

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE FERRAMENTA ESTATÍSTICA PARA ANÁLISE DE FLUXO INVERSO

*DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A STATISTICAL TOOL FOR REVERSE FLOW
ANALYSIS*

*DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UNA HERRAMIENTA ESTADÍSTICA PARA EL ANÁLISIS
DE FLUJO INVERSO*

Nathan Coelho da Silva¹
Ederson Carvalhar Fernandes²

Resumo

Nos últimos anos o crescimento exponencial, da micro e minigeração distribuída, impôs às concessionárias de energia elétrica o desafio da inversão do fluxo de potência em suas redes. Esse fenômeno ocorre quando a quantidade de energia elétrica injetada, oriunda da geração distribuída, excede a demanda dos consumidores conectados à mesma rede. Para enfrentar esse cenário, a ANEEL reformulou algumas normativas, culminando na resolução nº 1000 de 7 de dezembro de 2021, especificamente no artigo 73º, que detalha os deveres e condições para a avaliação do fluxo inverso. Uma concessionária de energia no Rio Grande do Sul necessita de uma ferramenta robusta para auxiliar na análise e na tomada de decisão sobre a presença de potência inversa no sistema de distribuição. Esse projeto propõe desenvolver uma metodologia e ferramenta, com fundamentos estatísticos, para analisar centenas de amostras de dados de potência elétrica dos disjuntores e transformadores das subestações, além de abranger as linhas de pesquisa em engenharia de métodos, modelagem de dados, programação matemática, processos decisórios e inteligência computacional. Para a implementação foi utilizada a linguagem de programação *R Script*, integrada ao *Power BI*, unindo a capacidade analítica do R com a interface interativa do *Power BI*. Essa aplicação é capaz de traçar a distribuição das faixas de potência, a frequência de ocorrência, o valor mínimo encontrado e analisar uma série temporal de todos os valores de potência registrados, além de gerar uma melhoria significativa no índice de produtividade, proporcionando uma maior argumentação técnica nas decisões operacionais.

Palavras-chave: REN 1000; Artigo 73; *R Script*, geração distribuída, estatística, fluxo inverso.

Abstract

In recent years, the exponential growth of micro and mini distributed generation has posed a challenge for electric utilities: the reversal of power flow in their networks. This phenomenon occurs when the amount of injected electricity from distributed generation exceeds the demand of consumers connected to the same grid. To address this scenario, ANEEL revised certain regulations, culminating in Resolution No. 1000 of December 7, 2021, specifically Article 73, which details the duties and conditions for evaluating reverse flow. An energy utility in Rio Grande do Sul requires a robust tool to assist in analyzing and making decisions regarding the presence of reverse power in the distribution system. This project proposes the development of a methodology and tool, based on statistical principles, to analyze hundreds of power data samples from circuit breakers and transformers in substations, while also encompassing research areas such as methods engineering, data modeling, mathematical programming, decision-making processes, and computational intelligence. For implementation, the *R Script* programming language was used, integrated with Power BI, combining R's analytical capabilities with Power BI's interactive interface. This application can map the distribution of power ranges, frequency of occurrence, minimum values found, and analyze a time series of all recorded power values, in addition to significantly improving productivity indexes and providing stronger technical arguments for operational decisions.

Keywords: REN 1000; Article 73; *R Script*; distributed generation; statistics; reverse flow.

¹ Bacharelado em Engenharia de Produção e Tecnólogo em Gestão da Produção Industrial

² Doutor e Mestre em engenharia mecânica, Engenheiro Mecânico e Tecnólogo em Gestão de Manufatura

Resumen

En los últimos años, el crecimiento exponencial de la micro y mini generación distribuida ha impuesto a las concesionarias de energía eléctrica el desafío de la inversión del flujo de potencia en sus redes. Este fenómeno ocurre cuando la cantidad de energía eléctrica inyectada, proveniente de la generación distribuida, excede la demanda de los consumidores conectados a la misma red. Para enfrentar este escenario, ANEEL reformuló algunas normativas, culminando en la Resolución N° 1000 del 7 de diciembre de 2021, específicamente en el artículo 73, que detalla los deberes y condiciones para la evaluación del flujo inverso. Una concesionaria de energía en Rio Grande do Sul necesita una herramienta robusta para ayudar en el análisis y la toma de decisiones sobre la presencia de potencia inversa en el sistema de distribución. Este proyecto propone desarrollar una metodología y herramienta, con fundamentos estadísticos, para analizar cientos de muestras de datos de potencia eléctrica de los disyuntores y transformadores de las subestaciones, además de abarcar las líneas de investigación en ingeniería de métodos, modelado de datos, programación matemática, procesos de decisión e inteligencia computacional. Para la implementación se utilizó el lenguaje de programación R Script, integrado con Power BI, uniendo la capacidad analítica de R con la interfaz interactiva de Power BI. Esta aplicación es capaz de trazar la distribución de los rangos de potencia, la frecuencia de ocurrencia, el valor mínimo encontrado y analizar una serie temporal de todos los valores de potencia registrados, además de generar una mejora significativa en el índice de productividad, proporcionando una mayor argumentación técnica en las decisiones operativas.

Palabras clave: REN 1000; Artículo 73; R Script; generación distribuida; estadística; flujo inverso.

1 Introdução

A análise de inversão de fluxo de potência, em sistemas de redes de distribuição, tem sido, para as concessionárias de energia, nos últimos três anos, um fator predominante para novas conexões de geração distribuída em suas redes. Segundo os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (2024), é previsto um crescimento de quase 10,1 GW ao ano, indicando um forte aumento na geração distribuída solar.

Com a entrada em vigor da nova resolução normativa, foi necessário alterar etapas do processo de um setor, denominado Viabilidade da concessionária de energia no Rio Grande do Sul. A mudança visou corrigir a falta de uniformidade nas avaliações, que gerava tarefas manuais suscetíveis a erros. Diante da situação descrita, padronizar a pesquisa de informações em uma única plataforma e realizar uma análise estatística dos valores encontrados, pode realmente auxiliar na padronização e reduzir o tempo médio de atendimento de análises?

Assim, o objetivo da pesquisa é desenvolver uma ferramenta que leia amostras de potência, crie séries temporais, identifique valores mínimos, distribua as faixas de potência e analise sua frequência, melhorando a gestão de dados pelo técnico responsável.

Para o alcance desse projeto, os objetivos específicos da pesquisa são: 1) Identificar falhas e desvios na obtenção das amostras de dados; 2) Avaliar a metodologia de consulta e emissão dos pareceres dados pelos engenheiros; 3) Comparar a capacidade e expertise entre os engenheiros na

execução da análise de fluxo inverso; e 4) Avaliar a performance da ferramenta proposta, para identificar ajustes e novos parâmetros de atualizações futuras.

Esse mesmo conceito de análise e ferramenta pode ser aplicado em quaisquer outros segmentos da indústria para auxiliar na tomada de decisões, criando dados estruturados e padronizando formas de análises. Reitero que a problemática do estudo não está baseada na resolução do fluxo inverso, mas sim na criação de uma ferramenta que auxilie na padronização de um processo interno de uma concessionária de energia.

2 Conceitos e ferramentas para análise de fluxo inverso

O entendimento do papel de um sistema de geração distribuída (GD) pode parecer complexo, mas nesta seção serão abordados os conceitos fundamentais, o fluxo inverso resultante desse sistema e algumas ferramentas estatísticas relacionadas.

2.1 Geração distribuída

Refere-se a consumidores que instalam seus próprios geradores de energia na rede de distribuição, segundo Souza, Alvez e Moura (2024). A GD tem duas abordagens principais: reserva de energia, que melhora parâmetros como frequência e tensão em áreas com deficiências, e fonte de energia, que supre cargas conectadas e pode exportar excedentes para a rede (CEMIG, 2012). A legislação brasileira define a geração distribuída como:

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento: I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004. Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustíveis não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput." (BRASIL. Decreto nº 5.163/2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências (Brasil, 2004).

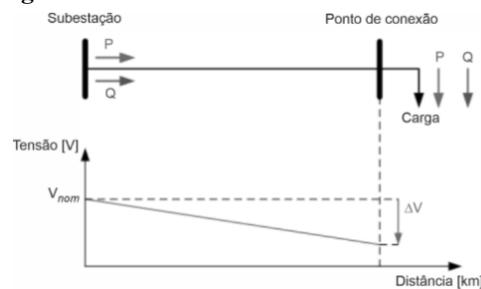
As gerações distribuídas são divididas em dois grupos pela potência instalada: microgeração e minigeração distribuída, de acordo com a resolução 1059, artigo 238. A microgeração é uma central com potência de até 75 kW, utilizando cogeração qualificada ou fontes

renováveis, conectada à rede de distribuição por unidades consumidoras. A minigeração é uma central com potência de 75 kW a 5 MW, também conectada à rede e utilizando cogeração qualificada ou fontes renováveis, conforme regulamentação da ANEEL.

2.2 Fluxo inverso

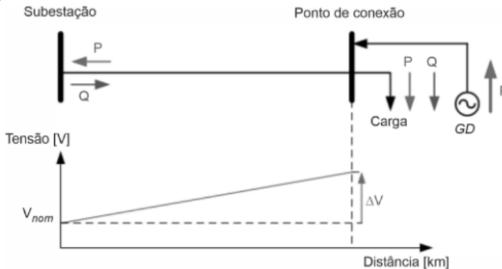
Conceitualmente o fluxo de potência ativa (P) e potência reativa (Q) tem o caminho elétrico através das grandes usinas geradoras, linhas de transmissão, redes de distribuição até os consumidores, conforme mostrado na Figura 1, em que a tensão diminui com a distância da subestação. Com o aumento da geração distribuída, especialmente de sistemas fotovoltaicos, a inversão do fluxo de potência é cada vez mais comum. Os painéis solares em residências e empresas podem gerar energia, e o excedente de potência ativa (P) gerado é injetado na rede de distribuição, provocando fluxo reverso, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 1: Sistema elétrica convencional sem GD



Fonte: Souza, Alvez e Moura (2024).

Figura 2: Sistema elétrico com GD e inversão de fluxo



Fonte: Souza, Alvez e Moura (2024).

A presença desse fenômeno vem acompanhado com o aumento de tensão nos pontos de conexão mudando o perfil de tensão para um ΔV positivo, conceituado por Souza, Alvez e Moura (2024).

2.3 Estatística como ferramenta de análise

O conceito de estatística está ligado a ciência que se preocupa com a organização, análise e interpretação dos dados experimentais visando a tomada de decisões, definição de Costa Neto (2002). Utilizar estatística na análise de dados é essencial para a tomada de decisões nas áreas de engenharia, economia, medicina e ciências sociais, permitindo transformar dados brutos em informações úteis. Dentre as muitas formas possíveis, esse trabalho irá se deter somente ao detalhamento de histograma, boxplot e série temporal.

Um histograma é uma representação gráfica que organiza um conjunto de dados em intervalos contínuos, conhecidos como classes ou bins. É uma ferramenta essencial na estatística descritiva, utilizada para visualizar a distribuição de uma variável quantitativa, permitindo a identificação de padrões como: assimetrias, picos e dispersões.

Uma série temporal é uma sequência de dados observados em pontos sucessivos no tempo, geralmente em intervalos regulares. Na engenharia, finanças, economia e muitas outras áreas a análise de séries temporais é crucial para entender o comportamento dos dados ao longo do tempo, identificar padrões sazonais, tendências e prever valores futuros.

O boxplot ou diagrama de caixa, é uma representação gráfica que resume a distribuição de um conjunto de dados. Ele exibe a mediana, quartis e possíveis outliers, proporcionando uma visão clara da dispersão e assimetria dos dados. É uma ferramenta fundamental na estatística descritiva, usada para comparar distribuições de diferentes conjuntos de informações.

3 Metodologia

A presente pesquisa é de natureza aplicada que dispõe criar uma solução para a falta de padronização das análises e da coleta de informações, além de propor uma redução no tempo de análises. O objetivo traçado é de forma prescritiva, propondo novas diretrizes para a leitura de amostras de dados e a uniformização dos resultados. A abordagem escolhida é a qualitativa, dando ênfase na avaliação, compreensão e desempenho dos engenheiros em relação ao tema central.

Pesquisa empírica é o procedimento metodológico adotado, tendo como instrumentos a coleta de dados do setor de Viabilidade de uma distribuidora de energia no Rio Grande do Sul, ao longo de quatro meses: dois meses para entrevistas e acompanhamento e dois meses para aplicação e testes. Os instrumentos incluem questionários, acompanhamento pessoal, planilhas e *softwares*.

As etapas que foram estruturadas compreendem as seguintes fases: 1) Levantamento das fontes de dados históricos: identificação e catalogação das origens disponíveis; 2) Observação das metodologias dos engenheiros: análise das abordagens e identificação de melhorias e padronizações; 3) Padronização das fontes de dados: garantia de uma base de dados uniforme e consistente para futuras análises; 4) Padronização dos gráficos e análises com *R Script*: criação de gráficos para identificar valores mínimos, distribuição de faixas de potência, frequência de ocorrência e visualização temporal dos dados; 5) Criação da ferramenta integrada: uso do *R Script* e *Power BI* para combinar dados padronizados e análises estatísticas, permitindo pesquisas e filtros sem comprometer a visualização dos resultados; 6) Padronização do relatório gerado: uniformização dos relatórios produzidos pela ferramenta; e 7) Elaboração e aplicação de treinamento para engenheiros.

A eficiência da ferramenta foi validada por meio de sua utilização diária, verificando se os usuários conseguiram analisar os dados com facilidade, contribuindo paralelamente na diminuição do tempo médio de cada análise.

4 Resultados e discussões

Nesse capítulo contém todo o detalhamento de alinhamento das informações que foram utilizados na elaboração e aplicação da plataforma. Ao longo do capítulo são apresentados os resultados encontrados e as percepções obtidas na aplicação desse projeto, além dos cálculos e *scripts* criados.

4.1 Alinhamento da base dados

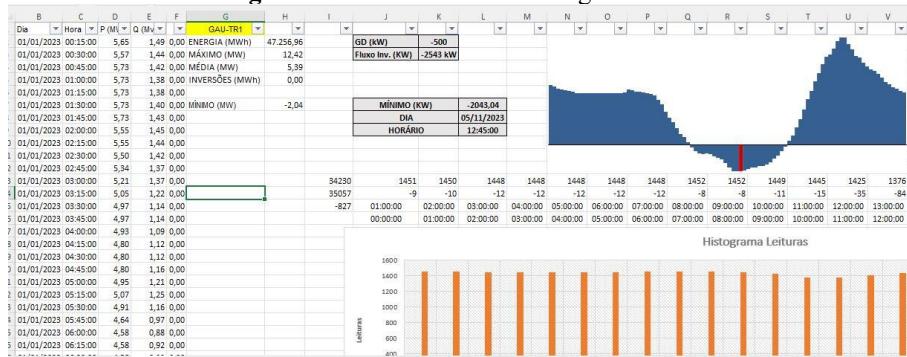
O mapeamento dos dados foi realizado com outro setor (Planejamento) que desde 2018 armazena registros de potência de alimentadores e transformadores de subestações. Mensalmente, um engenheiro extrai manualmente os arquivos do supervisório de controle e operação ADMS (Sistema de Gestão de Distribuição Avançado), salvando-os no formato ".xlsx" em uma pasta específica, organizada por mês.

De posse desses dados, foi realizado um acompanhamento individual de quatro engenheiros, durante dois meses, para entender como executavam suas atividades. Os engenheiros foram denominados como A, B, C e D a fim de preservar as informações pessoais e de trabalho,

também em comum acordo com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). O objetivo do acompanhamento era avaliar: 1) Conhecimento do tema; 2) Agilidade em pesquisar e obter as informações dos registros de dados de potência elétrica; 3) Agilidade e convicção na emissão do parecer se há inversão de fluxo; e 4) Se havia algum arquivo e/ou ferramenta pessoal para a execução dessas atividades no dia a dia.

O primeiro acompanhamento foi com o Engenheiro A, que tem mais de 10 anos de experiência no setor de Viabilidade. Ele mostrou grande *expertise*, agilidade na obtenção de informações e na tomada de decisões, além de ter desenvolvido uma planilha particular no *Excel* para análises preliminares. A planilha exibida na Figura 3 usa os mesmos arquivos do setor de planejamento.

Figura 3: Planilha auxiliar do engenheiro A



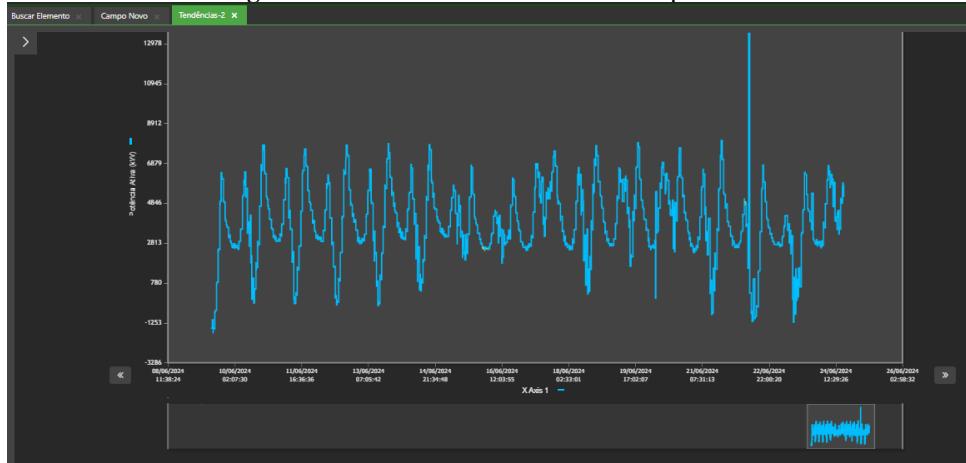
Fonte: De autoria própria.

Embora o Engenheiro A tenha adicionado material à sua tarefa, a planilha criada apresenta limitações, como erros de preenchimento manual e atividades repetitivas. Além disso, engenheiros menos familiarizados com o *Excel* teriam dificuldades em usá-la.

O Engenheiro B, com 7 anos de experiência, tem vasta experiência e domínio sobre o assunto, porém não possui nenhuma desenvoltura com sistemas computacionais. Suas análises se limitam a gráficos básicos do ADMS, exemplificado na Figura 4, resultando em pareceres superficiais e possíveis interpretações incorretas.

O Engenheiro C, com cerca de dois anos de experiência, tem conhecimento teórico superficial e enfrenta dificuldades na pesquisa e análise de dados. Sua metodologia é semelhante à do Engenheiro B, mas ele compartilha todas as suas decisões e análises com o grupo, sugerindo falta de convicção e/ou necessidade de uma ferramenta que ofereça maior certeza dos resultados estudados.

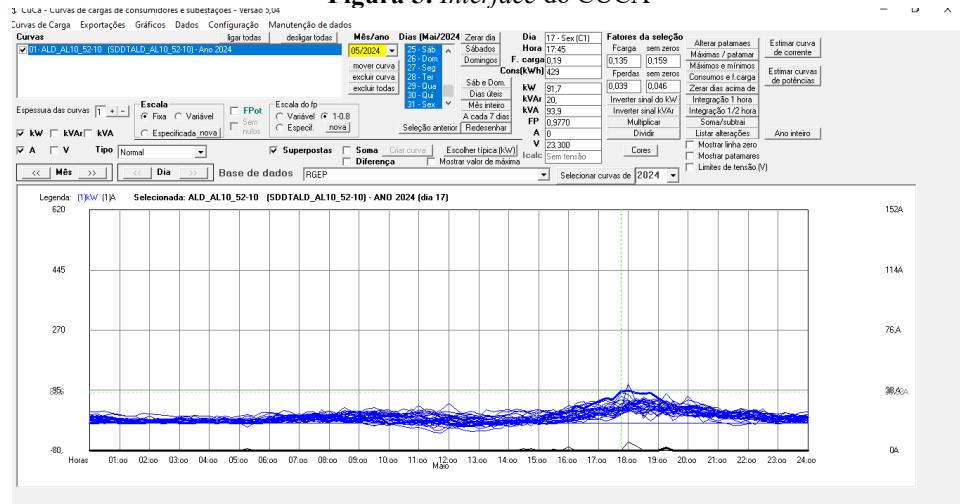
Figura 4: Análise no ADMS da curva de potência



Fonte: De autoria própria.

O Engenheiro D, com 5 anos de experiência, tem bom conhecimento e agilidade nas análises, mas não se destaca em novas ferramentas. Ele utiliza o ADMS e o aplicativo interno CUCA, exemplificado na Figura 5, que gera gráficos de séries temporais. No entanto, a falta de resultados diretos no CUCA exige que o engenheiro interprete os gráficos e resultados por conta própria.

Figura 5: Interface do CUCA



Fonte: De autoria própria.

A definição de usar registros diários do setor de planejamento, com amostras horárias a cada 15 minutos, foi a primeira definição adotada. A linguagem *R Script* foi escolhida para analisar e criar os gráficos, pois possui uma vasta biblioteca matemática e estatística. A biblioteca adotada foi a GGPlot2, com gráficos padronizados em formato de histograma, série temporal e *boxplot*.

As estratégias adotadas para cada gráfico se justificam pelo fato de que um histograma quantifica leituras de potência negativa e suas faixas. A série temporal avalia todos os registros, observando sazonalidade e comportamento. O *boxplot* mostra mediana, média e desvios padrão.

Com o plano de fundo consolidado, a *interface* do usuário a ser desenvolvida precisa ser dinâmica e intuitiva. Para isso, foi adotado o *software Power BI* da *Microsoft*, possui uma *interface* nativa com o *R Script* para a criação dos visuais e gráficos.

4.2 Desenvolvimento da ferramenta

O desenvolvimento da ferramenta começou com a leitura das planilhas históricas no *Power Query* do *Power BI*, agrupando todos os arquivos em um único *DataFrame*. O *layout* criado permitiu que o usuário realizasse pesquisas e filtros sem precisar sair da tela principal. No *Power BI*, foram criadas medidas na linguagem *DAX* para cálculos estatísticos. Na Figura 6 contém as fórmulas.

Figura 6: Fórmulas utilizadas nas medidas do *DAX*

```

1  #Cálculo do maior valor de Potencia
2
3      Máx (kW) = MAX(Unificado[Potencia])
4
5  #Cálculo do menor valor de Potencia, desconsiderando os valores zerados
6
7      Mín (kW) = CALCULATE(MIN(Unificado[Potencia]),Unificado[Potencia]>0.00)
8
9
10 #Cálculo simulando como seria a nova maior potencia encontrada, baseado no parâmetro da nova GD
11
12      Nova Máx (kW) = [Máx (kW)]-CONVERT(SELECTEDVALUE('Parâmetro'[Número_texto]),DOUBLE)
13
14 #Cálculo simulando como seria a nova menor potencia encontrada, baseado no parâmetro da nova GD
15
16      Nova Mín (kW) = [Mín (kW)]-CONVERT(SELECTEDVALUE('Parâmetro'[Número_texto]),DOUBLE)
17
18 #Cálculo simulando como seria os novos valores de potencias, baseado no parâmetro da nova GD
19
20      Nova Potencia (kW)=
21
22          VAR NOVO = SUMX(Unificado,Unificado[Potencia]*1)
23
24          RETURN
25
26          NOVO-CONVERT(SELECTEDVALUE('Parâmetro'[Número_texto]),DOUBLE)
27
28 #Notificação dos alimentadores ou transformadores NÃO TEM fluxo inverso
29      Texto_frequencia = IF([Mín (kW)]>=0,"-->Não há fluxo inverso no período analisado--","","")
30
31 #Notificação dos alimentadores ou transformadores quando na nova simulação NÃO GERARÁ fluxo inverso
32      Texto_Nova frequencia = IF([Nova Mín (kW)]>=0,"-->Não ocorreria fluxo inverso com a nova GD--","","")
33
34

```

Fonte: De autoria própria.

A Figura 7 apresenta o código utilizado para gerar os gráficos e resultados, utilizando o pacote GG PLOT2 no R *Script*.

Figura 7: Códigos do R Script

```

27  #Instala a biblioteca do GGPLOT2
28  library(ggplot2)
29  library(gghighlight)
30  library(ggpmisc)
31  library(scales)
32
33  #Define qual é o dataframme/dataset e qual o campo que vai ser utilizado
34  ggplot(dataset, aes(Potencia))+
35
36  #Cria o gráfico do histograma
37  |   geom_histogram(bins=20,color="gray",boundary = 10,color="White",fill="#80C342")+
38
39  #Define a faixa de intervalos
40  |   stat_bin(bins = 20,boundary = 10,geom='text',color='black',size=5, aes(label=..count..), position=position_stack(vjust = 1))+ 
41  |   ylab("QTD")+
42  |   xlab("Faixa de Potencia KW")
43
44  #Separa os gráficos cada visual em três períodos
45  |   facet_wrap(~Periodo,ncol=1)+
46  |   theme(axis.text.x=element_text(size=15),
47  |         axis.text.y=element_text(size=10))
48
49  #Define qual é o dataframme/dataset e qual o campo que vai ser utilizado
50  ggplot(dataset, aes(x = Periodo, y = Potencia)) +
51
52  #Cria o gráfico do boxplot
53  |   geom_boxplot(fill="#80C342") +
54  |   stat_boxplot(geom = "errorbar",
55  |               width = 0.15)+
56  |   coord_flip()+
57  |   xlab("Periodo")+
58  |   ylab("Faixa de Potencia")+
59  |   stat_summary(fun = "mean", shape = 23) +
60  |   theme(axis.text.x=element_text(size=14),
61  |         axis.text.y=element_text(size=15))
62
63
64  # Variável que converte as horas o campo do dataframe
65  dataset$Hora_txt <- as.POSIXct(dataset$Hora,format = "%H:%M")
66
67  #Variante: Menor valor
68  m <- min(dataset$Potencia)
69
70  ggplot()+
71  #criar o Gráfico da série temporal
72  |   geom_line(data=dataset,aes(Hora_txt,Potencia,colour = Dia))+ 
73  |   scale_x_datetime(date_labels = "%H", date_breaks = "1 hour")+
74  |   theme(legend.position = "none",
75  |         axis.text.x=element_text(size=9),
76  |         axis.text.y=element_text(size=15))+

```

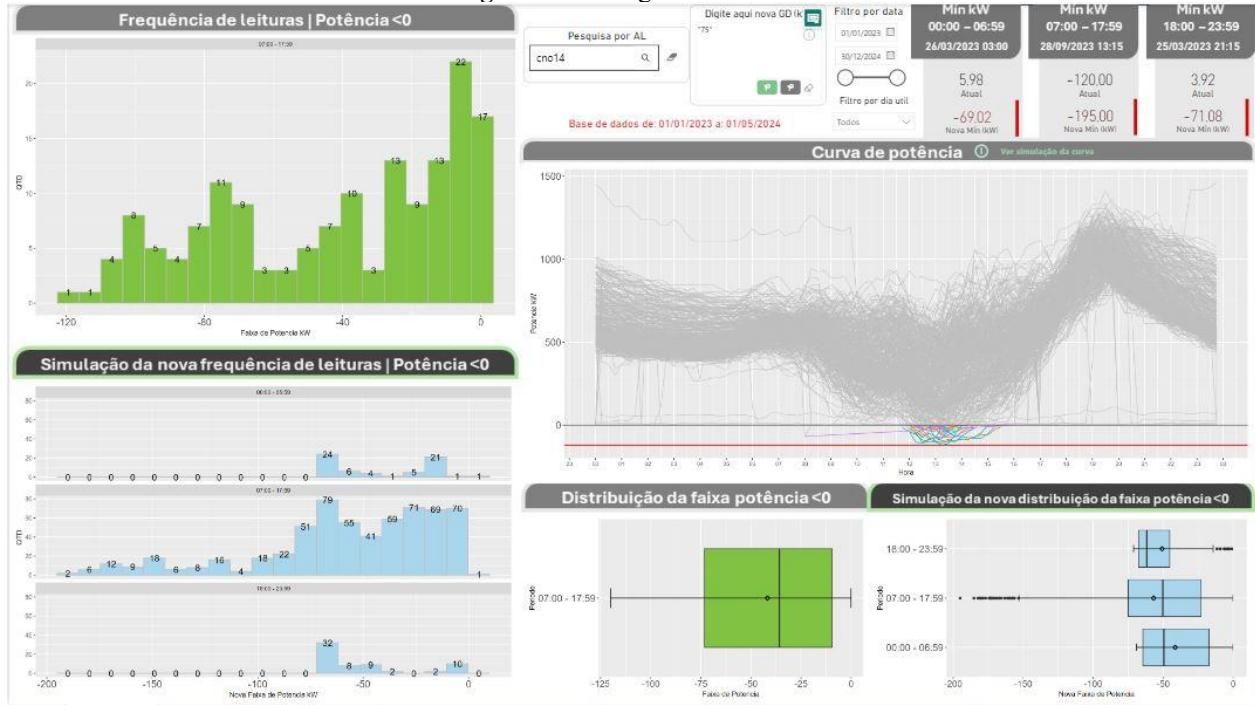
Fonte: De autoria própria.

A ferramenta incluiu dois *templates* exportáveis: Anexo I – Dados Estatísticos, com histogramas e resumo de estatísticas (mínimo, mediana, média, desvios padrão e máximo) e Anexo II – Curva de Potência, com gráfico temporal destacando as inversões de fluxo. As figuras não foram apresentadas neste trabalho por conterem textos e informações que são dados sensíveis da empresa estudada.

Com o desenvolvimento concluído, foi realizado um treinamento presencial de duas horas para os quatro engenheiros, demonstrando o funcionamento e a aplicação da ferramenta, que foi comumente denominada *E-Flow*.

4.3 Aplicação e resultado

Para avaliar a eficiência da ferramenta foi analisada a facilidade de uso pelos usuários e a redução no tempo de análise dos dados. Aa figura 8 mostra como ficou a *interface* e *layout*.

Figura 8: Visão geral do *E-Flow*

Fonte: De autoria própria.

No canto superior direto da figura 8, são exibidos os valores mínimos de potência em três faixas horárias, com data e horário, além de simular os novos valores mínimos considerando a geração que está sendo analisada.

No canto superior esquerdo, ficam os histogramas. Esses gráficos identificam a quantidade de leituras negativas que aconteceram no período, além de destacar a da distribuição das faixas de potência com suas respectivas quantidades de registros.

A terceira análise, representada pelos boxplots, no canto inferior direito, examinou a distribuição da potência negativa, verificando a normalidade ou anormalidade dos dados. Nesse diagrama foi possível identificar a média (ponto), a mediana (barra vertical) e a faixa estatística que abrange 99,99% dos dados (valores entre as barras verticais), além dos outliers que são +/- 3 desvios padrões (pontos depois das barras verticais).

A última análise demonstrada por meio do gráfico de série temporal, demonstrou-se crucial para identificar períodos de inversão, pois, os estudos que eram emitidos antes da padronização eram baseados somente em gráficos de linha, mas não tinham nenhum diferencial para o apontamento dos períodos que houve a inversão. Registros positivos são mostrados em cinza, enquanto as inversões são destacadas com cores variadas. Isso permite uma visão clara das

inversões e sua correlação com o histograma e o boxplot, facilitando a análise das quantidades de registros e sua sazonalidade.

A série temporal, embora pareça ser complexa inicialmente é simples na prática, quanto mais coloridas forem as linhas, maior inversão de fluxo há.

Diante dos expostos iniciais, ficou evidenciado o alcance do objetivo central e demais objetivos secundários. A plataforma fornece análises sobre fluxo de potência inversa além de padronizar os relatórios técnicos. O tempo de análise reduziu de 1,5 horas para 0,5 horas com o E-Flow, conforme medido pelo Clockfy, um site gratuito de gerenciamento de tempo, em que foi possível mensurar o tempo gasto para a realização de cada atividade. Em sua usabilidade diária, o E-Flow mostrou ser eficiente para todos os engenheiros, exigindo apenas a pesquisa do alimentador ou transformador juntamente com o valor da nova geração estudada, em que o restante é calculado automaticamente, incluindo a avaliação dos impactos no sistema elétrico.

5 Considerações finais

O objetivo deste projeto foi desenvolver uma ferramenta que leia amostras de potência, crie séries temporais, identifique valores mínimos, distribua as faixas de potência e frequência da inversão, melhorando a gestão de dados pelo técnico responsável. Consoante ao objetivo traçado, a plataforma *E-Flow*, que integra *R Script* e *Power BI*, resultou em uma solução robusta e eficiente para análise de inversão de fluxo, atendendo aos requisitos da REN 1000, artigo 73º.

A padronização e centralização dos dados reduziram o tempo de análise dos engenheiros de 1,5 para 0,5 horas, ou seja, uma redução de 66,67% no tempo utilizado, aumentando a produtividade e garantindo precisão nos pareceres técnicos. O *E-Flow* provou ser intuitivo e acessível, permitindo que engenheiros com diferentes níveis de experiência o utilizassem eficazmente.

Este estudo confirma a aplicação de ferramentas estatísticas e computacionais na engenharia de produção e na gestão de sistemas elétricos, promovendo operações mais dinâmicas e precisas. No entanto, enfrentou limitações, como a dependência de uma extração manual dos dados históricos, o que pode introduzir erros e inconsistências. Uma lição importante aprendida foi a necessidade de treinamentos contínuos para assegurar a plena utilização da ferramenta.

Para futuras pesquisas, sugere-se integrar a ferramenta a banco de dados em tempo real, para reduzir a dependência de registros manuais. Explorar inteligência artificial para aprimorar as

previsões de inversão de fluxo e avaliar a aplicabilidade em outras concessionárias são ações promissoras.

Em conclusão, a pesquisa desenvolveu uma ferramenta inovadora e eficiente para análise de fluxo de potência em sistemas elétricos, melhorando a gestão e operação das redes na geração distribuída. O *E-Flow* destaca-se pela padronização e aprimoramento operacional, com grande potencial para aplicação em larga escala e incentiva futuras pesquisas e aperfeiçoamentos.

Referências

ANEEL, Aumento da oferta de geração em 2024 será de 10,1 GW, prevê ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/aumento-da-oferta-de-geracao-em-2024-sera-de-10-1-gw-preve-aneel>. Acesso em: 20 mar. 2024.

BRASIL. Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, v. 141, n.º 46, 30 jul. 2004. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=30/07/2004&jornal=1&pagina=1&totalArquivos=196>. Acesso em: 18 dez. 2025.

COSTA NETO, P. L. O. C. **Estatística**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2002.

SOUZA, A. C. Z.; ALVEZ, C. A.; MOURA, R. S. **Sistemas de distribuição de energia elétrica: conceitos básicos e modelagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2024.

Data de submissão: 15/01/2025

Data de aceite: 30/01/2025