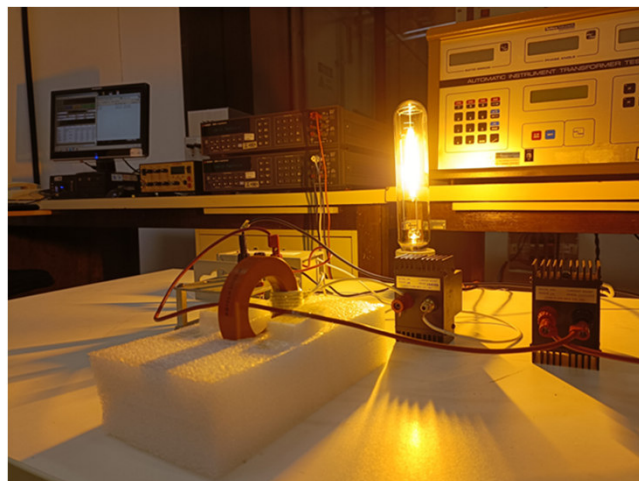
PH	Abordagem	Composição harmônica / (% da fund.)
1	single-tone	1 <sub>100%</sub>
2	single-tone	3 <sub>20%</sub>
3	single-tone	5 <sub>20%</sub>
4	single-tone	7 <sub>20%</sub>
5	multi-tone	1 <sub>100%</sub> , 3 <sub>20%</sub>
6	multi-tone	1 <sub>100%</sub> , 3 <sub>20%</sub> , 5 <sub>20%</sub>
7	multi-tone	1 <sub>100%</sub> , 3 <sub>20%</sub> , 5 <sub>20%</sub> , 7 <sub>20%</sub>



# Caso teste #3

Modelagem *data-driven* de sensor de corrente a partir de medições reais

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
gov.br/inmetro



# Resultados

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



A estratégia "data-driven" demonstrou-se flexível para os casos analisados, com aderência satisfatória para os casos analisados.

Caso teste #1 denota o potencial de representação da metodologia para simulação (desvios de poucas unidades em  $10^{-5}$ ).

Caso teste #2 denota o potencial de representação da metodologia para medições reais (desvios de poucas unidades em  $10^{-5}$ ).

**Caso teste #3 potencial de utilização para melhora do desempenho de dispositivos com especificações metrológicas menos exigentes, apresentando aderência satisfatória (desvios de poucas unidades em  $10^{-4}$ ).**

Resultados indicam que o comportamento não-linear do sensor pode dificultar a estimação de pontos fora de faixas mapeadas no treinamento.

# Desafios e Oportunidades

CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



A definição da incerteza para a metodologia depende da **análise de incerteza da ferramenta de IA utilizada.**

A **investigação de outras ferramentas e/ou um estudo de otimização** pode contribuir para melhoria da metodologia *data-driven* (aderência / estimação de pontos não mapeados).

Extensão da metodologia de modelagem *data-driven* para consideração de **outras grandezas de influência, como temperatura e umidade.**

Potencial para utilização no setor elétrico/industrial para **melhoria de desempenho de sensores elétricos.**

**CONFIANÇA É A  
NOSSA MARCA.**  
[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



Obrigado!

Contato:  
**[laasouza@inmetro.gov.br](mailto:laasouza@inmetro.gov.br)**

Ouvidoria: 0800 285 1818



[gov.br/inmetro](http://gov.br/inmetro)



[linkedin.com/company/inmetro](https://linkedin.com/company/inmetro)



[instagram.com/inmetro\\_oficial](https://instagram.com/inmetro_oficial)



[facebook.com/Inmetro](https://facebook.com/Inmetro)



[youtube.com/tvinmetro](https://youtube.com/tvinmetro)



[x.com/inmetro](https://x.com/inmetro)



[flickr.com/inmetro](https://flickr.com/inmetro)



MINISTÉRIO DO  
**DESENVOLVIMENTO,  
INDÚSTRIA, COMÉRCIO  
E SERVIÇOS**

