

## Metodologia Para Análise Operacional De Transformadores De Potência

Samuel Lessinger\* Rodrigo Marques de Figueiredo\*\*  
Lúcio Renê Prade\*\*\* Alzenira da Rosa Abaide\*\*\*\*

\* CEEESP, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: samuelessinger@gmail.com).

\*\* Faculdade de Engenharia de Controle & Automação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, RS (e-mail: marquesf@unisinos.br)

\*\*\* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, RS, (e-mail: luciorp@unisinos.br)

\*\*\*\* CEEESP, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: alzenira@ufsm.br)

**Abstract:** Operational conditions of power transformers are fundamental for the correct and safe operation of the electric power system. This article proposes a methodology that makes use of data science to provide indicators of the condition of the equipment and the need for preventive maintenance. The work evaluated data from a park of real transformers demonstrating the applicability of the method in the identification of critical operating conditions.

**Resumo:** As condições operacionais dos transformadores de potência são fundamentais para o seguro funcionamento do sistema elétrico de potência. Este artigo propõe uma metodologia de ciência de dados para fornecer indicadores da condição operacional de equipamentos e a necessidade de manutenção preventiva. O trabalho avaliou dados de um parque de transformadores reais demonstrando a aplicabilidade do método na identificação de críticas condições de funcionamento.

**Keywords:** Power Transformers; Operational Condition; Load Profile; Statistical Analysis; Data Science Analysis.

**Palavras-chaves:** Transformadores de Potência; Operação; Perfil de Carga; Análise Estatística; Ciência de Dados.

### 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) representa o conjunto de elementos como usinas geradoras de eletricidade, linhas de transmissão, subestações de energia elétrica com seus variados equipamentos incluindo transformadores de força, chaves seccionadoras e disjuntores.

Neste cenário de grande integração, as subestações de transmissão passam a ter uma grande responsabilidade na operação confiável do sistema de potência em especial no que tange a operação segura dos transformadores de força, sendo um dos elementos mais críticos (Lessinger and Figueiredo, 2019), (Schmitz et al., 2018), (Vianna et al., 2017).

Para contextualizar essa importância, bem como a necessidade de desenvolver novas técnicas, cita-se a ocorrência de falha de transformador de potência que afetou severamente o estado do Amapá, no norte do Brasil. Em 03/11/2020 um transformador da subestação da capital Macapá falhou, ocasionando um *blackout* geral no estado (OMS, 2020) (Globo, 2020) (BBC, 2020). Observa-se na Figura 1 o registro fotográfico.

As principais conclusões apontam que a perturbação teve origem em um curto-circuito no transformador, como



Figura 1. Falha do transformador de potência em Macapá.

consequência de possível falha interna do equipamento OMS (2020).

O transformador danificado possuía características de 230/69/13,8 kV - 150 MVA sendo responsável por metade da carga no estado do Amapá. Um sistema de rodízio de cargas foi instalado, juntamente com acionamento de unidades geradoras termoelétricas a diesel com 24,28 MW de potência instalada para mitigar o problema (ONS, 2020d), (ONS, 2020b), (ONS, 2020a), (ANEEL, 2020a).

Apenas em 24/11/2020 com um transformador substituído originado da subestação do Laranjal foi restabelecido o fornecimento normal de energia elétrica na região (ONS, 2020d), (ONS, 2020b), (ONS, 2020a). A fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) multou a concessionária em R\$ 3,6 milhões em razão da interrupção de energia ocorrida (ANEEL, 2020b).

Esse fato ilustra a necessidade de pesquisas na área de manutenção preditiva aplicada a transformadores de potência, visto que no Brasil, no período entre 2021-2025, existe a previsão de um crescimento médio da carga de 3,6% por ano. Estima-se uma carga média de 79600 MW em 2025 (ONS, 2020c).

Após essa introdução, a sessão de trabalhos correlatos indicará trabalhos com aspectos próximos aos desenvolvidos. Na sequência os tópicos de sistema proposto, implementação, resultados e conclusões.

## 2. ESTUDOS CORRELATOS

Estudos anteriores exploraram aspectos correlatos ao trabalho aqui proposto, mas ainda deixam possibilidades de novos desenvolvimentos. Em (Lessinger and Figueiredo, 2019) uma metodologia de análise de séries históricas de dados de operação é desenvolvida, considerando o perfil de carga do transformador de potência e suas relações climáticas.

Em (Schmitz et al., 2018) um indicador de vulnerabilidade operacional para priorização de substituição de transformadores é criado, complementando-se a metodologia convencional do *Health Index*. Já em (Vianna et al., 2017) um sistema que utiliza lógica fuzzy no contexto de priorização da manutenção de disjuntores a Gás SF6 presentes em subestações é desenvolvido.

Neste trabalho uma nova metodologia de análise de dados históricos de operação é desenvolvida, ampliando a capacidade de correlação de dados e melhorando a criação de perfis diários de carga.

## 3. METODOLOGIA

Uma análise de dados é específica e baseada no conjunto de vetores armazenados em servidores, tradicionalmente em ambiente distribuído. Diferentes tipos de dados são armazenados com específicas amostragens para suas necessidades. Uma análise deve considerar a necessidade de sincronismo dos dados para não existir conclusões equivocadas. A metodologia proposta é exibida na Figura 2.

Empregando os dados de operação armazenados em servidores, uma análise de consistência é realizada, na qual se deve impedir que os valores vazios ou as sequências repetidas sejam tratados. Após a análise de consistência, uma etapa de sincronismo e alinhamento de vetores é

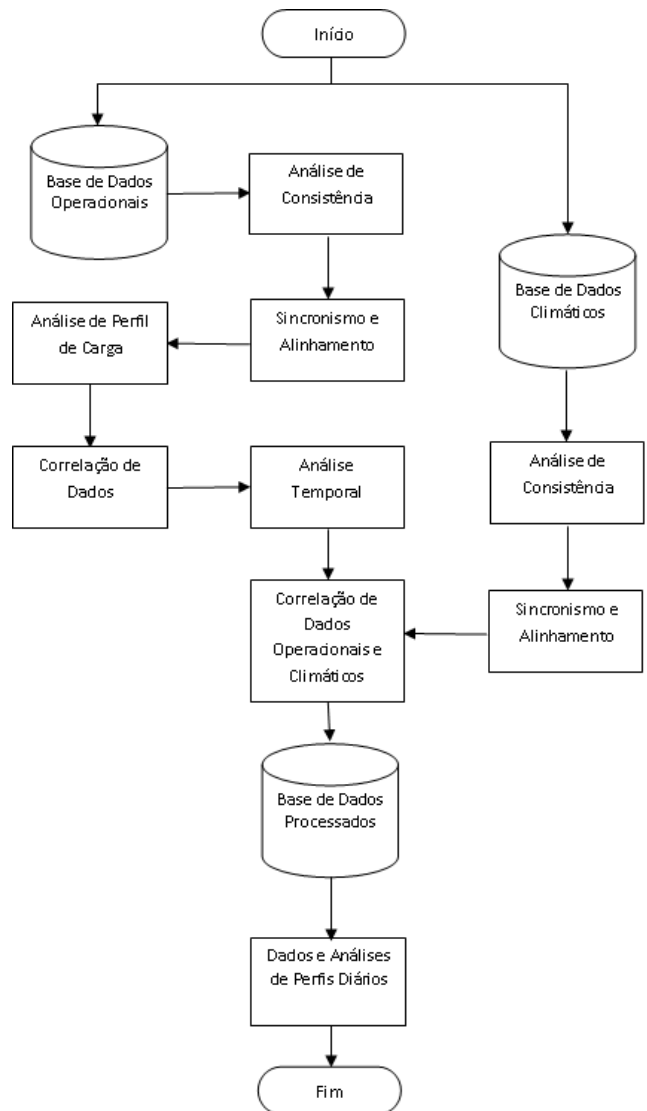


Figura 2. Metodologia Proposta.

necessária, para garantir amostragem síncronas. Correlações entre grandezas elétricas e perfis de carga parciais já podem ser extraídos nesta etapa parcial.

Os vetores pré-processados são correlacionados com dados climáticos, oriundos de base de dados específica. O procedimento de análise de consistência e sincronismo é também realizado. A correlação com dados climáticos, juntamente com a extração do perfil de carga, permitem avaliar a existência de influências externas nas condições de operação do transformador. Essas análise podem contribuir com o procedimento de manutenção preditiva do transformador.

## 4. IMPLEMENTAÇÃO

A atual implementação é baseada na importação dos dados de operação elétricos do transformador em análise, conforme metodologia anterior. Os sistemas tradicionais de aquisição de dados apenas amostram dados de leitura, sua análise nem sempre é automatizada ou periodicamente realizada.

Vetores de dados com medidas de potência elétrica, tensão no primário e secundário do transformador, correntes,

temperatura do óleo e *tap* atual foram adquiridos em intervalos de 15 minutos. Um total de 17639 registros capturados entre às 00:00 de 07/01/2013 até às 23:45 de 31/12/2013 foram adquiridos.

*Python* é uma linguagem de uso geral que ganhou destaque em anos recentes (Python, 2021). *Pandas* é uma biblioteca *Open Source* que proporciona estrutura e análise de dados (Pandas, 2021). *Matplotlib* consiste em uma biblioteca para criação de gráficos em alta qualidade (Matplotlib, 2021).

Na solução proposta um *script* em linguagem *Python*, realiza a importação dos dados com uso da biblioteca *Pandas*. O método *read\_excel* importa os dados e cria uma estrutura tabular, sua organização é facilmente modificada com uma da linguagem *Python*. Operações matemáticas são realizadas com a biblioteca *Numpy* e a biblioteca *Matplotlib* é utilizada para criar uma visualização dos dados ao usuário.

Baseados na metodologia aplicada, específicos conjuntos de variáveis podem ser manipulados e exibidos, criando-se análises em períodos de tempo específicos.

## 5. RESULTADOS

O conjunto de dados adquiridos possibilita visualizar o comportamento das variáveis de operação do transformador em funcionamento normal. Neste trabalho, obteve-se vetores de dados em um transformador de potência trifásico, com 25 MVA de potência nominal, tensão de primário de 230 kv, secundário em 23 kv. Sabe-se que o equipamento está na região de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Sua carga possui perfil predominantemente industrial.

Na Figura 3 apresenta a curva de potência aparente consumida do transformador no período. Na Figura 4 a temperatura do óleo do transformador é apresentada, nota-se que em ambas as figuras existem falhas na aquisição dos dados. Uma limitação nos sistemas atuais é a incapacidade de gerar alertas de operação, no caso de problemas na instrumentação de campo.

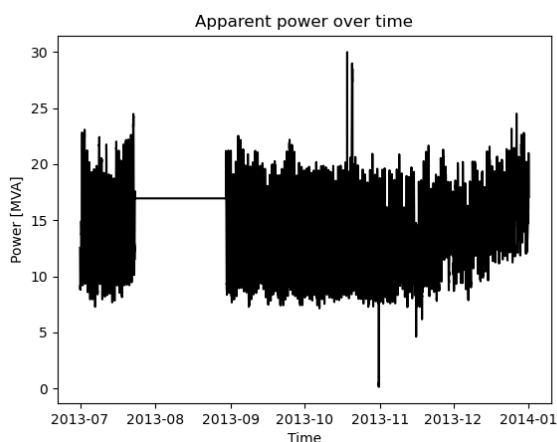


Figura 3. Potência aparente no período.

Observa-se na Figura 5 a curva de temperatura ambiente no período, os vetores de dados climáticos, são disponibili-

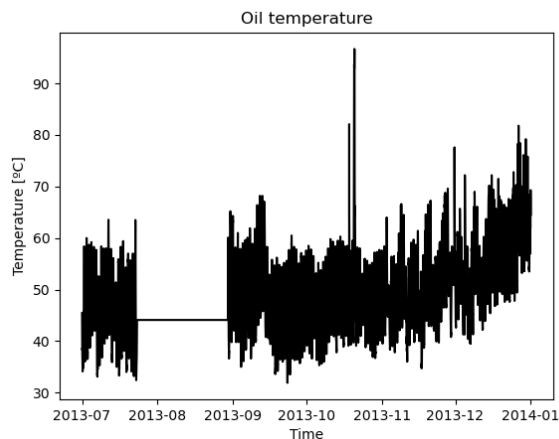


Figura 4. Temperatura do óleo no período.

zados em período horário, contabilizando 4416 aquisições no período Inmet (2021).

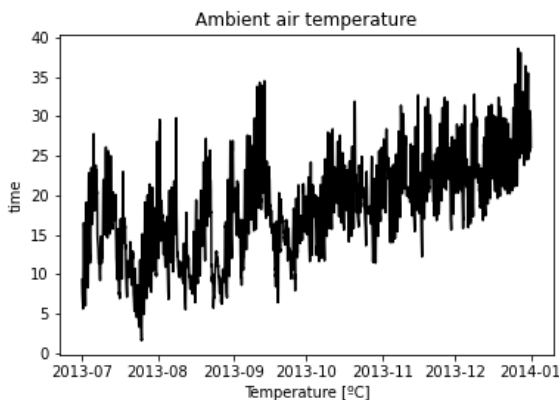


Figura 5. Temperatura ambiente no período.

A discrepância entre os dados precisa ser corrigida para as análises seguintes, uma vez que, a falha na instrumentação de campo reduz a disponibilidade de dados. Assim, os 17639 registros originais são reduzidos para 13965. O sincronismo horário entre os vetores meteorológicos e os vetores elétricos de operação resultam em 3488 registros síncronos válidos. A dispersão entre a temperatura do óleo do transformador e a temperatura ambiente externa é visualizada na Figura 6.

Informações gerais sobre o carregamento do transformador são obtidas com base nas correlações entre a tensão de saída e a corrente de saída, como observada na Figura 7. O agrupamento dos dados informa que as condições gerais de operação são adequadas, uma vez que, a tensão de saída mantém-se na maior parte das amostragens dentro do limite de 23 kv.

Na Figura 8 observa-se a relação entre o tensão de saída e a temperatura do óleo do transformador, no período de amostragens disponível. Novamente o agrupamento das medidas indica uma condição de operação adequada, pois o nível de tensão é mantido no patamar necessário.

Uma relação entre a temperatura de óleo do transformador e sua corrente de saída pode ser observada na Figura 9,

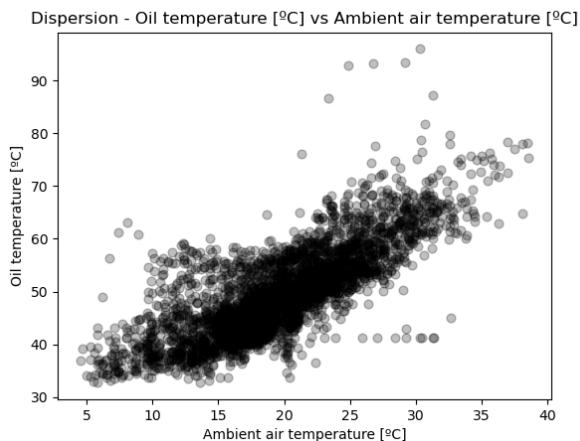


Figura 6. Dispersão entre temperatura ambiente e do óleo.

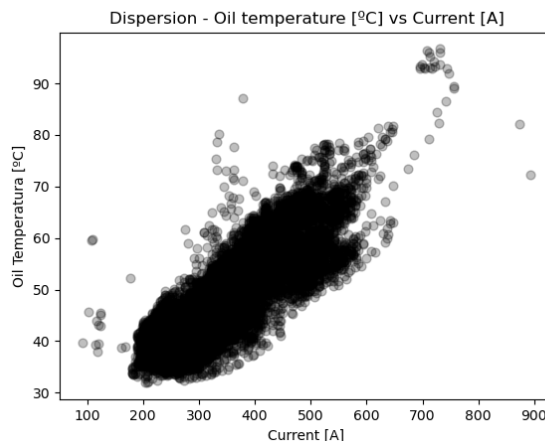


Figura 9. Dispersão entre corrente no secundário e temperatura do óleo.

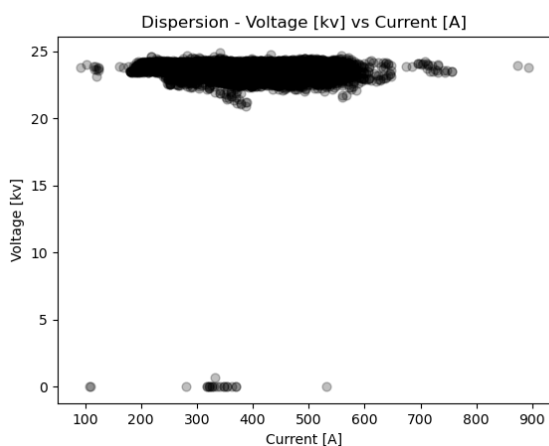


Figura 7. Dispersão entre corrente e tensão no secundário.

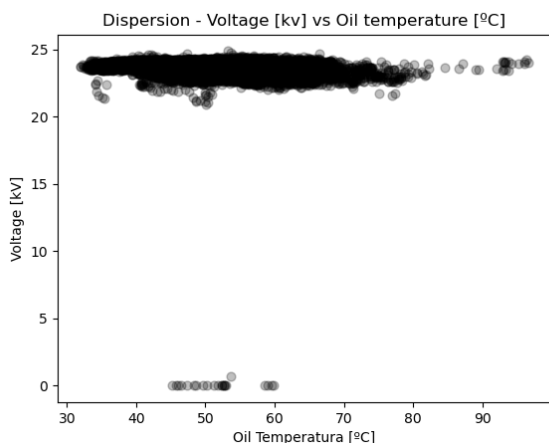


Figura 8. Dispersão entre tensão no secundário e temperatura do óleo.

onde uma relação de dependência entre as duas grandezas é indicada.

Dispondo de dados amostrados, pode-se expandir as correlações criadas para análise de mais variáveis simultâneas. Na Figura 10 a relação entre a temperatura ambiente,

corrente de saída do transformador e temperatura do óleo é exibida, criando-se um espaço de operação.

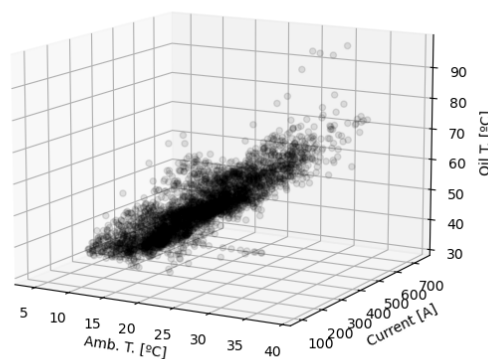


Figura 10. Dispersão entre temperatura do óleo, temperatura ambiente e corrente no secundário.

Com refino das informações, um plano de operação pode ser definido para o transformador em análise. Um conceito similar é aplicado ao considerar os dados medidos de tensão de saída, corrente de saída e temperatura do óleo do transformador, criando-se a correlação visualizada na Figura 11.

Na visualização apresentada na Figura 11 observa-se a concentração de valores no plano da tensão de saída, próximo ao valor nominal de 23 kv para o transformador em uso. A relação de dependência entre temperatura do óleo do transformador e corrente de saída é visualizada.

Um importante componente presente em transformadores de potência são os *taps*. Eles permitem adequar níveis de tensão ao longo da operação do transformador, considerando o perfil de carga no momento. Com base nos registros disponíveis, pode-se criar o histograma de utilização dos *taps* do transformador. Na Figura 12 apresenta-se o histograma no período em avaliação.

Na Figura 13 a relação entre a temperatura do óleo do transformador com o *tap* em uso é visualizada. Nota-

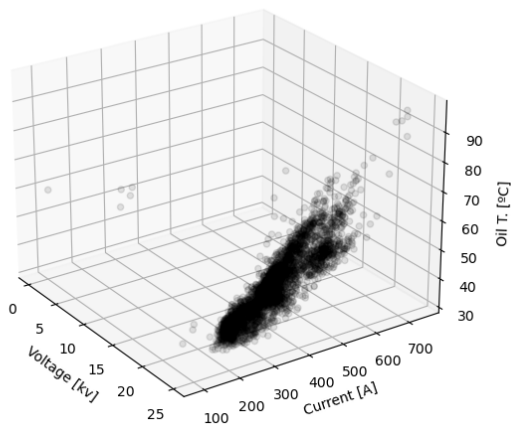


Figura 11. Dispersão entre temperatura do óleo, corrente e tensão no secundário.

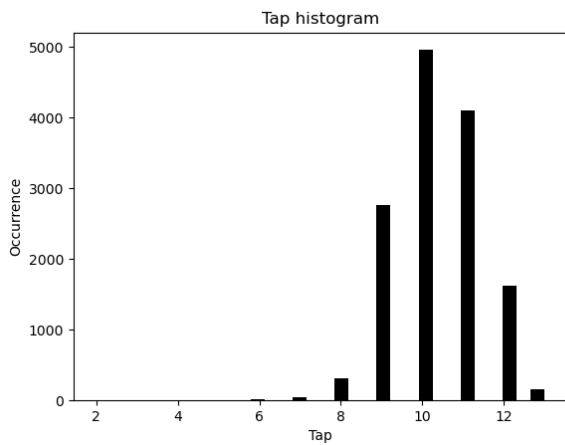


Figura 12. Histograma da posição dos taps.

se uma ampla faixa de temperaturas para cada *tap* em operação, mas os dados ficam concentrados entre os taps 9 até 12.

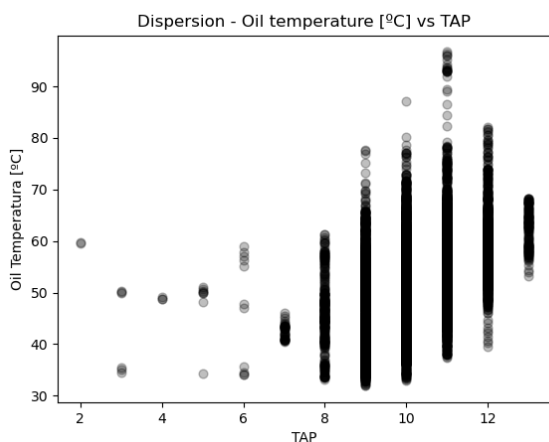


Figura 13. Dispersão entre taps e temperatura do óleo.

A correlação entre a tensão de saída do transformador e o *tap* em uso é visualizado na Figura 14. As tensões de saída

estão distribuídas entre os *taps* em operação, de maneira homogênea.

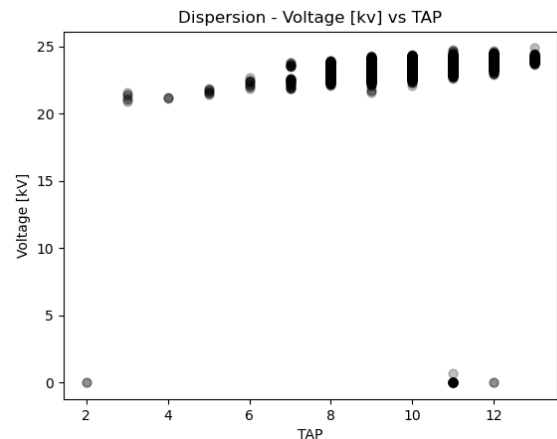


Figura 14. Dispersão entre taps e tensão no secundário.

Para os *taps*, novamente um espaço de operação pode ser criado, considerando-se a disponibilidade de medidas e suas correlações. Na Figura 15 observa-se as relações entre a corrente de saída do transformador, sua tensão de operação e o respectivo *tap* de operação.

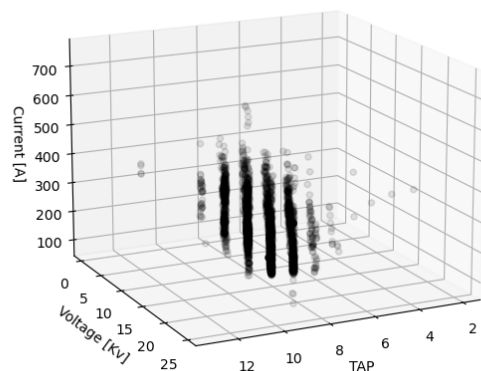


Figura 15. Dispersão entre corrente no secundário, taps e tensão de secundário.

As relações exibidas na Figura 15 apresentam pontos de operação do transformador em estudo no período de avaliação considerado.

Pode-se extrair as operações de comutação de *taps*, ao longo do período de avaliação, com possibilidade de verificar a quantidade de comutações realizadas. Esta informação contribui para a previsão da manutenção do transformador, ao possibilitar desenvolver uma futura técnica de manutenção. Na tabela 1 a extração de comutações no período, separados por dias da semana é indicada.

A metodologia desenvolvida possibilita a criação de perfis de operação para o transformador em avaliação, contribuindo com o planejamento de atividades de manutenção preventiva. Próximos passos incluem a criação de uma plataforma mais amigável para os usuários utilizarem o sistema.

Tabela 1. Comutações dos taps.

Dia	Comutações
Segunda-feira	210
Terça-feira	155
Quarta-feira	150
Quinta-feira	151
Sexta-feira	168
Sábado	142
Domingo	147
Total	1123

## 6. CONCLUSÃO

A correlação de dados permite conhecer o comportamento de variáveis e suas relações com outros fatores de influência. O uso de tecnologias de aquisição remota de dados, ganha cada vez mais espaço na operação e manutenção de sistemas de potência, uma vez que, novas tecnologia facilitam conexão em áreas remotas. Com grandes massas de dados arquivados, técnicas de análise de dados permitem descobrir correlações entre eventos.

Com dados mais acurados da construção do transformador, pode-se transpor as análises. Assim verifica-se se as condições de operação violam os limites seguros de funcionamento. Tais correlações permitiram criar um sistema preditivo, indicando-se o desgaste interno de seus elementos.

As análises são restritas a disponibilidade de registros, mas a metodologia permite verificação do comportamento atual do transformador. O uso de ferramentas livres como Python garante fácil aplicação do método nos centros de operação e planejamento das companhias, o processo de manutenção preditiva ganha uma nova ferramenta de implementação.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL (2020a). ANEEL autoriza operação de duas usinas termelétricas para abastecer o Amapá. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-autoriza-operacao-de-duas-usinas-termeletricas-para-abastecer-o-amapa/656877?](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-autoriza-operacao-de-duas-usinas-termeletricas-para-abastecer-o-amapa/656877?) - Acesso em: 15/12/2020.
- ANEEL (2020b). Fiscalização da ANEEL aplica multa de R\$ 3,6 milhões na LMTE por ocorrência no Amapá. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset\\_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/fiscalizacao-da-aneel-aplica-multa-de-r-3-6-milhoes-na-lmte-por-ocorrencia-no-amapa/656877?](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/fiscalizacao-da-aneel-aplica-multa-de-r-3-6-milhoes-na-lmte-por-ocorrencia-no-amapa/656877?) - Acesso em: 15/12/2020.
- BBC (2020). Apagão no Amapá: o que provocou queda de energia que leva sede e caos ao Estado. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-54843654> - Acesso em: 03/12/2020.
- Globo (2020). Um mês do apagão no Amapá: o que ainda precisa para a segurança energética? Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/12/03/um-mes-do-apagao-no-amapa-o-que-ainda-precisa-para-a-seguranca-energetica.ghtml> - Acesso em: 07/12/2020.
- Inmet (2021). Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/> - Acesso em: 05/02/2021.
- Lessinger, S. and Figueiredo, R.M. (2019). Statistical load profile analysis with python. *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*. doi:10.1109/ISGT-LA.2019.8895447.
- Matplotlib (2021). Matplotlib: Visualization with Python. Disponível em: <https://matplotlib.org/> - Acesso em: 12/02/2021.
- OMS (2020). ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO DO DIA 03/11/2020 ÀS 20H48MIN COM INÍCIO NOS TRANSFORMADORES DE 230/69/13,8 kV DA SE MACAPÁ, COM DESLIGAMENTO DA UHE COARACY NUNES E DO SISTEMA AMAPÁ. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20201207-ons-divulga-rap-ocorrencia-amapa.aspx> Acesso em: 15/12/2020.
- ONS (2020a). NOTA 2 - Ocorrência no Estado do Amapá - 03.11.2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/Nota-2-%E2%80%93-Ocorr%C3%Aancia-no-Estado-do-Amap%C3%A1-%E2%80%93-03-11-2020.aspx> - Acesso em: 07/12/2020.
- ONS (2020b). Ocorrência no Estado do Amapá - 03.11.2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/Ocorrencia-no-Estado-do-Amapa-03.11.2020.aspx> - Acesso em: 07/12/2020.
- ONS (2020c). ONS, CCEE e EPE divulgam projeção de carga para o período de 2021 a 2025. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/ONS,-CCEE-e-EPE-divulgam-projecao-de-carga-para-o-periodo-de-2021-a-2025.aspx> - Acesso em: 10/12/2020.
- ONS (2020d). Operação do segundo transformador da SE Macapá. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/Operacao-do-segundo-transformador-da-SE-Macapá.aspx> - Acesso em: 07/12/2020.
- Pandas (2021). Data Structures for Statistical Computing in Python. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/> - Acesso em: 12/02/2021.
- Python (2021). Python Programming Language. Disponível em: <https://www.python.org/> - Acesso em: 10/02/2021.
- Schmitz, W.I., Feil, D.L.P., Canha, L.N., Abaide, A.R., Marchesan, T.B., and Carraro, R. (2018). Operational vulnerability indicator for prioritization and replacement of power transformers in substation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.04.012.
- Vianna, E.A.L., Abaide, A.R., Canha, L.N., and Miranda, V. (2017). Substations sf6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition. *Electric Power Systems Research*. doi:10.1016/j.epsr.2016.08.018.