Categoria Normas Técnicas
Eixo temático: Amostragem

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Avaliação comparativa entre sensor de umidade por espectrometria NIR e secagem em estufa (ABNT NBR ISO 3087) para minério de ferro

Samarco Mineração S.A.

Bruno Sepulchro Tozato
Matheus Teixeira Neiva
Luis Alberto Sfalsin Passos
Marco Antonio Pereira Silva
Matheus Batista

A Samarco


49 ANOS DE História
SAMARCO
Acionistas
VALE + BHP
Produtora
de pelotas de
minério de ferro
Inovação na lavra
de minério de
baixo teor
Transporte via
Mineroduto
Entre as maiores
exportadoras do Brasil com
presença no mercado mundial
MINERAÇÃO
BENEFICIAMENTO
MINERODUTO
PELOTIZAÇÃO
PORTO

Onde o trabalho acontece



DE GERMANO (MG) A UBU (ES)

A polpa de concentrado chega pelo mineroduto; em Ubu é filtrada e vira *pellet feed*, que segue para a prensa de rolos e o pelotamento.

PONTO DA COMPARAÇÃO

Usina IV de pelotização · correia de pellet feed entre a filtragem e a prensa de rolos

Uma variável crítica, medida tarde

A umidade do *pellet feed* é uma variável crítica de qualidade. Hoje ela é medida pelo laboratório: a **estufa (ABNT NBR ISO 3087) é o método ouro**, com resultado em 4 horas; para análises de tendência, o laboratório usa outros métodos, com resultado em cerca de 2 horas.

ONDE A UMIDADE AGE

Filtragem → **Prensa de rolos** → **Pelotamento** → **Forno**

Pelota crua
Resistência das pelotas cruas

Leito no forno
Permeabilidade do leito na queima

Energia
Consumo de gás natural do forno

COMO A UMIDADE É MEDIDA HOJE

4 h
Estufa — ABNT NBR ISO 3087: método ouro do laboratório

2 h
Outros métodos do laboratório, usados para análise de tendência

4,0 p.p.
toda a faixa operacional (9 % a 13 %): o método alternativo precisa de incerteza pequena frente a ela

Relevância e objetivo

POR QUE IMPORTA

Para quem opera

Decidir com a umidade de agora — não com a de horas atrás — e enxergar os transientes que hoje passam despercebidos entre duas amostras.

Para o negócio

Uma medição online confiável abre caminho para o controle avançado, que na Usina IV já reduziu a variabilidade granulométrica e o consumo específico de gás natural (SFALSIN PASSOS et al., 2024).

OBJETIVO

Comparar e avaliar a equivalência entre a **medição online por NIR** e a **secagem em estufa**, tomando a ABNT NBR ISO 3087 como padrão de comparação.

Faixa de 9 % a 13 % · ambiente industrial · Usina IV

POR QUE É BOA PRÁTICA

A norma é o padrão da comparação: dá o critério objetivo para aceitar o método alternativo e garante a rastreabilidade dos resultados.

Os dois métodos lado a lado

	ESTUFA · ABNT NBR ISO 3087	×	SENSOR NIR · NIRPRO
Papel no estudo	**Padrão de comparação — método ouro**		**Método em avaliação**
Princípio	Gravimetria: diferença de massa após secagem até massa constante		Espectroscopia: absorção da radiação pelas ligações O–H (≈ 1450 e 1940 nm)
Amostragem	Amostra coletada na correia, junto ao sensor, e levada ao laboratório		Leitura contínua do leito em movimento, por refletância difusa, sem contato
Cálculo	$U\,(\%) = (m_{úmida} - m_{seca}) / m_{úmida} \times 100$		Modelo PLSR que converte o espectro em umidade, calibrado contra a estufa.
Resultado	**4 h após a coleta**		**Contínuo, em tempo real**
Rastreabilidade	A própria norma		Herdada da estufa, via calibração e validação cega

Pergunta da comparação: o sensor NIR mede o mesmo que a estufa, com a exatidão que o processo exige?

Roteiro da comparação e públicos

Design for Six Sigma (DFSS): meta definida antes de comparar; a estufa (ABNT NBR ISO 3087) é a régua em todas as etapas.

1

Meta de equivalência

Quanto o NIR pode desviar da estufa (WERKEMA, 2006)

2

Ponto de amostragem

Walkdown; sensor instalado e integrado ao SDCD

jun–ago/2025

3

Amostragem pareada

Amostra junto ao sensor, analisada em estufa

ago–nov/2025

4

Calibração do NIR

Modelo PLSR ajustado contra a estufa

5 atualizações

5

Validação cega

Desvio médio e teste t fora da calibração

100 pares

PÚBLICOS ENVOLVIDOS

SAMARCO

Engenharia e operação

Processo, operação, instrumentação e automação: walkdown e SDCD

SAMARCO · LADO ESTUFA

Laboratório

Análises de referência pela ABNT NBR ISO 3087

PARCEIRO · LADO NIR

Spectral Solutions

Fabricante do espectrômetro NIRPRO e da modelagem quimiométrica (PLSR)

QUEM USA A INFORMAÇÃO

Sala de controle · Usina IV

Umidade em tempo real como tendência operacional

Quanto o NIR pode desviar da estufa

MODELO DE VARIÂNCIA

Toda medição soma a variação real do processo ao erro do instrumento:

$$\sigma_{obs}^2 = \sigma_{proc}^2 + \sigma_{ms}^2 \quad (2)$$

Se a faixa de 9 % a 13 % cobre seis desvios-padrão do processo (hipótese 6σ):

$$\sigma_{proc} \approx R / 6 = 4{,}0 / 6 \approx 0{,}67 \text{ p.p.} \quad (3)$$

O desvio observado é sempre inflado — e a inflação depende só da razão instrumento/processo:

$$\sigma_{obs} / \sigma_{proc} = \sqrt{[\, 1 + (\sigma_{ms} / \sigma_{proc})^2 \,]} \quad (4)$$

Hipótese 6σ conservadora: supõe processo sob controle e centrado. Framework: WERKEMA (2006).

± 0,30 p.p.

NIR × estufa para tendência operacional

inflação ≤ 10 % do desvio observado · σms/σproc ≤ 0,45

± 0,20 p.p.

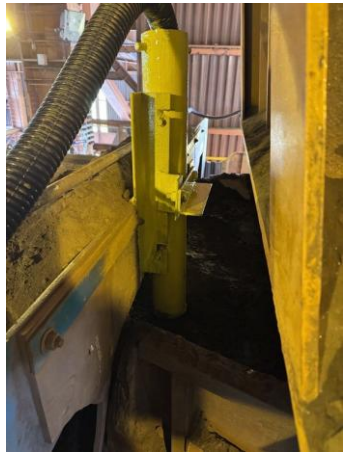
NIR × estufa para variável de controle

inflação ≤ 5 % do desvio observado · σms/σproc ≤ 0,30

Amostragem: cada par NIR × estufa

Mesmo material, mesmo instante: a amostra da estufa é retirada junto ao sensor NIR e pareada pelo horário da coleta.

1. **Leitura NIR**
   O sensor lê o leito continuamente, sem contato
2. **Coleta**
   Amostra retirada na correia, junto ao ponto de leitura
3. **Horário**
   Cada amostra é identificada pelo horário da coleta
4. **Estufa**
   Análise no laboratório da Samarco pela ABNT NBR ISO 3087
5. **Par NIR × estufa**
   Leitura NIR do instante da coleta + resultado da estufa



PONTO DEFINIDO EM WALKDOWN

- **Representatividade:** o material lido e amostrado é o pellet feed da filtragem
- **Cobertura óptica estável:** sem correia vazia ou segregação
- **Acesso seguro:** coleta e manutenção feitas com segurança

Correia U04-03TP001 · Usina IV, Ubu (ES)

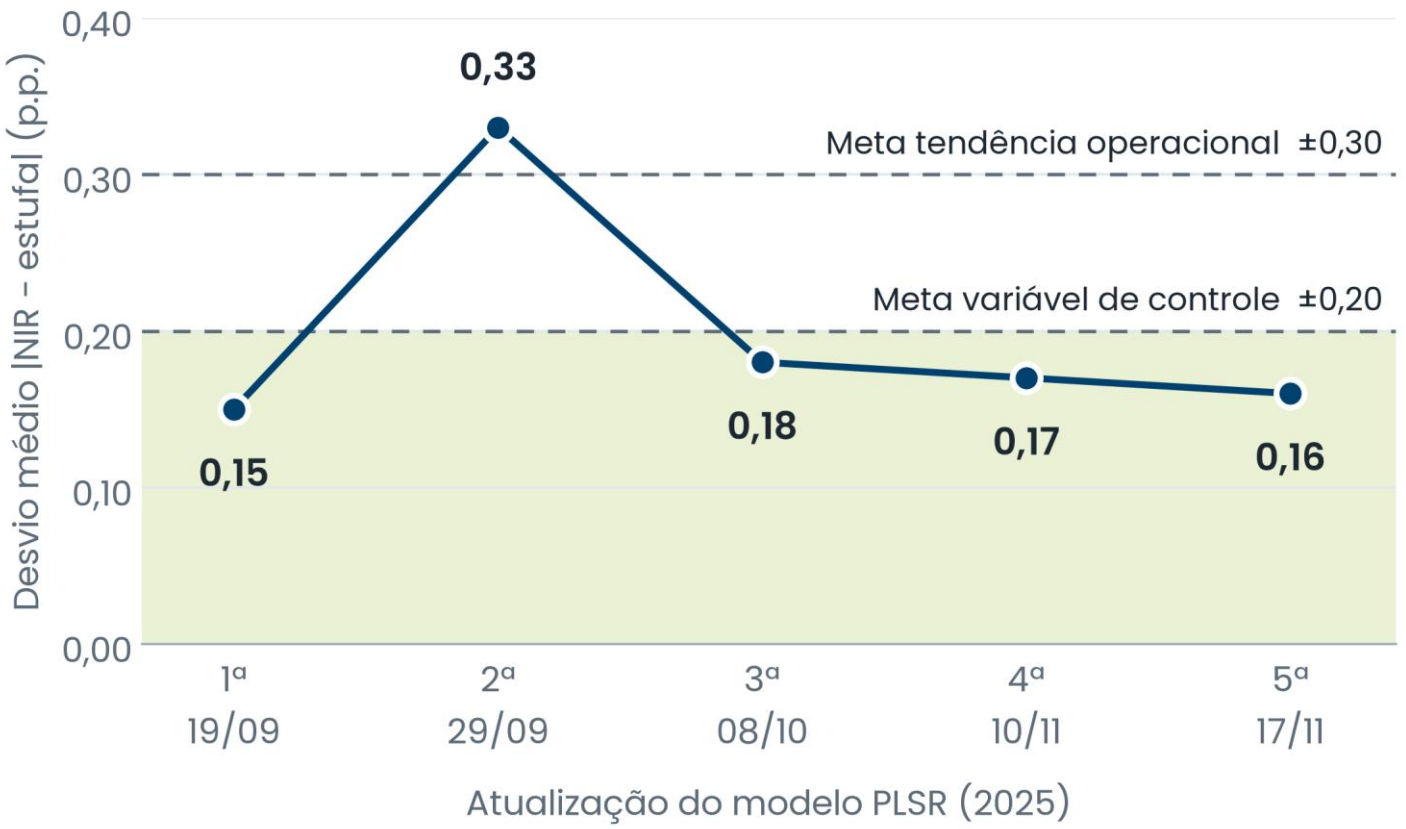
ago–nov/2025
campanha de amostragem pareada

395
amostras na base (5ª atualização)

100
amostras de validação cega

70 / 30 %
calibração / validação cega

NIR × estufa nas cinco atualizações

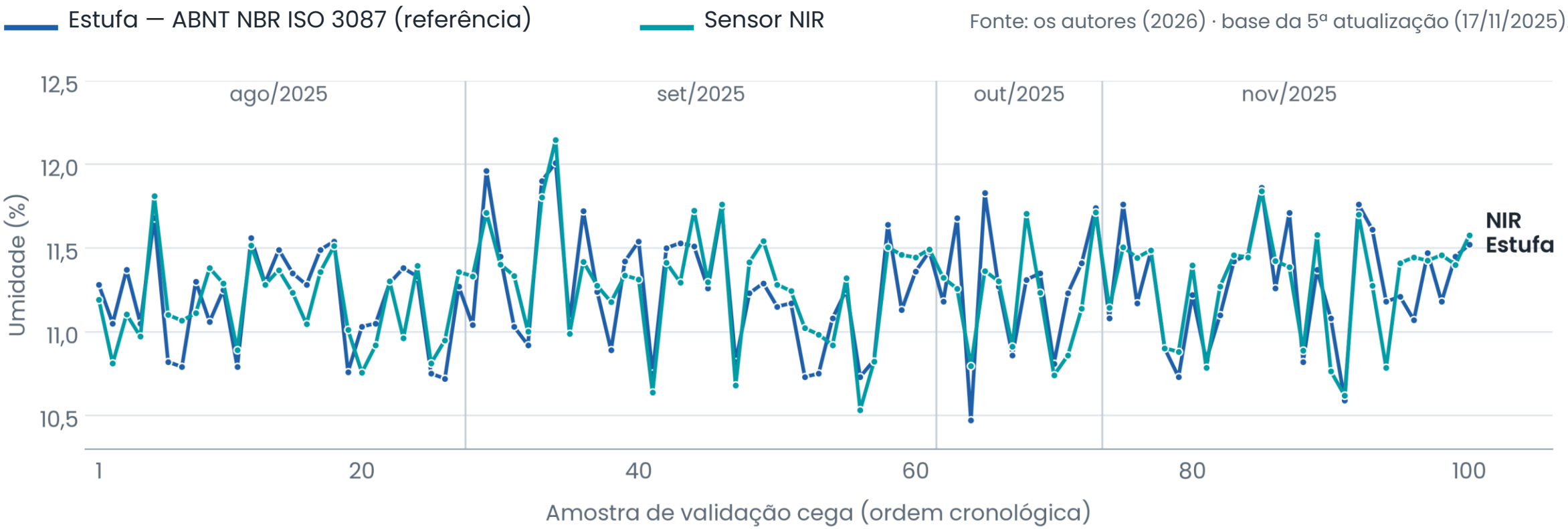


Atual.	Amostras na base	Validação cega	|NIR − estufa| (p.p.)
1ª	128	12	0,15
2ª	226	21	0,33
3ª	289	51	0,18
4ª	328	55	0,17
5ª	**395**	**100**	**0,16**

Fonte: os autores (2026). Referência: estufa, ABNT NBR ISO 3087.

A oscilação da 2ª atualização é esperada no início da calibração, quando a base ainda não cobre toda a variabilidade. Com novos pares e retreino, voltou a 0,18 e fechou em 0,16 p.p.

NIR × estufa, amostra a amostra



O sensor NIR segue a estufa amostra a amostra: desvio médio absoluto de 0,16 p.p. nas 100 amostras cegas.

Comparação estatística NIR × estufa

n = 100 pares NIR × estufa

Validação cega fora da calibração

α = 5 % significância

PERGUNTA	ESTATÍSTICA	CRITÉRIO	RESULTADO	DECISÃO
Quanto o NIR se afasta da estufa?	$\mathrm{DMA} = (1/n) \cdot \Sigma\, \lvert \mathrm{NIR}_i - \mathrm{estufa}_i \rvert$ Desvio médio absoluto	≤ 0,20 p.p. (controle) ≤ 0,30 p.p. (tendência)	**0,16 p.p.**	✓ **Atende as duas metas**
Há viés entre os métodos?	Teste t de Student H_0: média NIR = média estufa	p > 0,05	**p = 0,30**	✓ **Não rejeita H_0** sem viés sistemático
O desvio se mantém na faixa?	DMA por faixa de umidade intervalos de 0,5 %	≤ 0,20 p.p.	**0,14 a 0,18 p.p.**	✓ **Centro: 98 de 100** ! Extremos: 1 amostra

Leitura: a diferença NIR - estufa está dentro da meta e não é estatisticamente significativa — os métodos são equivalentes na região central da faixa.

Veredito: sensor NIR × estufa

CRITÉRIO	ESTUFA · ABNT NBR ISO 3087	SENSOR NIR	VEREDITO
Exatidão	É a referência	Desvio médio absoluto de 0,16 p.p. em 100 amostras cegas	✓ **Atende ±0,20 p.p.**
Viés sistemático	—	Teste t de Student: p = 0,30	✓ **Sem diferença a 5 %**
Tendência do processo	Pontual	Segue a estufa amostra a amostra nas 100 amostras cegas	✓ **Acompanha**
Cobertura da faixa	9 % a 13 %	98 de 100 amostras entre 10,5 % e 12,0 %	! **Ampliar extremos**
Tempo até o resultado	4 h	Contínuo, em tempo real	✓ **Ganho do NIR**

Exatidão comparável à de NEIVA (2022): 0,16 p.p. em equipamento de bancada, em laboratório — aqui, obtida em campo.

CONCLUSÃO

Na região central da faixa, o sensor NIR é equivalente à estufa (ABNT NBR ISO 3087): mede o mesmo, sem viés, em tempo real — complementando, sem substituir, o método de referência.

Aprendizados, diferencial e próximos passos

O QUE APRENDEMOS

1. **Meta antes da comparação:** a faixa operacional dita quanto o NIR pode desviar.
2. **Amostragem pareada é o coração:** mesmo material, mesmo instante.
3. **Parte do desvio é da própria estufa** (JCGM 100:2008)

$$u_c = \sqrt{(u_{lab}^2 + u_{sensor}^2 + u_{modelo}^2)}$$

Faríamos diferente: planejar a amostragem dos extremos da faixa desde o início.

DIFERENCIAL

Comparação de métodos com a norma como régua

A ABNT NBR ISO 3087 deu o critério objetivo e rastreável para aceitar o NIR.

REPLICÁVEL

Meta → amostragem pareada → calibração → validação cega: serve a qualquer sensor online que precise provar que mede o que a norma mede.

PRÓXIMOS PASSOS

1. **Incerteza expandida (k = 2)** do conjunto sensor–modelo (JCGM 100:2008)
2. **Amostragem dos extremos** mais pares nas pontas da faixa
3. **Robustez a blends** repetir a comparação com outros blends
4. **Controle avançado** usar o NIR como entrada do controle avançado

Legado: a umidade do pellet feed ganhou uma segunda medição — contínua e equivalente à estufa na região central — que complementa, sem substituir, o método de referência.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3087**: minérios de ferro — determinação do teor de umidade de um lote. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

GELADI, Paul; KOWALSKI, Bruce R. Partial least-squares regression: a tutorial. **Analytica Chimica Acta**, v. 185, p. 1-17, 1986.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **JCGM 100:2008** — Evaluation of measurement data: guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Sèvres: BIPM, 2008.

NEIVA, Matheus Teixeira. **Desenvolvimento de dispositivo automático de medição de umidade de minério de ferro**. 2022. Dissertação (Mestrado em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração) — Universidade Federal de Ouro Preto / Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, 2022.

ROCHA, L. F. et al. Medição robotizada de umidade em campo de finos de minério de ferro após filtragem em filtros de discos verticais a vácuo. In: SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO E TI INDUSTRIAL, 18., 2014, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABM, 2014.

SFALSIN PASSOS, L. A. et al. Redução no consumo de gás natural utilizando controle avançado de processo. In: PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL, 2024, categoria Eficiência Energética. Belo Horizonte: IBRAM, 2024.

WERKEMA, Maria Cristina Catarino. **Avaliação de sistemas de medição**. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006.

WOLD, Svante; SJÖSTRÖM, Michael; ERIKSSON, Lennart. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 58, n. 2, p. 109-130, 2001.

IBRAM | 50 ANOS
MINERAÇÃO DO BRASIL

OBRIGADO!

Samarco Mineração S.A. · www.samarco.com

Bruno Sepulchro Tozato · Matheus Teixeira Neiva · Luis Alberto Sfalsin Passos
Marco Antonio Pereira Silva · Matheus Batista