

Modernização das medições de fronteira: Refinamento e Otimização

Tema: Sistemas de Medição

Autores: Robert Guerra Silva, Rafael Ciriaco Figueredo Aguilar, Vander Julio Moreira de Abreu

Co-Autores: Eduardo Nunes dos Santos

Empresa: CEMIG Distribuição S.A

Resumo

Este artigo apresenta a implementação do Monitor e Excitador de Transformadores de Potencial (METP) na Subestação Neves 1 (SE Neves 1) e sua expansão para todos os pontos de fronteira entre CEMIG Distribuição (D) e CEMIG Geração e Transmissão (GT). O projeto, que visa aumentar a precisão das medições e reduzir perdas técnicas e comerciais, resultou em uma economia anual de aproximadamente 50 GWh. A metodologia baseou-se no balanço energético e comparativos temporais para avaliação dos ganhos, destacando o impacto do METP na gestão energética e eficiência operacional.

1. Introdução

A discussão sobre perdas na distribuição é constante nas distribuidoras de energia, já que afeta diretamente a receita destas empresas. A ANEEL estabelece limites regulatórios para as perdas e penaliza as distribuidoras que os violam. Portanto, soluções que levam a redução de perdas são de extrema importância já que trazem rápido retorno financeiro e garantem o atendimento da regulação.

“As perdas na Distribuição podem ser definidas como a diferença entre a energia elétrica adquirida pelas distribuidoras e a faturada aos seus consumidores. Essas perdas podem ser técnicas ou não técnicas.

- As perdas técnicas são inerentes à atividade de distribuição de energia elétrica, pois parte da energia é dissipada no processo de transporte, transformação de tensão e medição em decorrência das leis da física.
- Já as perdas não técnicas, apuradas pela diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, têm origem principalmente nos furtos (ligação clandestina, desvio direto da rede), fraudes (adulterações no medidor ou desvios), erros de leitura, medição e faturamento.” (ANEEL, 2021)

A energia adquirida pela distribuidora é injetada em sua rede, principalmente, pelas transmissoras e a medição deste montante de energia é feito pelos sistemas de medição de fronteira. Estes sistemas são compostos por vários componentes, sendo os principais deles: medidores, transformadores de potencial (TP) e transformadores de corrente (TC). Estes componentes de medição possuem erros inerentes à suas construções e a redução dos erros dos TPs é o objeto deste artigo.

A medição de fronteira no setor elétrico é fundamental para assegurar a precisão na contabilização da energia elétrica, garantir a transparência nas transações entre os diversos agentes do mercado e assegurar

o cumprimento das normas regulatórias estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Esse artigo tem como objetivo apresentar um método utilizado pela CEMIG, com a inclusão de um Monitor Excitador de Transformadores de Potencial, que permite carregar os transformadores de potencial com carga otimizada, aproximando seu erro de medição a zero, superando as especificações do ONS e reduzindo as perdas da CEMIG.

2. Desenvolvimento

A medição de fronteira refere-se à mensuração da energia que transita entre dois pontos específicos do sistema elétrico, com a finalidade de registrar as transações de energia entre os agentes (geradores, distribuidores, comercializadores e consumidores) e garantir que todos cumpram suas obrigações financeiras e contratuais. Essas medições podem ser realizadas em pontos distintos, como entre a planta geradora e a rede de transmissão, entre a rede de transmissão e a distribuição, ou entre a distribuição e os consumidores finais. A medição de fronteira é vital para garantir que as transações no mercado de energia sejam transparentes e precisas, evitando disputas entre os agentes e assegurando a eficácia do mercado regulado, com o auxílio de sistemas de medição de alta precisão.

Os transformadores de potencial possuem diversos valores de potência de exatidão: 50, 75, 100, 150, 200, 400 VA e na maioria dos casos a carga imposta (burden) à eles é baixa. Nesta situação, os TPs tendem a apresentar erros positivos no módulo da tensão (tensão maior). Nos casos em que a carga secundária (burden) é próxima ao valor nominal, os TPs tendem a apresentar erros negativos no módulo da tensão (tensão menor). Entre 0 VA e a potência nominal, existe uma determinada potência na qual o erro do TP é igual a 0 %. O objetivo da solução é aproximar ao máximo o erro de 0 %, aumentando a exatidão dos montantes contabilizados de energia.

Vale ressaltar que uma baixa carga secundária normalmente é encontrada no parque atual de TPs devido a atualização dos equipamentos conectados aos seus enrolamentos secundários. Cada vez mais são encontrados equipamentos eletrônicos ao invés de equipamentos eletromecânicos, o que leva a uma redução expressiva na carga.

2.1.1 Testes em Laboratório

Para validar a teoria da relação entre carga secundária e erro dos transformadores de potencial foram realizados diversos testes em laboratório. Foram testados transformadores de diferentes fabricantes e diferentes níveis de tensão. Em todos os testes foi aplicada a tensão nominal do TP sob teste e realizada a variação da carga (burden) aplicado em seus terminais secundários. Todos os testes realizados possuíram configurações semelhantes. Foram utilizados os seguintes equipamentos: Fonte de alta tensão, transformador de potencial padrão e comparador.



Figura 1 – Ensaio em Laboratório



Figura 2 – Teste em Laboratório

Com base nos resultados obtidos, observou-se que, antes da instalação do excitador no transformador de potencial (TP) em ensaio, quando operado sem carga (a vazio), os erros de exatidão mostraram uma tendência a valores positivos. Após a aplicação gradativa das cargas do excitador, essa tendência dos erros passou a se aproximar do valor zero. Esse comportamento indica que, ao ajustar adequadamente a carga no secundário do TP, é possível obter medições com maior precisão e confiabilidade. Essa conclusão foi constatada metrologicamente por meio de ensaios de exatidão realizados em laboratório acreditado pelo INMETRO, utilizando o conjunto de teste automático para transformadores de medição. Os testes realizados seguiram rigorosamente os padrões estabelecidos. O processo de ajuste da carga no secundário, conforme

demonstrado pelos testes, é fundamental para melhorar a linearidade e reduzir desvios nos valores de medição do TP, assegurando maior precisão nas medições em diferentes condições de operação.

Balteau Grupo WEG					TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO 72kV				
BALTEAU PRODUTOS ELÉTRICOS ITAJUBA-MG BRASIL									
TIPO		TPI-72	Nº	24.5084 08	ANO	2024	GRUPO	3b	
Umáx.		72,5	kV N.I.	19/350/-	kV	USO	EXTERIOR		
F		60	Hz U Induz.	140	kV P. Term.	1000 TOTAL		VA	
NORMA/ANO		NBR-6855/2018		Fst. cont.	1,2/1,9 Cont.				
TERMINAIS	U. Prim. (V)	U. Sec. (V)	Rn	EXATIDÃO					
1X2-1X3	69000/ $\sqrt{3}$	115/ $\sqrt{3}$	600:1	75VA 0,3					
1X1-1X3	69000/ $\sqrt{3}$	~115	350:1						
2X2-2X3	69000/ $\sqrt{3}$	115/ $\sqrt{3}$	600:1	75VA 0,3					
2X1-2X3	69000/ $\sqrt{3}$	~115	350:1						
3X2-3X3	69000/ $\sqrt{3}$	115/ $\sqrt{3}$	600:1	75VA 0,3					
3X1-3X3	69000/ $\sqrt{3}$	~115	350:1						
CARGA DE EXATIDÃO SIMULTÂNEA								225VA	
ÓLEO TIPO		MINERAL NAFTÊNICO							
M. ÓLEO	30	kg	VOL.	34	L				
M. TOTAL	195				kg				
MANUAL	BBA000003V01								
ENCOM.	32354								

Figura 3 – Placa de Características TP

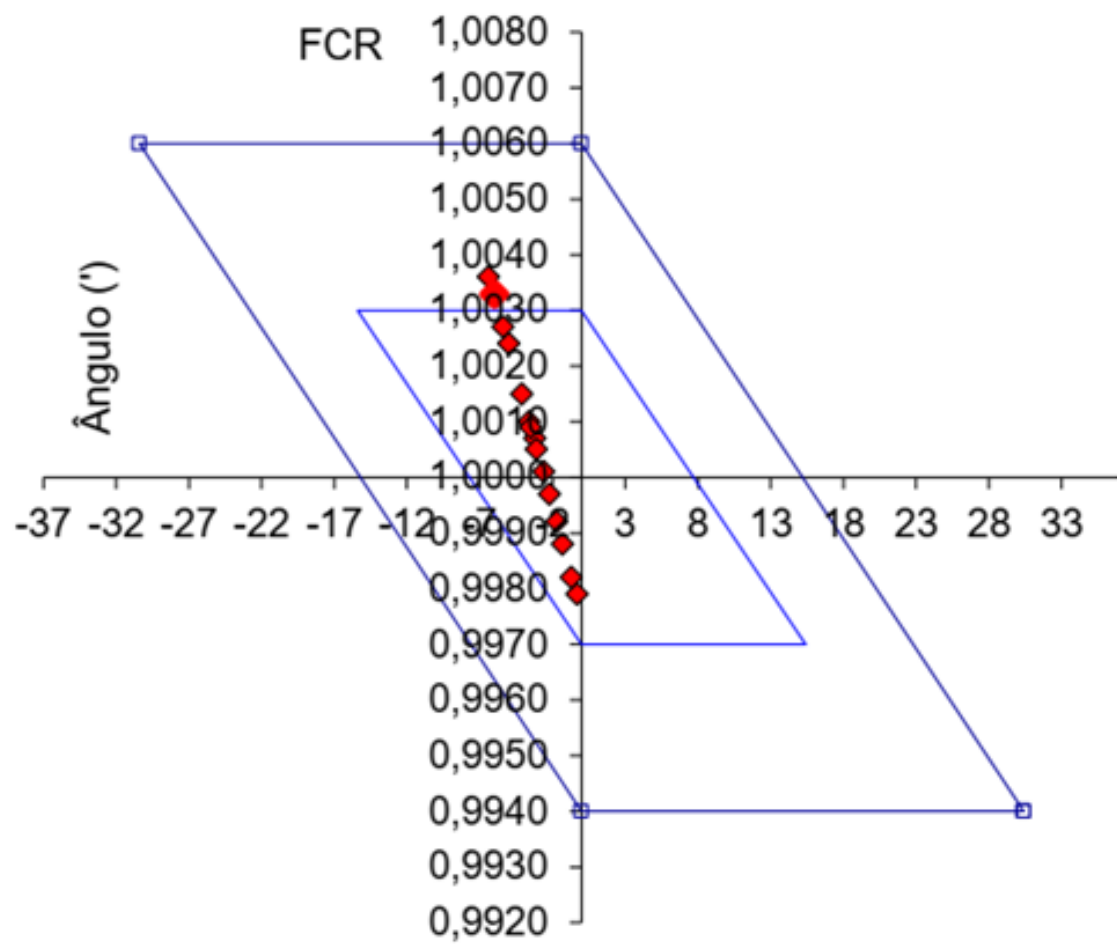


Figura 4 – Paralelograma de Erros



Figura 5 – Transformador de Potencial

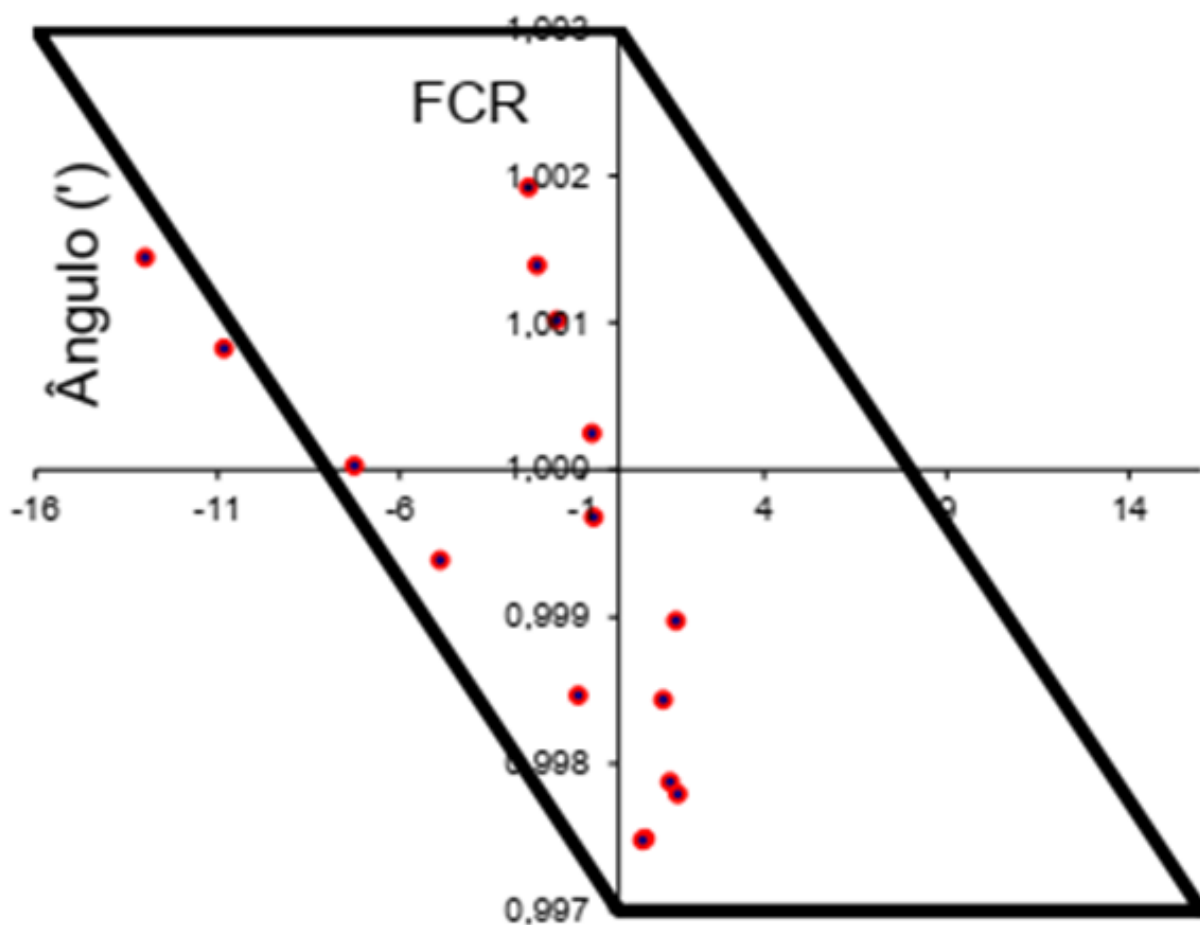


Figura 6 – Paralelogramo de Erros TP

2.1.2 Piloto SE Neves 1

Foi realizado um projeto piloto na Subestação Neves 1, escolhida por ser a maior subestação da Cemig. Além disso, a proximidade e a facilidade de realizar os acompanhamentos foram fatores decisivos para a escolha. Devido ao grande volume de energia envolvido, o sucesso do projeto traria um retorno significativo, resultando em um impacto financeiro considerável e em ganhos substanciais com a redução de perdas de energia.

2.1.3 Expansão da Solução

Após vários testes e acompanhamentos que validaram em campo os resultados do laboratório, e com o sucesso na redução das perdas, o projeto foi expandido para todas as outras fronteiras da Cemig D, com avaliação dos equipamentos de cada subestação.

2.2 Características Técnicas das Medições de Fronteira

2.2.1 Tipos de Medição

As medições de fronteira podem ser realizadas com o uso de diversos equipamentos e tecnologias, incluindo medidores eletrônicos de energia, transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP). Estes dispositivos garantem que as medições sejam feitas de maneira precisa e com alta confiabilidade. A precisão dos medidores é um fator crítico, especialmente quando se considera o impacto econômico que um erro de medição pode causar no equilíbrio financeiro do sistema elétrico.

- **Medidores Eletrônicos de Energia:** Equipamentos avançados que podem medir a energia ativa e reativa, registrando os dados de forma digital e possibilitando leituras remotas.
- **Transformadores de Corrente (TC):** São utilizados para reduzir a corrente elétrica em níveis mensuráveis, convertendo a corrente de alta intensidade, característica do sistema de transmissão, para uma corrente proporcional que pode ser lida pelos medidores de energia.
- **Transformadores de Potencial (TP):** Utilizados para reduzir a tensão elétrica, possibilitando a medição de alta tensão de forma segura e precisa.

2.3 Ensaio de Exatidão dos Transformadores de Corrente (TC)

Os **transformadores de corrente (TC)** desempenham um papel crucial na medição de fronteira, uma vez que são responsáveis por transformar a corrente elétrica que circula no sistema, geralmente em níveis elevados, para valores proporcionais que possam ser registrados por instrumentos de medição. O **ensaio de exatidão** é um teste realizado para verificar o desempenho do TC e garantir que ele funcione dentro dos limites de erro estabelecidos pelas normas da ANEEL.

2.3.1 Modelos de Transformadores de Corrente

Existem diversos modelos de transformadores de corrente, os quais variam de acordo com a aplicação e as necessidades de medição. Os modelos mais comuns incluem:

- **TC de Baixa Tensão (Classe 0,5S a 1,0):** Adequados para medições de energia em sistemas de baixa e média tensão, com maior precisão em ambientes de medição com menores valores de corrente.
- **TC de Alta Tensão (Classe 0,2S a 0,5):** Usados em sistemas de alta tensão, como em linhas de transmissão, onde a precisão é ainda mais crítica devido ao volume de energia envolvido e aos altos custos financeiros de erros.

Esses modelos podem ser classificados de acordo com a precisão da medição, sendo mais comuns as classes **0,2S** e **0,5S**, que oferecem precisão de erro dentro de 0,2% e 0,5%, respectivamente. A exatidão dos TC está diretamente ligada à **classe de precisão** e deve ser rigorosamente testada por meio de ensaios.

2.3.2 Ensaio de Exatidão

O ensaio de exatidão dos transformadores de corrente visa verificar o erro de medição, ou seja, a diferença entre o valor medido pela corrente convertida pelo TC e o valor real da corrente que circula pelo sistema. Para garantir que os TCs estejam operando de maneira eficiente, os seguintes aspectos são analisados:

-

Erro de Transformação: O erro é a diferença entre a corrente real no circuito e a corrente medida pelo TC. Ele é expresso em termos absolutos ou percentuais. O erro de transformação não pode exceder os limites estabelecidos pela ABNT NBR 5446 e pela ANEEL.

- **Curvas de Característica:** Os ensaios também envolvem a análise das curvas de característica, que descrevem a relação entre o erro de medição e a carga que o TC está medindo, além da corrente nominal.
- **Impedância Secundária:** A impedância da carga conectada ao TC também é analisada, pois ela pode afetar a precisão da medição, principalmente em casos de correntes elevadas.

2.4 Tensão nos Transformadores de Corrente

Quando o erro de medição de um TC aproxima-se de zero, isso implica que a medição está sendo realizada com alta precisão, ou seja, a relação entre a corrente primária e a corrente secundária é quase exata. Neste cenário, a **tensão no circuito secundário do transformador de corrente** também experimenta mudanças.

- **Baixa Impedância Secundária:** Com o erro aproximando-se de zero, a impedância do circuito secundário se torna muito baixa. Isso significa que o TC está fornecendo uma corrente secundária muito próxima da corrente primária, e as perdas no circuito secundário são minimizadas.
- **Comportamento Linear:** Em condições ideais, onde o erro é praticamente zero, a tensão induzida no circuito secundário tende a seguir de forma linear a variação da corrente primária, o que é essencial para a precisão na medição da energia.

Esse comportamento assegura que as medições feitas pelo TC são consistentes e que os medidores conectados a esses transformadores possam registrar com precisão o valor da energia gerada, transmitida ou consumida.

2.5 Aplicação da Medição de Fronteira no Mercado de Energia

A medição de fronteira é crucial para garantir a transparência e a justiça nas transações de energia, especialmente no mercado brasileiro, onde a CCEE desempenha um papel central na contabilização da energia. A medição correta da energia nos pontos de fronteira entre os agentes é essencial para determinar os volumes de energia física comercializados e para a liquidação financeira.

2.5.1 Relevância das Medições para a CCEE

A **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)** é a responsável pela operacionalização do mercado de energia, fazendo a contabilização das transações de energia física e financeira entre os diversos agentes do sistema elétrico. As medições de fronteira são utilizadas pela CCEE para registrar as transações de energia entre as partes e calcular os valores devidos, considerando tanto os contratos bilaterais quanto as negociações no Mercado de Curto Prazo (MCP).

2.5.2 Processo de Contabilização e Liquidação

O processo de contabilização na CCEE envolve a coleta dos dados de medição e sua conferência para garantir que os volumes de energia comercializados estejam corretos. O processo de liquidação financeira é realizado com base nas medições, para garantir que os agentes paguem ou recebam os valores corretos, de acordo com os contratos firmados.

2.6. Processo Regulatórios e Padrões de Medição

A ANEEL estabelece as regras para a medição de energia elétrica no Brasil, com o objetivo de assegurar a exatidão e a transparência das medições realizadas no sistema elétrico. A Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010, a Resolução Normativa nº 687/2015 e a norma ABNT NBR 5446 são algumas das principais regulamentações que definem os requisitos técnicos e operacionais para a medição de energia.

2.7. Desafios e Tendências Futuras

A evolução do mercado de energia elétrica e as inovações tecnológicas trazem novos desafios para as medições de fronteira. A crescente incorporação de fontes renováveis intermitentes e o avanço da digitalização do sistema elétrico exigem uma atualização contínua dos sistemas de medição para garantir a precisão e a confiabilidade das medições em tempo real.

2.8. Monitor e Excitador de Transformadores de Potencial (METP)

O METP foi desenvolvido para corrigir erros de medição em TPs com baixa carga em seus secundários. A solução consiste em um painel elétrico instalado em paralelo aos TPs, capaz de ajustar a carga aplicada, reduzindo desvios e melhorando a exatidão das medições

Especificações do METP:

- Tensão secundária: 66,4 V ou 115 V.
- Classe de exatidão: e 0,3%.
- Potência de carga ajustável: até 400 VA.
- Grau de proteção: IP54.

Etapas de Implantação

- Elaboração do projeto técnico: Ajustes nos esquemas elétricos e plantas de detalhamento para integração do METP.
- Instalação: Montagem do painel elétrico próximo às caixas de concentração dos TPs, com conexões em paralelo.
- Comissionamento: Testes funcionais e validação dos dados de medição antes e depois da instalação.
- Análise de dados: Comparação do desempenho dos TPs para identificar ganhos em precisão e redução de perdas

A instalação é realizada sem necessidade de interrupção do circuito, utilizando infraestrutura pré-existente na subestação.



Figura 7 – Painel METP montado na estrutura do TP

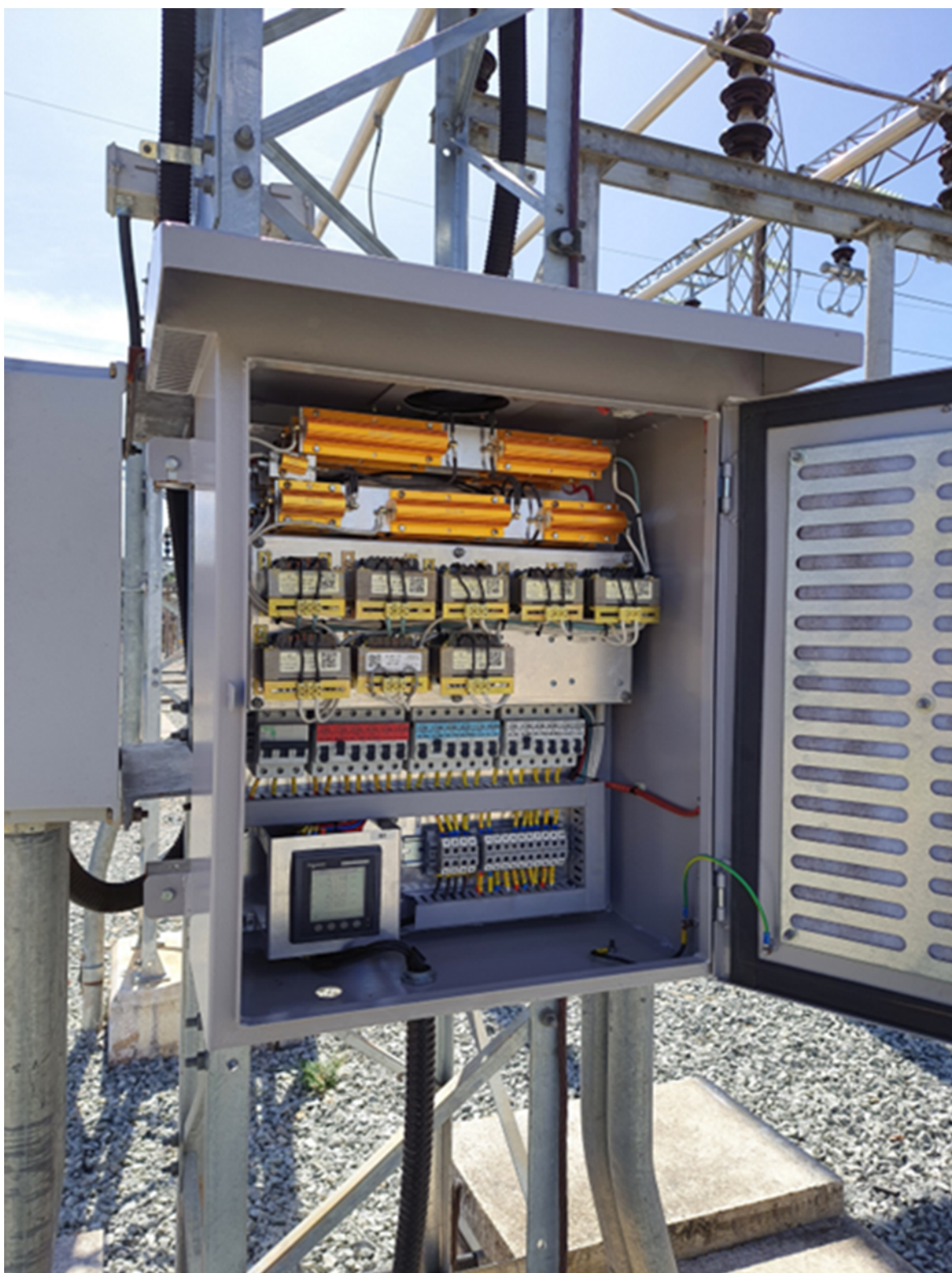


Figura 8 – Painei METP Visão Interna

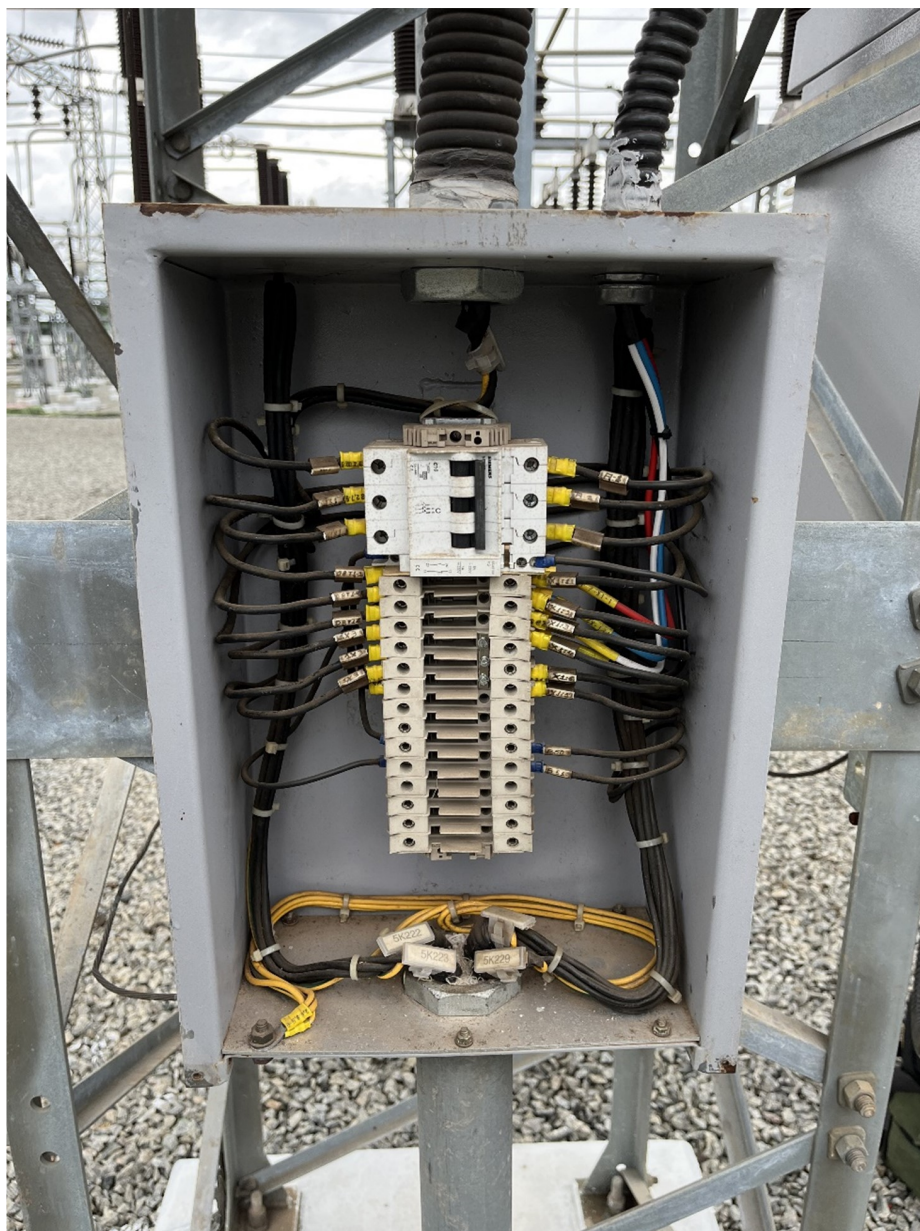


Figura 9 – Conexão na caixa de concentração do TP

2.8.1 Metodologia de Análise

Para avaliar o impacto do METP, foi utilizado o método de balanço energético, comparando a energia injetada e consumida nos circuitos analisados. Adicionalmente, os dados foram expurgados para eliminar inconsistências causadas por sincronismo inadequado ou variações operacionais significativas.

Passos principais da análise:

- Levantamento de dados de medição: Energia injetada e consumida em 15 pontos de medição.
- Cálculo de perdas: Diferença percentual entre energia injetada e consumida.
- Comparação antes e depois da instalação: Resultados analisados por períodos temporais (semanas, meses) e por perfil de carga

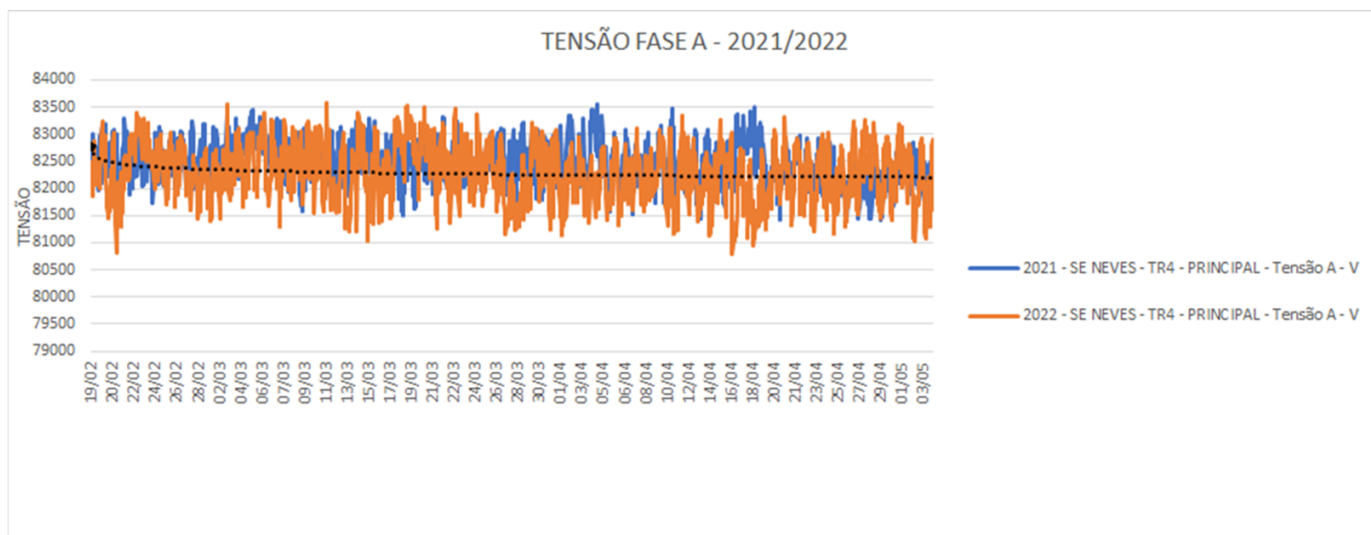


Figura 10 - Gráfico comparativo das tensões

2.8.2 Resultados Obtidos

Após a instalação do METP na SE Neves 1, as perdas foram reduzidas em 0,28%, correspondendo a uma economia de cerca de 700 MWh por mês. Com a expansão da solução para todas as medições de fronteira da CEMIG, o impacto total alcançou uma economia anual de 50 GWh.

Comparativos principais:

- Antes da instalação: Perdas médias de 0,94%.
- Depois da instalação: Perdas médias de 0,69%.
- Redução absoluta: 0,25 pontos percentuais

Benefícios Adicionais

Além da redução direta nas perdas, o projeto gerou outros benefícios:

Aumento da confiabilidade: Melhor precisão na medição elimina disputas por divergências de faturamento.

Aplicação regulatória: Conformidade com padrões exigidos pela ANEEL.

Escalabilidade: A solução pode ser replicada em outras subestações, ampliando os ganhos operacionais.

Energia com correção do erro do TP			
Data	Incremento Distribuidora -MWH	Incremento Financeiro Médio	
01/02/2022 00:00	1.221,10	R\$	260.704,23
01/03/2022 00:00	1.525,68	R\$	325.732,62
01/04/2022 00:00	1.428,33	R\$	304.947,79
01/05/2022 00:00	190,91	R\$	40.759,06
Total	4.366,01	R\$	932.143,71

Figura 11 – Tabela comparativa Energia x Financeiro

3. Conclusão

A medição de fronteira desempenha um papel crucial na contabilização e na transparência das transações no mercado de energia. O uso de transformadores de corrente de alta precisão e a realização de ensaios de exatidão são fundamentais para garantir que as medições sejam realizadas com a mínima margem de erro, promovendo a justiça no mercado e a confiabilidade do sistema elétrico.

O projeto piloto na SE Neves 1 demonstrou a eficácia do METP na redução de perdas técnicas e comerciais em medições de fronteira. A replicação da solução em outros pontos do sistema CEMIG consolidou um impacto significativo, com economia anual de 50 GWh. Este case evidencia a importância de soluções inovadoras como o METP na modernização da infraestrutura elétrica brasileira, contribuindo para maior eficiência e sustentabilidade.

4. Referências bibliográficas

- ANEEL. Resolução Normativa nº 414/2010: Procedimentos de Medição de Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010.
- ANEEL. Resolução Normativa nº 687/2015: Regras de Liquidação e Contabilização de Energia Elétrica na CCEE. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015.
- ABNT. NBR 5446: Medição de Energia Elétrica em Instalações de Consumo. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Manual de Contabilização de Energia Elétrica. CCEE, 2023.
- FERREIRA, Ricardo de Sá. Medição e Comercialização de Energia Elétrica no Brasil: Aspectos Regulatórios e Operacionais. Editora GEN, 2019.
- IEC 60044-1: Instrument Transformers - Part 1: Current Transformers. International Electrotechnical Commission, 2003.