

Análise de Qualidade da Energia com Oscilografia Contínua

Gustavo Travassos Aguiar da Silva
Departamento de Pesquisa e
Desenvolvimento
Neoenergia
Salvador, Brasil
gtravassos@neoenergia.com

José Antonio de Souza Brito
Departamento de Pesquisa e
Desenvolvimento
Neoenergia
Salvador, Brasil
jbrito@neoenergia.com

Moira Bastos Prates
Departamento de Pesquisa e
Desenvolvimento
Neoenergia
Salvador, Brasil
moira.bastos@neoenergia.com

Resumo— A Neoenergia, a partir do programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação regulado pela ANEEL desenvolveu um registrador de parâmetros de qualidade da energia com capacidade para registrar forma de onda da tensão e corrente de forma contínua. Este equipamento, denominado GODEL PQA-900, foi desenvolvido em parceria com instituto de pesquisa Lactec e o parceiro industrial IMS Power Quality. Esse produto representa uma nova geração de registradores Classe A. O presente trabalho mostra os resultados de análises baseadas em oscilografias contínuas para mitigação de problemas de qualidade de energia, demonstrando os benefícios da utilização desse recurso para respostas mais assertivas às questões dos clientes e atendimento das suas demandas. A necessidade do desenvolvimento de equipamentos com esta função tem sido cada vez mais evidenciadas pela constante evolução do setor elétrico e modernização das redes de distribuição que, atualmente, apresentam casos de qualidade da energia com maior complexidade. Este trabalho faz uma breve revisão no tema de medição de grandezas elétrica, trazendo uma comparação entre alguns modelos de analisadores de qualidade da energia presentes no mercado brasileiro, avaliando a capacidade de registro de oscilografias destes equipamentos e apresentando exemplos de casos e aplicações em que a possibilidade de analisar a oscilografia contínua trouxe benefícios para a avaliação relacionadas de eventos e, principalmente, reclamações de clientes industriais.

Keywords— Qualidade da Energia Elétrica, Medidores Inteligentes, Oscilografia Contínua.

I. INTRODUÇÃO

A constante evolução do setor elétrico está cada vez mais evidente nos dias atuais e, junto com ela, percebe-se o crescimento da exigência dos clientes, sejam eles residenciais ou industriais, por ações mais rápidas e assertivas na resolução das reclamações. Ao falar dos clientes industriais, o nível de exigência é ainda mais acentuado, principalmente no que se trata de problemas relacionados com Qualidade da Energia Elétrica (QEE). A necessidade da utilização de equipamentos que proporcionem o registro de grandezas elétricas de forma mais detalhada vem sendo identificado como forma a acompanhar estas mudanças e garantir o cumprimento de regulamentos e as demais resoluções normativas nacionais e internacionais. É possível destacar como exemplos de resoluções que balizam as questões relacionadas a QEE os Procedimentos de Distribuição [1-2], além dos padrões de institutos reconhecidos internacionalmente, como o IEEE e a IEC. [3-6].

É notável como a crescente demanda por energia, que no Brasil está prevista para crescer em média 2,5% entre 2024 e 2026 [7], e o avanço nas mais variadas tecnologias de rede se conectam diretamente com necessidade de entregar um produto com cada vez mais qualidade. Nesse interim, as concessionárias e empresas do setor de energia, para se manterem competitivas, são estimuladas a modernizar os equipamentos de monitoramento para redes de distribuição, permitindo um aumento de sua segurança, confiabilidade e eficiência, fatores que, consequentemente, proporcionam um atendimento mais eficaz e direcionado as necessidades específicas de cada cliente.

Observa-se no mercado, onde são comercializados equipamentos de medição de grandezas elétrica, que os registradores de qualidade da energia elétrica disponíveis apresentam algumas limitações na operação, que são toleráveis para alguns tipos de aplicações, como gestão de modalidade tarifária ou a coleta de informações com o objetivo de compreender problemas mais simples. Contudo, devido a exigência já mencionada e o crescente aumento na complexidade de questões relacionadas a QEE, tais equipamentos não são suficientes para atender demandas mais elaboradas.

Normalmente, os equipamentos que realizam registro de forma de onda requerem um disparo, conhecido como *trigger*, baseado em variações de grandezas elétricas que estão sendo monitoradas. Nos qualímetros Classe A, muitos registros de forma de onda são realizados para as variações de tensão de curta duração (VTCDs), de mais ou menos 10% do valor nominal, com duração de alguns poucos segundos. No entanto, isso tem se mostrado insuficiente para uma análise mais completa da sequência de eventos que possibilitem observar de forma na íntegra o comportamento das grandezas elétricas durante a ocorrência de distúrbios na rede.

Por estes motivos e visando a melhoria contínua na qualidade do produto entregue ao consumidor e do aprimoramento da qualidade do serviço, uma tecnologia inovadora de registro de formas de onda foi desenvolvida. Este equipamento tem como objetivo monitorar de maneira contínua e otimizada as mais diversas grandezas relacionadas com a QEE, sem perda de informação. O equipamento desenvolvido permite a detecção detalhada e contínua da forma de onda de tensão e corrente da rede elétrica, além de registrar todos os parâmetros de qualidade da energia elétrica estabelecidos no PRODIST [1]. Os resultados apresentados demonstram o aspecto inovador do equipamento, que faz uso

de uma técnica de compressão e descompressão de dados configurável, possibilitando o uso otimizado dos recursos de armazenamento sem prejudicar a sua classe de exatidão, além de permitir o acesso às informações registradas de maneira remota.

O presente trabalho irá mostrar os principais aspectos do qualímetro de oscilografia contínua, desenvolvido pelo programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Neoenergia, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Após a Introdução, a Seção II norteará o leitor com uma introdução sobre Medição de Grandezas Elétricas. Em seguida, na Seção III, será abordado o qualímetro de oscilografia contínua e os benefícios de investir e adotar essa tecnologia nas empresas distribuidoras de energia elétrica. Na Seção IV, serão exibidos Estudos de Casos protagonizado por clientes que tiveram seus processos produtivos interferidos por problemas relacionado a QEE e outras Aplicações. Por fim, na Seção V, serão feitas as considerações finais sobre o trabalho.

II. MEDIÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

A medição de grandezas elétricas desempenha um papel crucial no monitoramento e na garantia da qualidade da energia elétrica. A qualidade da energia está diretamente relacionada à eficiência, confiabilidade e segurança dos sistemas elétricos, bem como ao atendimento adequado das necessidades dos consumidores. Este tema é abordado por normas nacionais e internacionais. No Brasil, destaca-se o Módulo 8 do PRODIST, que estabelece os padrões técnicos e operacionais para garantir níveis mínimos de qualidade na energia fornecida. O PRODIST dedica esse módulo para definir critérios, limites e indicadores que devem ser atendidos pelas distribuidoras de energia, abrangendo aspectos como:

- **Variações de tensão:** Garantia de que a tensão fornecida esteja dentro de faixas admissíveis para evitar danos a equipamentos e desconforto aos consumidores;
- **Harmônicos:** Controle de distorções na forma de onda elétrica causadas por cargas não lineares, como inversores e motores industriais.;
- **Interrupções no fornecimento:** Monitoramento de interrupções de curta e longa duração, com base nos indicadores DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Além das principais causas de problemas que culminam em desligamentos de clientes, as VTCDs (Variações de Tensão de Curta Duração).

O PRODIST exige que os dispositivos de medição estejam em conformidade com normas específicas, como as ABNT NBR IEC 61000-4-30 (classe A e classe S), que definem os métodos e requisitos para medição de qualidade de energia. Os qualímetros de Classe A são altamente precisos e projetados para atender requisitos do PRODIST, enquanto os de Classe S são mais apropriados para monitoramentos internos de menor precisão, podendo não atender aos critérios que um estudo mais detalhado requer, principalmente quando os problemas estão relacionados com fenômenos de regime transitório, como as variações de tensão de curta duração,

definidas no PRODIST como sendo desvios na amplitude do valor eficaz da tensão em um intervalo inferior a 3 minutos.

A Resolução Normativa da ANEEL nº 956, em seu módulo 5 [8], estabelece que os instrumentos de medição deste tipo de fenômeno devem ser, no mínimo, capazes de registrar demanda ativa e reativa, integralizadas em intervalos de 15 ou 5 minutos em, respectivamente, kW e kvar. Além disso, devem ser dotados de memória de massa, tendo capacidade para armazenar os dados de energia ativa, reativa e tensão, sendo opcional o registro de demanda ativa e reativa.

Atualmente, no mercado, existem diversos analisadores da qualidade da energia elétrica Classe A. Esta classe, entre outros aspectos, é definida por sua maior precisão, mas a maioria destes equipamentos possuem armazenamento limitado para as formas de onda de tensão e corrente e estes registros são iniciados apenas quando o equipamento é sensibilizado, ou seja, há um disparo de um *trigger* pré-programados. A Tabela 1 fará uma comparação entre equipamentos dos mais diversos fabricantes e o equipamento desenvolvido, único equipamento brasileiro com capacidade de registro de forma de onda contínua.

Tabela 1 – Comparação entre Capacidade de Registro de Diferentes Analisadores de Qualidade da Energia.

Equipamento	Capacidade de Registro
Fabricante 01	Registro máximo de 0,33 segundos
Fabricante 02	Registro máximo de 2 segundos
Fabricante 03	Registro máximo de 1,5 segundos
GODEL PQA-900	Registro Contínuo

Para melhor entendimento da comparação realizada entre a capacidade de registro de cada um dos equipamentos supracitados, é possível observar na Figura 1, 2, 3 e 4, como seria a visualização da forma de uma forma de onda de tensão, para um mesmo evento, vista de equipamentos com diferentes capacidades de registro.

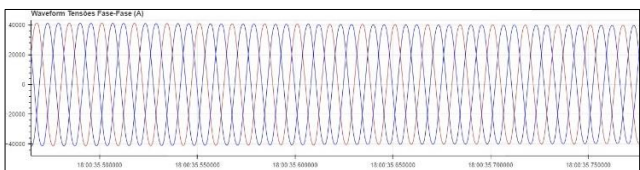


Figura 1 – Registro de oscilografia com 0,33 segundos.

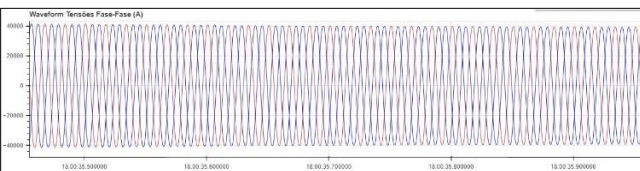


Figura 2 - Registro de oscilografia com 1,5 segundos.

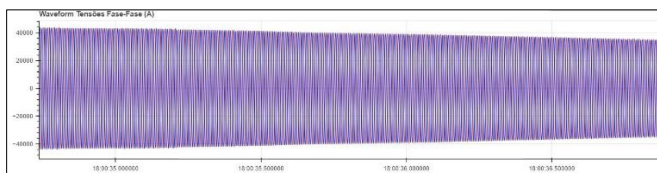


Figura 3 - Registro de oscilografia com 2 segundos.

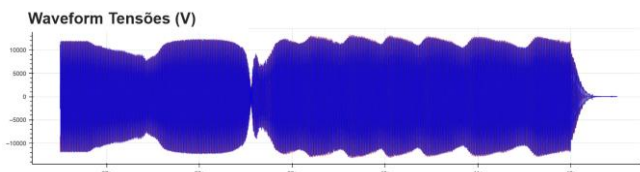


Figura 4 - Registro de oscilografia contínua.

É possível notar que, quanto maior a capacidade de registro, medida em segundos, mais informações estarão contidas na forma de onda, possibilitando uma análise mais completa dos eventos. No entanto, apesar da possibilidade de avaliação mais completa, os três equipamentos apresentados necessitam que um evento ocorra para iniciarem o registro, limitando muitas vezes as possíveis análises e soluções para um problema. Com equipamentos baseados em trigger é comum que algumas reclamações de clientes não sejam registradas.

III. QUALÍMETRO DE OSCILOGRAFIA CONTÍNUA E SEUS BENEFÍCIOS

O desenvolvimento de um equipamento com capacidade para registro de oscilografia contínua proporciona a visualização mais completa das formas de onda de tensão e corrente, viabilizando o acompanhamento em tempo real e em situações que não seriam registradas por outros dispositivos, por não terem atingido os limites necessários para sensibilização e registro das ocorrências. Ou seja, este analisador de qualidade de energia possibilita a avaliação em tempo real da rede, independentemente de haver ou não a sensibilização do equipamento frente aos eventos, possibilitando diagnósticos mais assertivos.

Este equipamento é relevante principalmente para consumidores industriais, frequentemente afetados por problemas de qualidade de energia, sejam estes causados por eventos originados no sistema de distribuição ou por perturbações nas cargas da própria indústria. O registrador de qualidade da energia em questão, mostrado na Figura 5, trata-se do único modelo de analisador da qualidade da energia elétrica classe A [4], que realiza o registro de oscilografia de forma contínua, com 2048 amostras a cada 12 ciclos.



Figura 5 – Foto do Registrador de Qualidade da Energia Elétrica com Oscilografia Contínua.

O registro de oscilografia contínua no equipamento em questão, é possibilitado por um processo de descompressão desenvolvido especificamente para este registrador. O processo envolve a execução de diversas funcionalidades que, além da implementação do algoritmo de compressão, estão relacionadas com o armazenamento, transferência, recuperação dos arquivos e reconstrução. Assim, a unidade computacional responsável pela compressão recebe continuamente as amostras dos sete canais de aquisição do equipamento sendo, três tensões e três correntes das fases, além da corrente de neutro. Os sinais são amostrados com sincronismo, de forma a garantir as 2.048 amostras por 12 ciclos de rede citados anteriormente. Além disso, o equipamento permite observar até a 85ª harmônica.

Muitos são os benefícios oriundos da disponibilização deste tipo de informação tão detalhada. Por isso, a seguir, ao listar os benefícios do equipamento, serão relatados exemplos reais onde ele foi utilizado para observar um evento específico, ou instalado em clientes industriais para acompanhamento de eventos que causavam reclamações de desligamento, mas que não eram identificados pelos registradores de qualidade da energia elétrica comuns. Para estes casos, o registro de oscilografia contínua se mostrou a única maneira eficaz de observar o comportamento da rede que ocasionava problemas aos clientes.

A. Maior Observabilidade

O registro contínuo da forma de onda de corrente, tensão e demais indicadores de Qualidade da Energia, permite que as informações anteriores a ocorrência de um evento e o comportamento do sistema, após reestabelecimento da rede, sejam observadas, facilitando a identificação das causas e compreendendo a dinâmica do sistema antes, após e durante o evento.

Na Figura 6 é possível observar um dos registros realizados pelo equipamento enquanto estava instalado em um cliente. É possível notar também a ocorrência de VTCD com intensidade de 50% e duração de aproximadamente 40 segundos, que ocasionou uma sobrecorrente seguida de um desligamento parcial no cliente e, logo após, a tentativa de partida do motor da fábrica e, na sequência, o desligamento total da instalação. Esta sequência de eventos indicaram que havia um problema nas instalações internas do cliente.

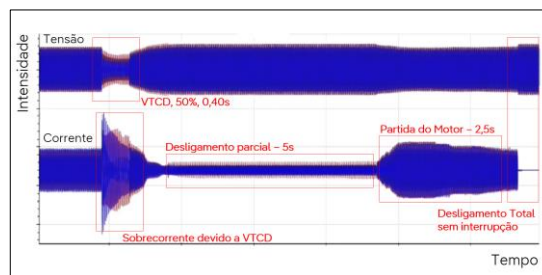


Figura 6 – Evento registrado pelo GODE PQA-900.

B. Maior capacidade para avaliação de eventos sistêmicos

O exemplo da Figura 7, ocorreu em 2023, no dia 15 de agosto às 08h30m38, quando foi registrada uma alteração de frequência, seguida da interrupção de energia. Este evento provocou um apagão em parte do Brasil. Neste momento, uma unidade do novo equipamento estava sendo aplicado para

resolução de caso de qualidade da energia elétrica em um consumidor industrial e conseguiu, do ponto de fornecimento deste consumidor, registrar o evento. A visualização completa da ocorrido só foi possível por conta da capacidade do equipamento de registrar oscilografia contínua, que possibilitou, mesmo antes da atuação da proteção, que o registro de todas as variações ocorridas fosse armazenado e reconstruído posteriormente.

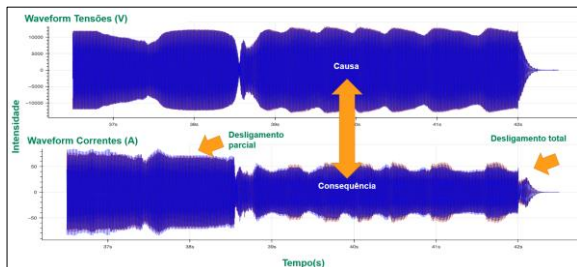


Figura 7 – Forma de onda registrada durante o apagão de 15 de Agosto de 2023, registrado do ponto de fornecimento de um cliente industrial.

C. Melhor identificação da procedência de eventos

Em um dos casos de Qualidade da Energia Elétrica analisados com a utilização do registrador de QEE com oscilografia contínua, foi possível observar que o consumidor industrial, que havia reclamado diversas vezes de interrupção do fornecimento, estava tendo parte de sua carga desligada mesmo sem alterações na forma de onda da tensão fornecida, como pode ser visto na Figura 8. Este registro não poderia ter sido feito por analisadores convencionais que necessitam do disparo de *trigger*. Dessa forma, foi possível concluir que estes desligamentos estavam relacionados às instalações internas da indústria, possibilitando a distribuidora de energia elétrica realizar uma orientação mais assertiva para o cliente em questão.

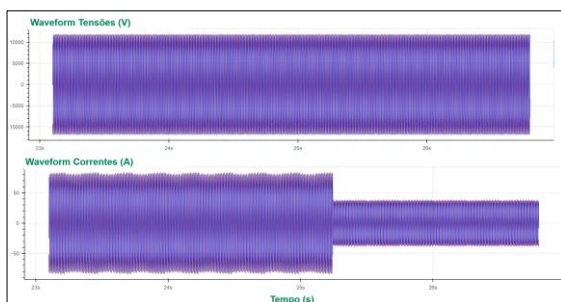
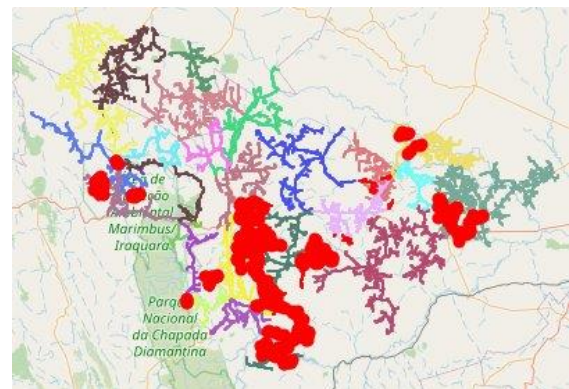


Figura 8 – Evento de desligamento parcial de cliente registrado sem alteração das tensões de fornecimento.

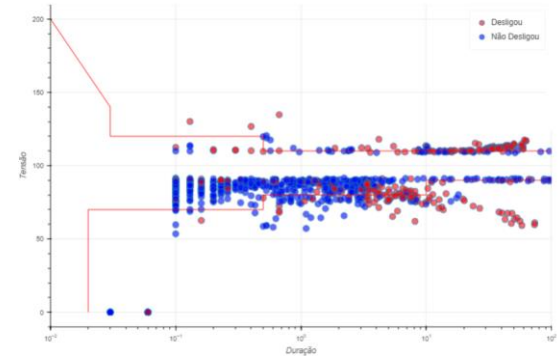
D. Classificação de eventos em função do impacto no cliente e levantamento da área de vulnerabilidade

Os registros obtidos a partir do uso da oscilografia contínua permitem, em conjunto com *software* desenvolvido pela Neoenergia, realizar a identificação e caracterização de eventos que desligam, ou não, os equipamentos de clientes industriais. Como forma de observar o impacto que diversos eventos causam nos clientes, são coletadas as medições de regime permanente das grandezas de correntes, tensões e potências, além de outras grandezas de QEE, entre elas a ocorrência de Variações de Tensão de Curta Duração

(VTCD). Para esta análise, são observados também os dados dos sistemas de proteção e, realizando o cruzamento destas informações, torna-se possível determinar a área de vulnerabilidade [8] de uma instalação industrial frente a um determinado tipo de evento. Esta área será determinada de uma maneira mais precisa, tendo em vista que o equipamento consegue identificar o desligamento de cargas sensíveis para pequenas perturbações sem a necessidade de *trigger*. Na Figura 9 é possível observar uma curva ITIC gerada com estas informações para estratificar os eventos que desligaram ou não um determinado cliente e ainda a sua zona de vulnerabilidade para Variações de Tensão de Curta Duração.



(a) Área de Vulnerabilidade do cliente com a condição original do sistema.



(b) Sensibilidade do cliente frente a VTCDs

Figura 9 – Área de vulnerabilidade do cliente e eventos registrados.

E. Registro completo de Eventos de longa duração devido a inserção de Geração Distribuída

A atual crescente na inserção de Geração Distribuída na rede tem ocasionado alguns eventos, como o mostrado na Figura 10, com assinaturas específicas e que não seriam identificados sem a utilização de um analisador de qualidade com oscilografia contínua. Muitas vezes, por falta de registro estes eventos não têm as suas causas identificadas, dificultando o processo de melhoria que pode ser definido para a rede com o objetivo de mitigar estes problemas.

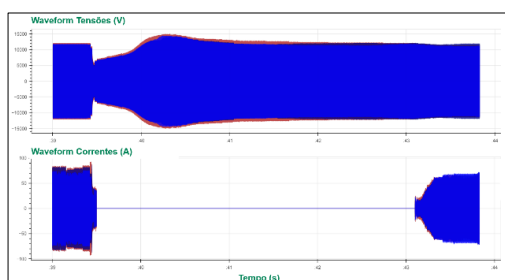


Figura 10 – Exemplo de evento visualizado apenas pelo qualímetro de oscilografia contínua.

IV. ESTUDOS DE CASO E APLICAÇÕES

O equipamento já foi utilizado para a resolução de diversos casos de clientes que apresentavam problemas com Qualidade da Energia Elétrica, além de monitoramento de equipamentos, entre outros testes realizados.

A. Caso I

O primeiro caso em que registrador de QEE foi utilizado se deu devido a reclamações de um cliente conectado ao sistema elétrico na classe de tensão de 13,8 kV e que possuía uma área de influência de 6.565 km, com um total de 35 alimentadores. Neste caso, o equipamento proporcionou dados para desenvolvimento de um método que determinação a área de vulnerabilidade do cliente em estudo para eventos de Variação de Tensão de Curta Duração [9]. Em uma primeira análise realizada, a área determinada foi de 621 km, reduzindo a dimensão de rede em menos de 10% do que foi considerado inicialmente.

Ao realizar simples ações para alteração dos ajustes de proteção na rede da distribuidora e nas instalações do cliente, a área de vulnerabilidade ficou ainda menor, chegando a 185 km, ou seja, 70% menor com relação a primeira análise realizada. Ao utilizar as medições e ter a possibilidade de consultar as formas de onda da rede de maneira contínua foi possível evitar mais de 90% dos desligamentos com ações simples. Além disso, as informações providas pelo qualímetro melhoram a relação entre o cliente e distribuidora, uma vez que as respostas fornecidas ao cliente se mostram cada vez mais rápidas e assertivas.

B. Caso II

O segundo caso no qual o equipamento foi aplicado se deu também em um cliente conectado ao sistema elétrico na classe de tensão de 13,8 kV, mas que possuía uma área de influência de 6.523,11 km. Da mesma forma que no primeiro caso citado, as medições do equipamento forneceram a possibilidade de determinar a área na qual, sob a ocorrência de um defeito, variações de tensão eram percebidas nas instalações do cliente industrial, através de desligamentos totais e parciais. Em seguida, novos ajustes de proteção também foram implementados, reduzindo a área de vulnerabilidade para 577,93 km, cerca de 9% da área inicialmente identificada, como ilustrado na Figura 11. Esta análise fez com que as reclamações do cliente reduzissem significativamente.

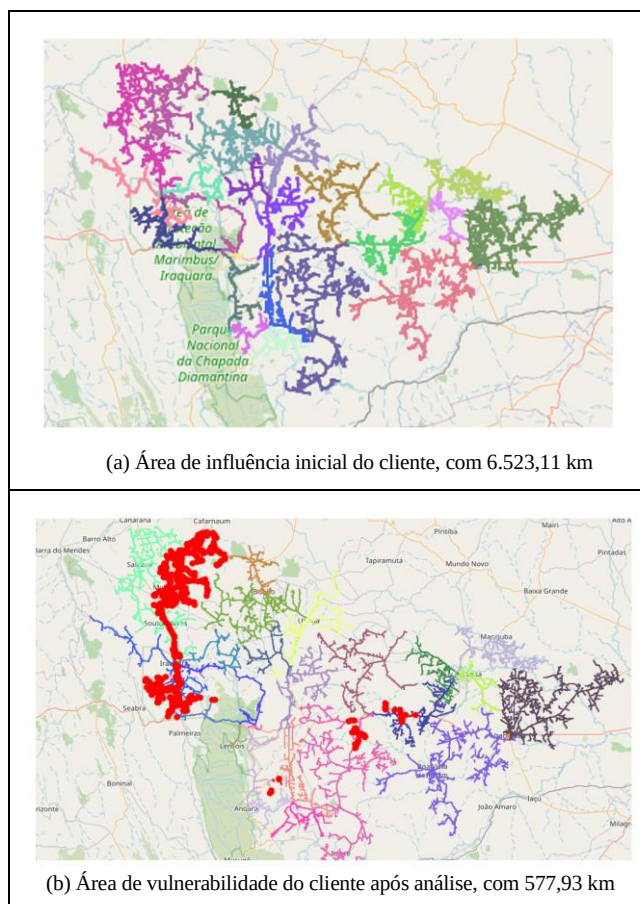


Figura 11 – Área de vulnerabilidade do cliente e eventos registrados.

C. Caso III

Este caso se trata de uma aplicação distinta para o equipamento. Na ocasião o qualímetro foi um dos equipamentos aplicado para realizar medições durante os ensaios do primeiro Reator de Núcleo Saturado aplicado a rede de distribuição em média tensão. Durante os ensaios em laboratório o equipamento performou perfeitamente, coletando amostras 2048 amostras a cada 12 ciclos e mostrando uma precisão muito maior que todos os outros equipamentos utilizados por redundância.

D. Caso IV

Durante uma das etapas do projeto para desenvolvimento do equipamento, uma de suas unidades foi instalada em uma subestação, como forma de realizar testes e compara o produto com outros registradores de qualidade da energia presentes no mercado.

Para realizar uma comparação entre os dados de oscilografia obtidos, foram observados os registros de forma de onda do medidor de Qualidade da Energia de um fabricante D, também instalado no mesmo ponto. O equipamento em questão também realiza registros oscilográficos, porém, sem função de oscilografia contínua. No período em que os equipamentos ficaram instalados houve três oscilografias registradas pelo fabricante D. Os dados obtidos pelos dois equipamentos foram comparados.

A Figura 12 mostra a tela do *software* interno do qualímetro de oscilografia contínua, mostrando a oscilografia original, ainda sem tratamento de dados.

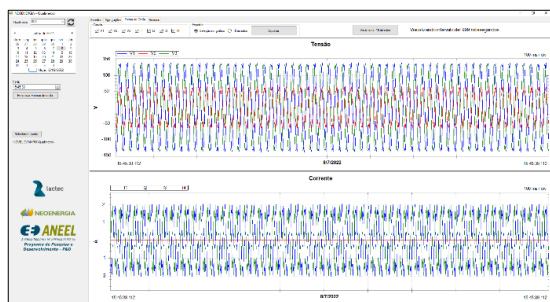


Figura 12 - Tela da oscilografia original obtida na ocorrência 1.

A Figura 13 apresenta a oscilografia obtida do equipamento do fabricante D, utilizado como padrão de comparação.

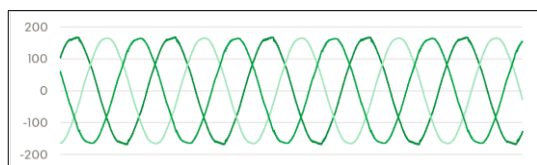
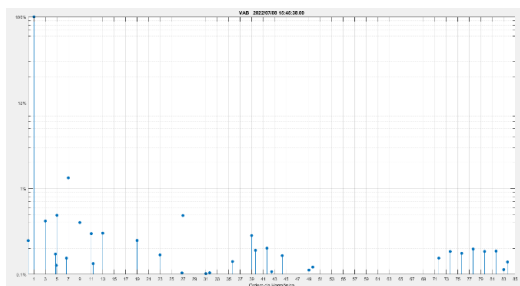


Figura 13 – Oscilografia obtida pelo equipamento do fabricante D.

Realizou-se também uma análise do espectro harmônico de tensão registrados pelo qualímetro de oscilografia contínua em comparação com o equipamento do fabricante D. A Figura 14 apresenta os espectros harmônicos de tensão medidos pelos equipamentos.



(a) Gráfico de espectro harmônico de tensão Vab medido pelo equipamento do fabricante D.



(a) Gráfico de espectro harmônico de tensão Vab medido registrador de QEE com oscilografia contínua.

Figura 14 – Espectros harmônicos de tensão obtida pelo equipamento do fabricante D e pelo qualímetro de oscilografia contínua.

V. CONCLUSÕES

Se comparado com os analisadores de Qualidade da Energia Elétrica disponíveis no mercado brasileiro, é notável o benefício deste equipamento para as distribuidoras de energia elétrica e outras empresas do setor, uma vez que irá contribuir diretamente para a melhoria da qualidade da energia, possibilitando uma tratativa cada vez mais personalizada e eficiente para as reclamações dos consumidores, além de impactar diretamente na redução de custos associados com a resolução de reclamações.

Dessa forma, atualmente, o GODEL PQA-900 se mostra um equipamento cada vez mais necessário para o monitoramento de redes, subestações e pontos de suprimento de clientes, principalmente os industriais, possibilitando o registro e acompanhamento de fenômenos oriundos das mudanças que vem ocorrendo no setor, principalmente pela inserção dos recursos energéticos distribuídos. Este equipamento tem demonstrado resultados extremamente positivos, com diversas unidades em operação na área de concessão da Neoenergia, tanto na assertividade das informações passadas para os clientes, quanto na economia direta de tempo e recursos que traz para cada uma das análises realizadas.

REFERENCES

- [1] ANEEL, Procedimentos de Distribuição. "Módulo 8–qualidade da energia elétrica." Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL (2021).
- [2] ANEEL, Resolução Normativa ANEEL N° 1.001, de 18 de Janeiro de 2022 (2022).
- [3] IEEE, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, in IEEE Std 1159-2019 (2019).
- [4] IEC, International electrotechnical commission et al. IEC 61000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurement techniques-Power quality measurement methods. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland (2015).
- [5] IEEE, IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems," in IEEE Std 1250-2018 (2018)
- [6] IEEE, IEEE Guide for Voltage Sag Indices. IEEE Std. 1564-2014, (2014).
- [7] IEA, International Energy Agency Electricity 2024 – Analysis and forecast to 2026 (2024).
- [8] ANEEL, Procedimentos de Distribuição. "Módulo 5–Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura." Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL (2021).
- [9] DUGAN, Roger C., et al. "Electric power systems quality." (2004)