



**CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.**
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

CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro



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>

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

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

Abordagem Linear

Abordagem Não-Linear

Premissas Básicas

CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
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

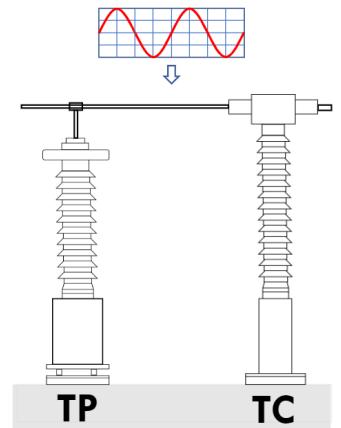
Sensores Elétricos

“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

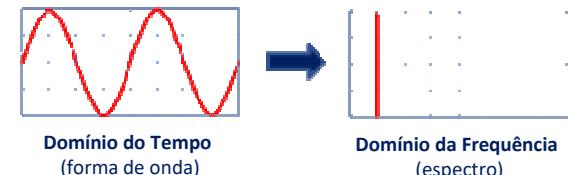


Harmônicos em Qualidade de Energia

“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).”

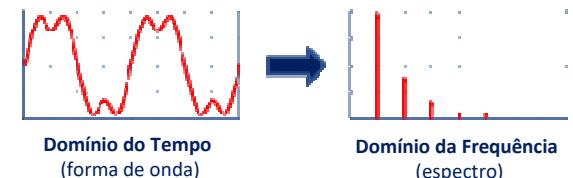
SINAL PURAMENTE SENOIDAL



Domínio do Tempo
(forma de onda)

Domínio da Frequência
(espectro)

SINAL NÃO-SENOIDAL DISTORÇÃO HARMÔNICA



Domínio do Tempo
(forma de onda)

Domínio da Frequência
(espectro)

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

Cenário Evolutivo do Setor Elétrico

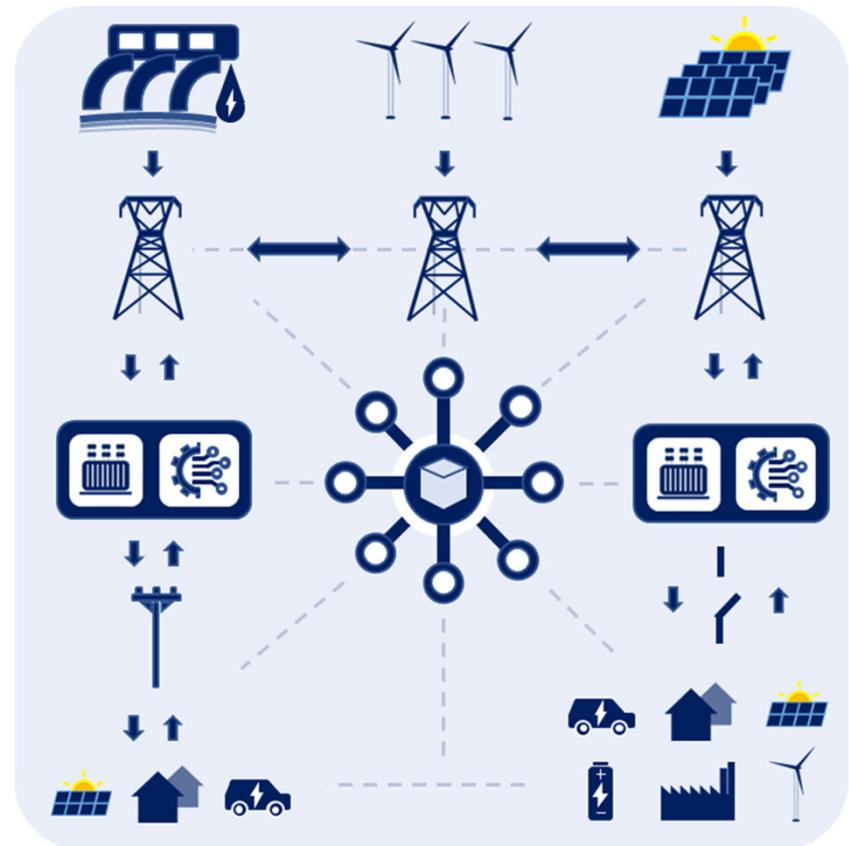
CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro



CENÁRIO 1



CENÁRIO 2



Cenário Evolutivo do Setor Elétrico

CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro



CENÁRIO 1

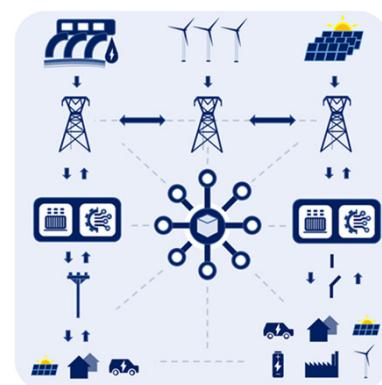


- + integração dos recursos energéticos distribuídos
- + diversificação de cargas
- + equipamentos conectados
- + digitalização do setor



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

CENÁRIO 2

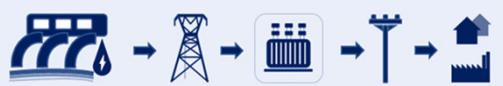


Cenário Evolutivo do Setor Elétrico

CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro



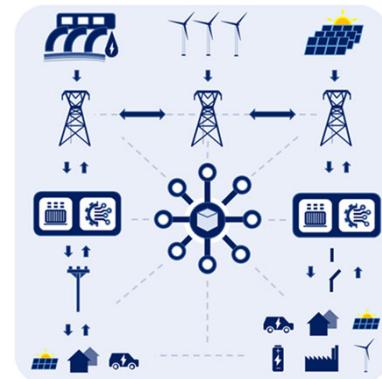
CENÁRIO 1



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



CENÁRIO 2



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

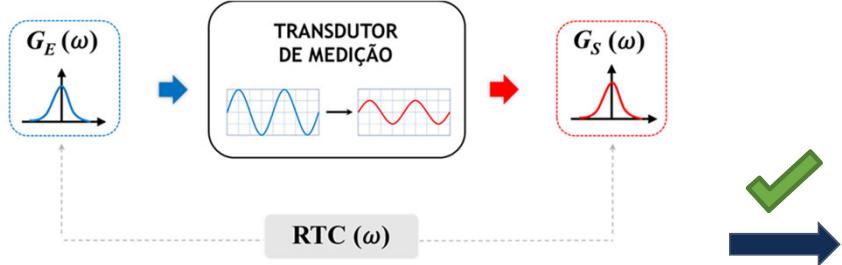


Sugestões para atualização de procedimentos de medição e das normas da área

Revisão
IEC 61869
(Requisitos para TI)

Impacto nos Sensores Elétricos

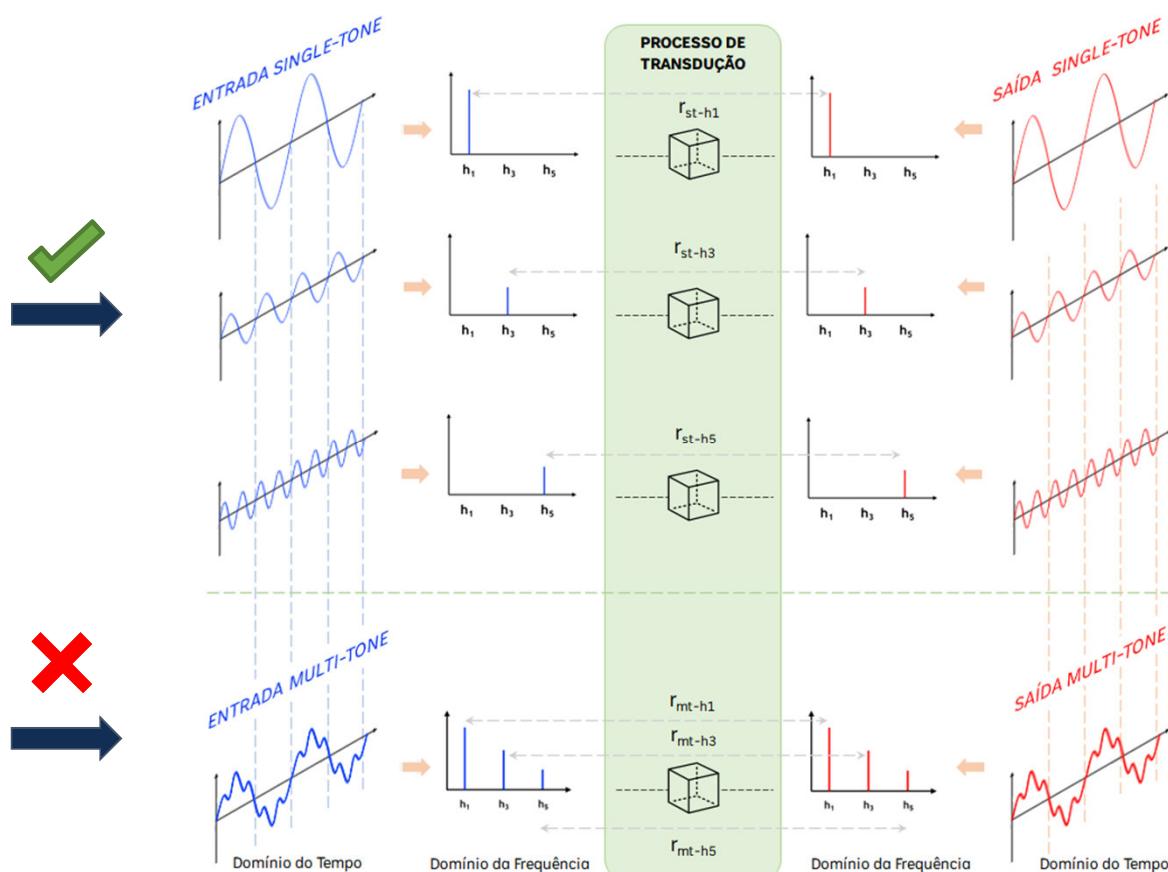
CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro



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

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

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



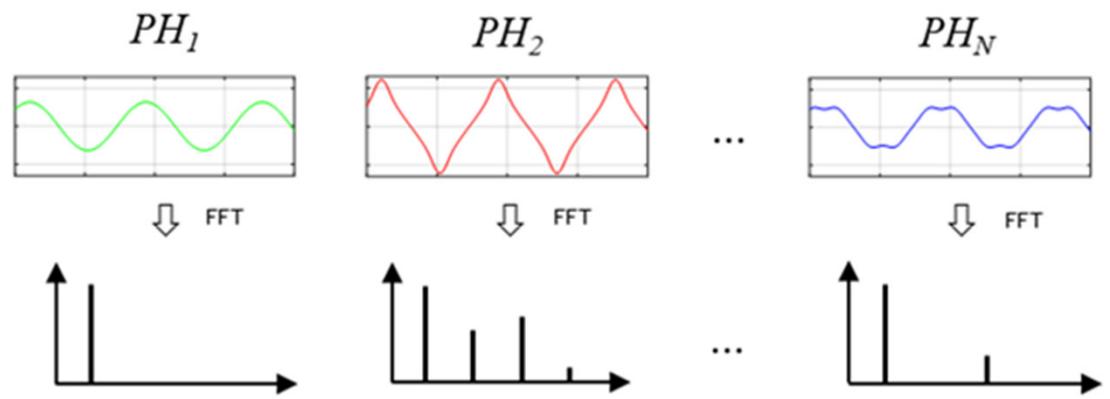
Solução adotada

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

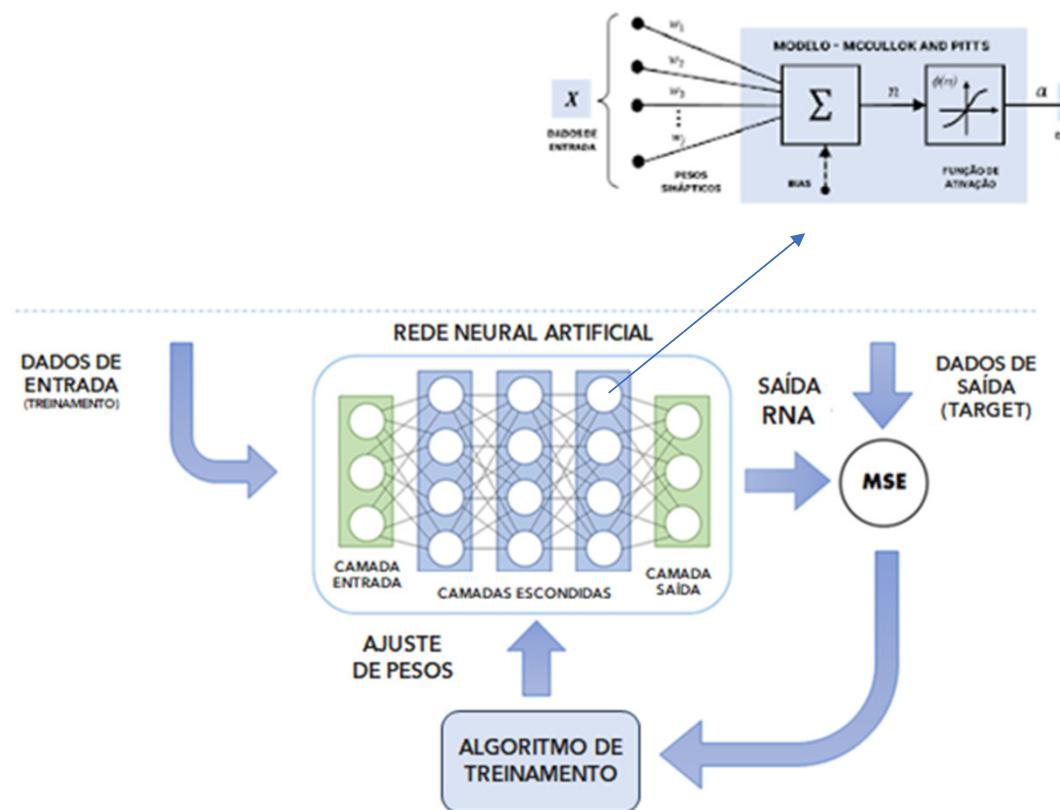
Mapeamento de relações não-lineares

RNAs *feedforward backpropagation*

Aprendizado supervisionado

Algoritmo *Levenberg-Marquardt*

Toolbox do Matlab

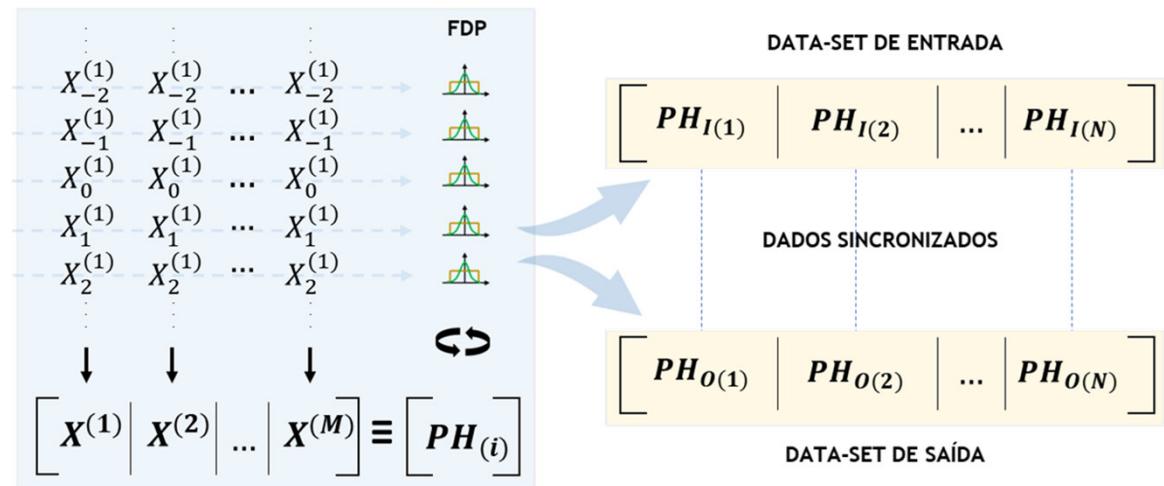
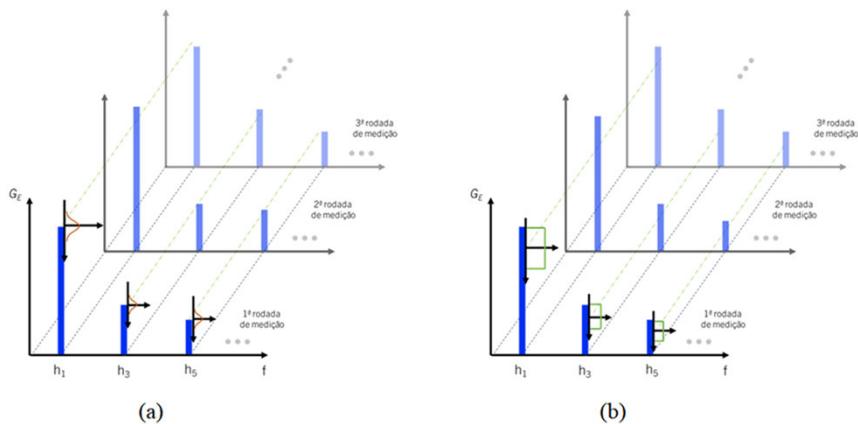


Montagem do *data-set*

CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro



PERFIS HARMÔNICOS

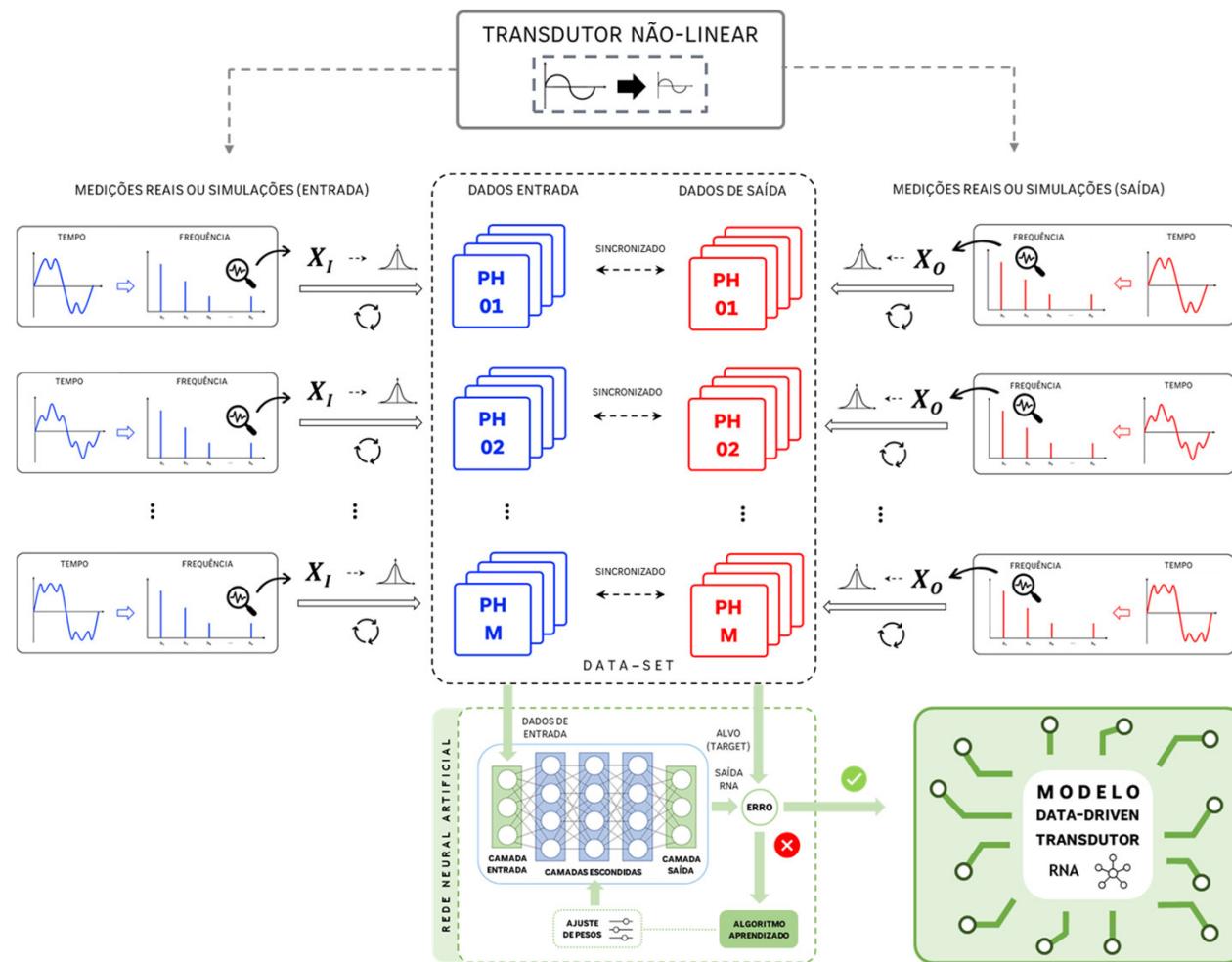


Condições de operação distintas

Medições reais ou simuladas

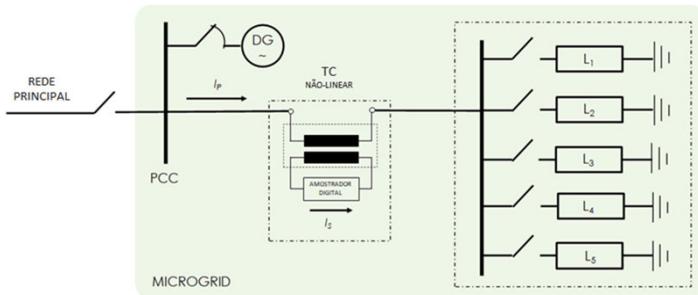
Metodologia *Data-driven*

CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro

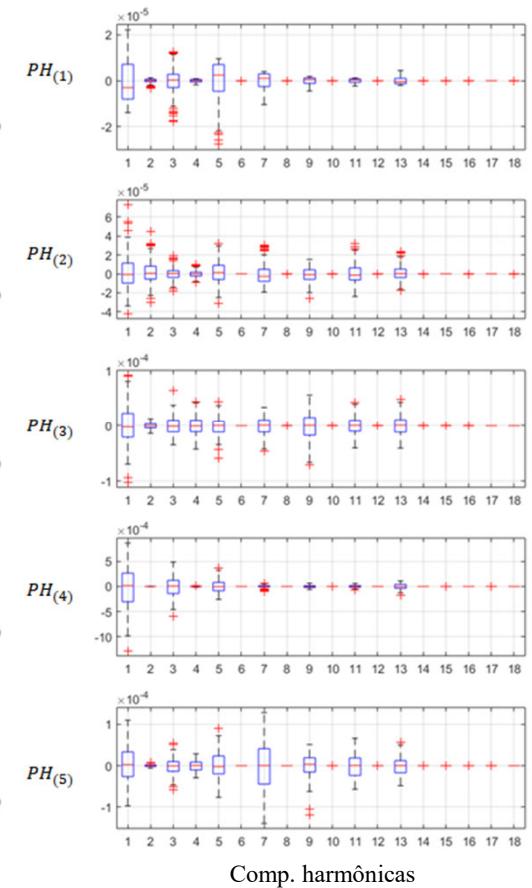
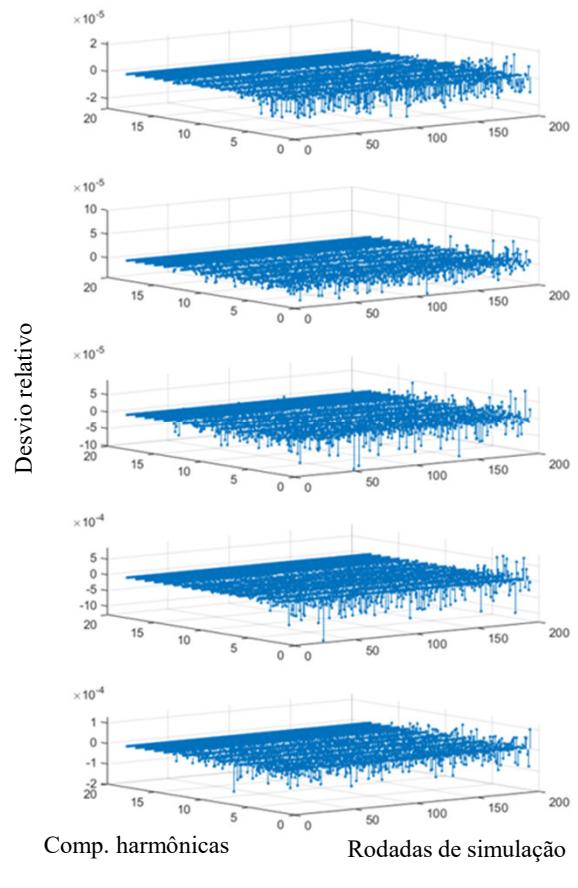


Caso teste #1

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



PH	Tipo	Componentes Harmônicas
1	Resistiva	$1_{100\%}$
2	Não-lineares	$1_{100\%}, 2_{10\%}, (3,4)_{4\%}$
3	Não-lineares	$1_{100\%}, 3_{10\%}, 5_{5\%}, (7,9,11,13)_{4\%}$
4	Não-lineares	$1_{100\%}, (5,7,11,13)_{10\%}$
5	Não-lineares	$1_{100\%}, 3_{20\%}, 5_{40\%}, (7,9)_{10\%}, (11,13)_{4\%}$

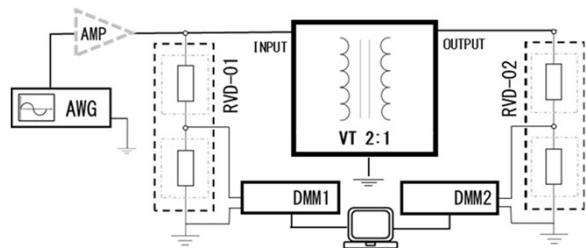


CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
gov.br/inmetro



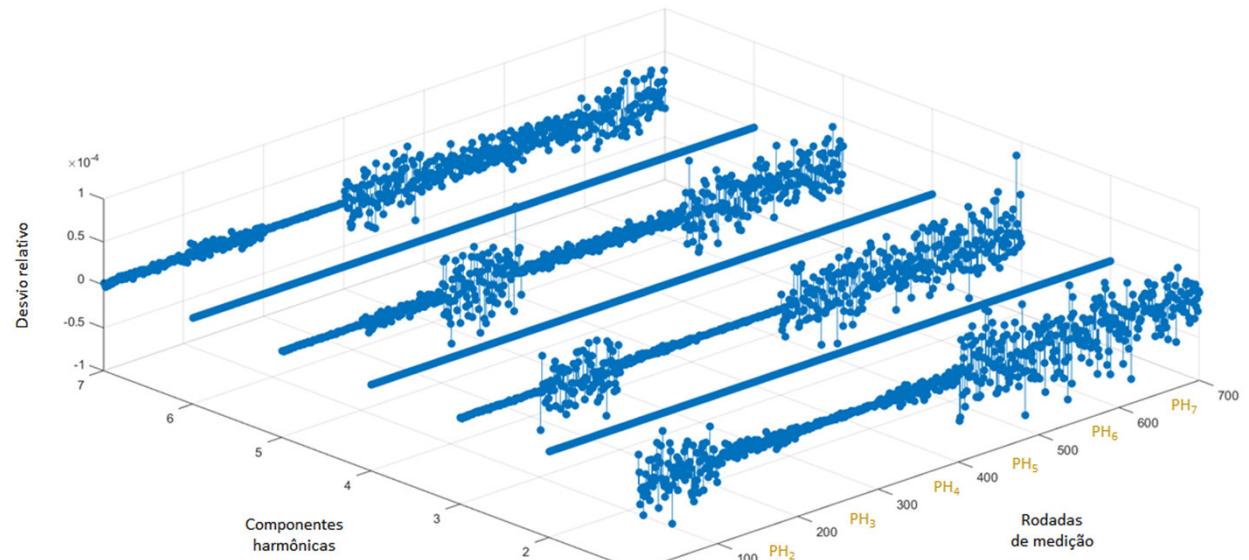
Caso teste #2

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



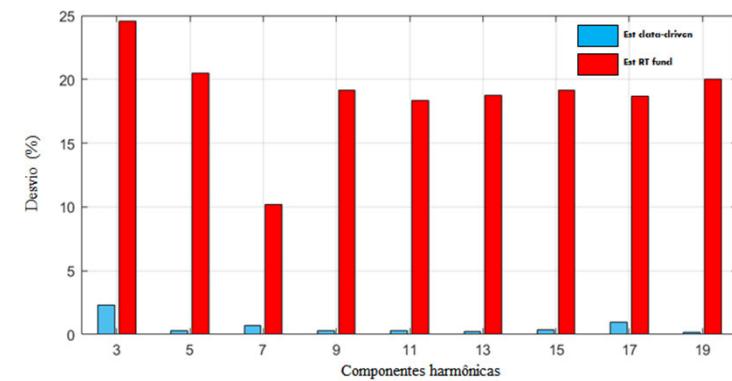
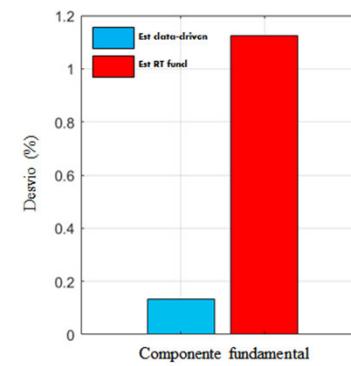
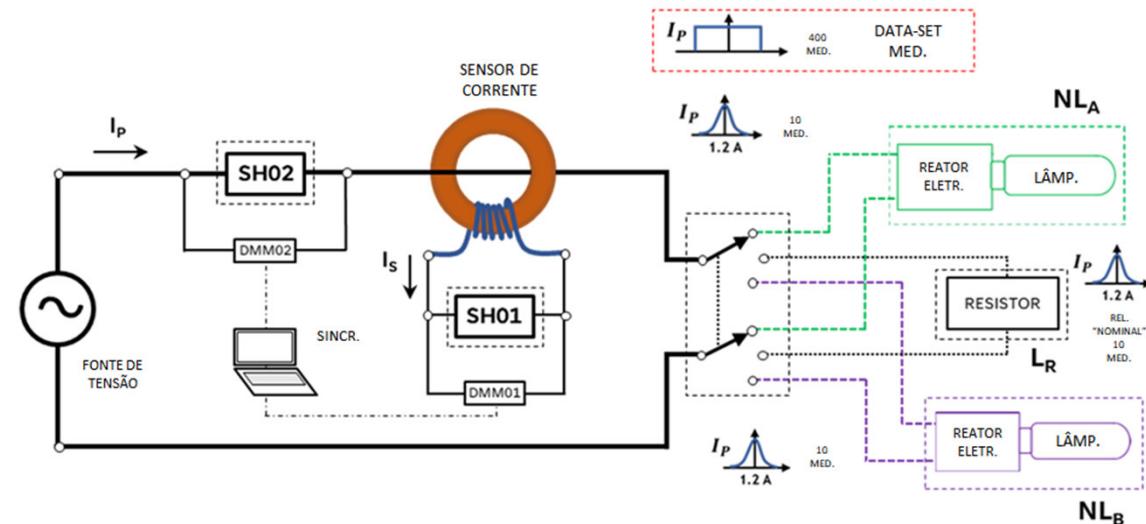
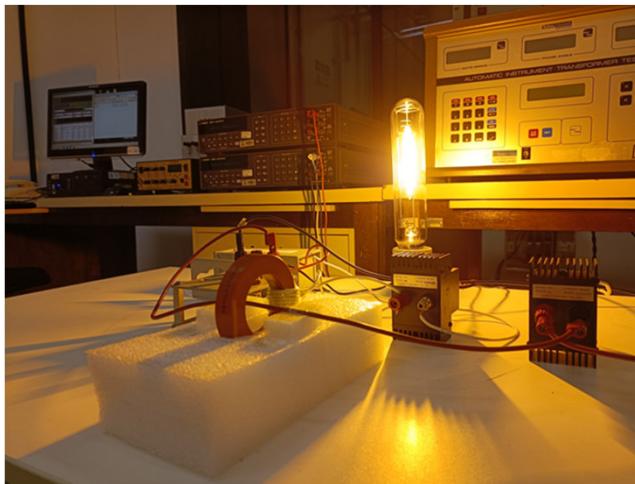
PH	Abordagem	Composição harmônica / (% da fund.)
1	<i>single-tone</i>	1 _{100%}
2	<i>single-tone</i>	3 _{20%}
3	<i>single-tone</i>	5 _{20%}
4	<i>single-tone</i>	7 _{20%}
5	<i>multi-tone</i>	1 _{100%} , 3 _{20%}
6	<i>multi-tone</i>	1 _{100%} , 3 _{20%} , 5 _{20%}
7	<i>multi-tone</i>	1 _{100%} , 3 _{20%}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

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



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



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 estimativa de pontos fora de faixas mapeadas no treinamento.

Desafios e Oportunidades

CONFIANÇA É A
NOSSA MARCA.
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 / estimativa 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



Obrigado!

Contato:
laasouza@inmetro.gov.br

Ouvidoria: 0800 285 1818



gov.br/inmetro



linkedin.com/company/inmetro



instagram.com/inmetro_oficial



facebook.com/lnmetro



youtube.com/tvinmetro



x.com/inmetro



flickr.com/inmetro



MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO,
INDÚSTRIA, COMÉRCIO
E SERVIÇOS

