



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
CURSO ENGENHARIA DE PRODUÇÃO ELÉTRICA

Raphael Britto Santos

Análise de desempenho com foco nas correntes elétricas de *stringboxes* em usinas solares fotovoltaicas a fim de melhorar estratégias de manutenção

Florianópolis

2024

Raphael Britto Santos

Análise de desempenho com foco nas correntes elétricas de *stringboxes* em usinas solares fotovoltaicas a fim de melhorar estratégias de manutenção

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Produção Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica com ênfase em Produção.

Orientador(a): Prof.(a) Gisele de Lorena Diniz Chaves, Dr.(a)

Florianópolis

2024

Santos, Raphael Britto

Análise de desempenho com foco nas correntes elétricas de stringboxes em usinas solares fotovoltaicas a fim de melhorar estratégias de manutenção / Raphael Britto Santos ; orientadora, Gisele de Lorena Diniz Chaves, 2024.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Elétrica. 2. Usinas solares fotovoltaicas. 3. Análise de dados e desempenho. 4. Estimar strings faltantes e custo. 5. Priorização de manutenção. I. Chaves, Gisele de Lorena Diniz. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Elétrica. III. Título.

Raphael Britto Santos

Análise de desempenho com foco nas correntes elétricas de *stringboxes* em usinas solares fotovoltaicas a fim de melhorar estratégias de manutenção

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Produção Elétrica.

Local Florianópolis, 17 de dezembro de 2024.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof.(a) Gisele de Lorena Diniz Chaves, Dr.(a)

Orientador(a)

Prof.(a) Marina Bouzon, Dr.(a)

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Djonathan Luiz de Oliveira Quadras, Me.

Università degli Studi di Firenze

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho ao meu pai, que se tornou um anjo no céu e não poderá acompanhar a formatura do seu filho caçula, no entanto sei que estará feliz.

Dedico a minha mãe, Lilian, e ao meu irmão, Sérgio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder a vida, inteligência e amor.

Expresso minha gratidão à minha família, que sempre foi minha força.

À minha orientadora e professora, Gisele, pelo tempo e pelos ensinamentos compartilhados.

Sou grato à minha supervisora de estágio, Camylla, pelo cuidado, sendo um exemplo de excelência em tudo o que faz.

Agradeço também ao coordenador do meu setor no estágio, Fernando, pelos inúmeros ensinamentos e exemplo de conduta.

Aos meus amigos de faculdade que tornaram os últimos anos mais leves e alegres.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de desempenho em usinas solares fotovoltaicas, destacando o processo de análise de dados para a identificação de *strings* faltantes a partir das correntes das caixas de conexões das linhas de painéis solares (também conhecidas como *stringboxes*). Para isso foram coletados dados de uma usina localizada no estado da Bahia e foi desenvolvido um procedimento de análise dos dados, incluindo as etapas de aquisição e tratamento dos dados, bem como o desenvolvimento do algoritmo que estima a quantidade de *strings* faltantes. Foi desenvolvida uma metodologia para estimar a perda financeira de energia não gerada decorrente das *strings* faltantes em um período de uma semana. Para minimizar o impacto desta perda, essa metodologia orienta a equipe de manutenção nas ações de reparo necessárias, resultando em uma melhoria significativa comparada ao procedimento anterior utilizado pela empresa objeto do estudo de caso. Desta forma, ocorre um agendamento de atendimentos desta equipe de manutenção tornando o trabalho destas mais efetivo e priorização do restabelecimento das *stringboxes* com maior impacto financeiro. Os resultados demonstram a eficiência do novo procedimento na identificação assertiva de falhas, contribuindo para a otimização do desempenho das usinas solares fotovoltaicas. Além disso, as informações coletadas sobre o cotidiano de operação e as rotinas da usina foram essenciais para respaldar a metodologia adotada. O relacionamento próximo com a equipe mantenedora ao longo do trabalho possibilitou a obtenção de dados relevantes. Adicionalmente, esta pesquisa evidencia a importância de técnicas avançadas de análise de dados para o monitoramento contínuo e reativo, permitindo uma intervenção rápida e eficaz nas operações de manutenção após a identificação de problemas. Com isso, espera-se que os resultados obtidos sirvam de referência para futuras melhorias nos procedimentos de análise de desempenho e manutenção em usinas solares.

Palavras-chave: análise de desempenho; usinas solares fotovoltaicas; *strings* faltantes; manutenção; otimização; análise de dados.

ABSTRACT

This paper presents a performance analysis of photovoltaic solar power plants, highlighting the data analysis process for identifying missing strings based on the currents of the stringboxes. To this end, data were collected from a power plant located in the state of Bahia, and a data analysis procedure was developed, including data acquisition and processing stages, as well as the development of an algorithm to estimate the number of missing strings. A methodology was developed to estimate the financial loss of ungenerated energy due to missing strings over a one-week period. To minimize the impact of this loss, this methodology guides the maintenance team in necessary repair actions, resulting in a significant improvement compared to the previous procedure used by the company in the case study. This way, the maintenance team's schedules become more effective, prioritizing the restoration of stringboxes with the greatest financial impact. The results demonstrate the efficiency of the new procedure in accurately identifying faults, contributing to the optimization of the performance of photovoltaic solar power plants. Additionally, the information collected about the daily operation and routines of the power plant was essential to support the adopted methodology. The close relationship with the maintenance team throughout the work enabled the acquisition of relevant data. Furthermore, this research highlights the importance of advanced data analysis techniques for continuous and reactive monitoring, allowing for quick and effective intervention in maintenance operations after problems are identified. As a result, it is expected that the obtained results will serve as a reference for future improvements in performance analysis and maintenance procedures in solar power plants.

Keywords: performance analysis; photovoltaic solar power plants; missing strings; maintenance; optimization; data analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura simplificada de um parque fotovoltaico.....	14
Figura 2 - Visão sistêmica da medição de desempenho	24
Figura 3 - Visita técnica ao parque X em agosto de 2024.	30
Figura 4 - Esquema simplificado do parque X.....	32
Figura 5 - Curvas de corrente contínua (CC) de <i>stringboxes</i> com falhas de sinal.....	33
Figura 6 - Curvas de corrente contínua (CC) de <i>stringboxes</i> com dados bons.....	34
Figura 7 - Curvas de corrente (CC) de <i>stringboxes</i> com quantidades diferentes de <i>strings</i>	35
Figura 8 – Curva de corrente da <i>Stringbox</i> 2 do ITS 33 / Inversor 2 acima do valor nominal.....	37
Figura 9 - Curva de corrente da <i>Stringbox</i> 6 do ITS 23 / Inversor 3 acima do valor nominal.....	38
Figura 10 - Curva de corrente da <i>Stringbox</i> 1 do ITS 32 / Inversor 2 acima do valor nominal.....	38
Figura 11 - Curvas de corrente (CC) das <i>stringboxes</i> com problemas de <i>tracker</i>	40
Figura 12 - Curvas de corrente (CC) das <i>stringboxes</i> para um ITS com painéis travados	41
Figura 13 - Curvas de corrente (CC) das <i>stringboxes</i> com problema contínuo nos dados	42
Figura 14 - Curvas de corrente (CC) das <i>stringboxes</i> após tratamento dos dados...	44
Figura 15 - Caixa de combinação das correntes de <i>strings</i> (<i>stringbox</i>).....	45
Figura 16 - Dados instáveis em dia com severas limitações de potência	47
Figura 17 - Mapa de calor de <i>strings</i> faltantes em uma semana analisada	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação do número de <i>strings</i> pertencentes a cada <i>stringbox</i>	36
Tabela 2 - Exemplo de tratamento dos dados por mediana e desvio padrão	43
Tabela 3 – Exemplo prático da transformação de corrente PU e cálculo de <i>strings</i> faltantes.....	48
Tabela 4 – Resultado médio de <i>strings</i> faltantes para uma semana de análise.....	52
Tabela 5 – Prioridade de atuação da equipe de campo	52
Tabela 6 - Ordem de atuação nas <i>stringboxes</i>	53
Tabela 7 – Dados de corrente de <i>stringbox</i> que foram tratados.....	54
Tabela 8 – Percentual de amostras tratadas por tipo de problema e total	55
Tabela 9 – Energia medida e frustrada (calculada) no período para o Parque X.....	56
Tabela 10 – Perda estimada em geração de energia e receita na semana analisada	56
Tabela 11 – Comparação da indisponibilidade de <i>strings</i> para cada método para a mesma semana analisada	57
Tabela 12 - Evolução da indisponibilidade de strings nos últimos meses	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ITS	Inverter-Transformer Set (“ <i>Conjunto Inversor-Transformador</i> ”)
O&M	Operação e Manutenção
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SB	Stringbox
SU	Subestação Unitária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	GERAÇÃO DE ENERGIA NA USINA SOLAR	17
2.2	COMPONENTES DO PARQUE SOLAR	18
2.3	SENSORES DE MEDIÇÃO	19
2.4	MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA NAS <i>STRINGBOXES</i>	20
2.5	LIMITAÇÕES DE ENERGIA	21
2.6	SISTEMA POR UNIDADE	21
2.7	MEDIÇÃO DE DESEMPENHO	23
2.8	MEDIÇÃO DE DESEMPENHO EM USINAS SOLARES	25
3	METODOLOGIA	27
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	27
3.2	EMPRESA X	28
3.3	COLETA DE DADOS	29
3.4	ANÁLISE DE DADOS	31
3.4.1	Algoritmo	45
4	RESULTADOS	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

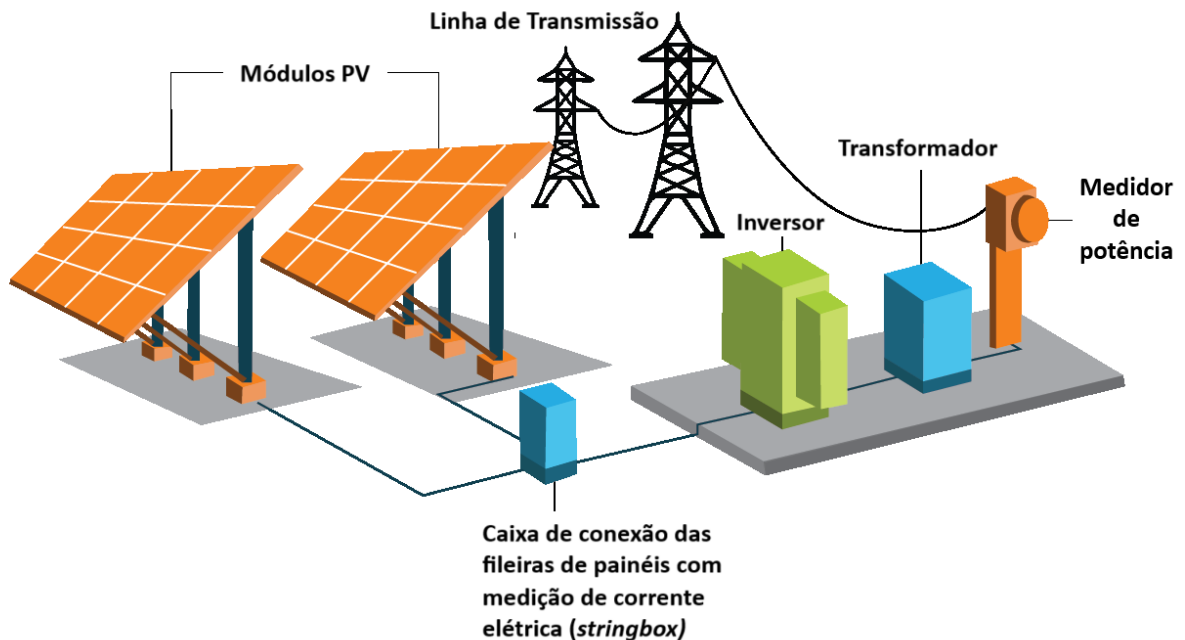
A geração de energia solar no Brasil tem experimentado um crescimento exponencial nos últimos anos, impulsionada tanto pela abundância de recursos solares quanto pelas políticas de incentivo à energia renovável. Em um país cuja matriz energética é historicamente dominada por hidrelétricas, a energia solar emerge como uma alternativa crucial para a diversificação e segurança energética (Esposito *et al.*, 2013).

Segundo Pereira *et al.* (2017), o Brasil possui um potencial solar estimado em 28.500 GW, o que destaca a capacidade do país de atender não apenas à demanda interna, mas também de se tornar um líder global em energia limpa. Esse avanço não só contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também promove o desenvolvimento econômico e a geração de empregos, consolidando a energia solar como um pilar fundamental para um futuro sustentável no Brasil.

De acordo com o Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (SIGA), a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no Brasil alcançou cerca de 15 gigawatts (GW) de potência fiscalizada em 2024 (ANEEL, 2024). Este crescimento reflete uma expansão contínua do setor, impulsionada por políticas de incentivos e o aumento do interesse por fontes de energia renováveis. Dessa forma, o Brasil tem se posicionado como um dos líderes em capacidade instalada de energia solar na América Latina, com uma infraestrutura cada vez mais robusta e diversificada (ANEEL, 2024). Considerando apenas o ano de 2024, a expansão obtida chegou aos 6.526 megawatts (MW) de potência instalada, com a entrada em operação de 183 usinas, segundo dados divulgados pela ANEEL (2024).

Os parques de geração de energia solar de grande porte podem conter mais de 100 mil painéis solares (também conhecidos como painéis fotovoltaicos, módulos PV ou módulos fotovoltaicos). Além disso são necessários diversos componentes para o processo de geração e transmissão da energia, tais como: inversores, transformadores, caixas de conexões das linhas de painéis solares (também conhecidas como *stringboxes*), cabos, entre outros equipamentos auxiliares. Ainda, há necessidade de instalar uma subestação para conectar a energia gerada à rede elétrica. Esta relação está demonstrada de forma simplificada na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura simplificada de um parque fotovoltaico.



Fonte: Vrinda Nano Technologies, 2024.

Vale ressaltar que a *stringbox* (designada na Figura 1) é um componente importante para a conexão dos módulos fotovoltaicos ao conjunto inversor-transformador (normalmente denominado pelas siglas ITS¹ ou SU²), além de ser um ponto crítico na rotina de manutenção. De acordo com Simão *et al.* (2024), este último fato pode ser explicado por uma atividade recorrente de troca de fusíveis queimados que servem de proteção para as correntes provenientes das fileiras de painéis fotovoltaicos (também conhecidas como *strings*).

Além disso, outros pontos relevantes para a operação e manutenção do parque solar também podem ser citados: o controle de vegetação ao redor dos módulos fotovoltaicos, o nível de sujeira sobre os painéis, a integridade dos cabos e componentes do sistema, eventos de incêndio e ventania (que podem danificar *strings* inteiras), bem como indisponibilidades por parada forçada do inversor ou transformador.

Pelas razões citadas anteriormente, o trabalho da equipe de operação e manutenção é complexo, abrangendo vastas áreas a serem percorridas e muitos equipamentos a serem examinados. Vale ressaltar que esse crescimento acelerado dos parques traz uma alta demanda de profissionais capacitados para atuar no

¹ A sigla ITS refere-se ao termo “*Inverter-transformer set*” (“conjunto inversor-transformador”)

² A sigla SU refere-se ao termo “*Subestação unitária*”, também utilizado nas usinas brasileiras.

processo de manutenção do parque, o que pode ser um problema considerando a atual carência de mão de obra qualificada para esse setor no Brasil (CNN, 2023). Então, surge a necessidade de ser mais assertivo na manutenção, reduzindo deslocamentos e atendendo os pontos mais críticos do parque, considerando a capacidade de mão de obra limitada.

Entretanto, atualmente as empresas executam esta manutenção sem muito apoio de um sistema de acompanhamento, destacando-se as seguintes dificuldades: aquisição de dados e gestão dos componentes de medição, conhecimento no tratamento e entendimento dos dados, falta de uma equipe focada na medição de desempenho do parque. É importante ressaltar que a manutenção corretiva reflete diretamente na disponibilidade de geração de energia do parque. Logo, a falta de eficiência nesse processo acarreta custos de energia não gerada e pode contribuir para um desempenho abaixo do plano de negócios da empresa.

Com o intuito de obter a visualização de como o parque está operando, quantificar a sua performance e priorizar problemas a serem resolvidos, torna-se necessário entender os dados fornecidos pelos sensores dos componentes. Entretanto, como a quantidade de painéis, inversores e *strings* são elevados, o volume de dados de acompanhamento gerados no sistema é significativo, o que exige uma atividade constante de análise desse sistema para dar suporte ao trabalho da equipe de campo. Ainda assim, é importante frisar que o acompanhamento constante dos dados de uma usina pode ser uma atividade muito custosa, considerando a dimensão do problema analisado. Por isso, faz-se necessário desenvolver métodos para analisar grandes quantidades de informação de forma confiável e eficiente.

A análise de dados, apoiada pela ferramenta computacional, surge como uma solução fundamental para resolver o problema citado. Através de análises assertivas e geradas em tempo hábil, é possível apoiar a equipe de manutenção na priorização de serviços, identificação de problemas mais agudos e com maior perda de desempenho. Portanto, depois que se toma conhecimento da realidade do parque por meio da análise dos dados disponíveis, ações devem ser tomadas para guiar a equipe de Operação e Manutenção (O&M), de forma a melhorar a performance do parque. A gestão desses dados, em sintonia com o planejamento de campo, deve fazer parte de um processo contínuo que visa a melhoria da performance.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método para análise de desempenho com foco nas correntes elétricas das *stringboxes* para determinar o número de *strings* faltantes, possibilitando identificar e localizar esses problemas pontuais de desempenho para instruir a equipe de manutenção.

1.1.2 Objetivos Específicos

Destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) propor um procedimento para o tratamento de dados por meio da observação de padrões nas correntes elétricas das *stringboxes*.
- b) implementar o procedimento proposto por meio de algoritmo computacional de forma que seja eficiente e integrável às práticas de manutenção existentes.
- c) desenvolver ferramentas visuais de acompanhamento dos indicadores de desempenho do procedimento implementado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta parte do trabalho são apresentados os conceitos principais atrelados ao funcionamento de um parque solar, tais como o processo de geração de energia elétrica, a meteorologia e equipamentos de medição, os componentes principais que afetam a geração de energia e estrutura de distribuição de energia.

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA NA USINA SOLAR

A geração de energia em usinas solares se baseia na conversão da radiação solar em eletricidade, processo que pode ser realizado por diferentes tecnologias, sendo as principais a fotovoltaica e a solar térmica. Para aplicações em usinas, a tecnologia fotovoltaica é amplamente utilizada devido à sua versatilidade e ao custo-benefício em larga escala (Kabir *et al.*, 2018).

A tecnologia fotovoltaica consiste na conversão direta da luz solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas, que são dispositivos semicondutores capazes de gerar corrente elétrica quando expostos à luz. Existem muitos materiais diferentes na composição dos módulos fotovoltaicos (PV), sendo necessário conhecer as condições climáticas locais para escolher a tecnologia mais adequada (Ogbomo *et al.*, 2016).

A eficiência de uma usina fotovoltaica é influenciada por diversos fatores, como a irradiação solar disponível, a qualidade e a orientação dos módulos, e as condições operacionais dos equipamentos (por exemplo: quantidade de sujeira, sombreamentos, nível de vegetação), com pesos diferentes na estimativa de perda (Simão *et al.*, 2024).

Com o objetivo de aprofundar o entendimento sobre o processo de geração de energia em uma usina solar, apresenta-se uma base teórica sobre os componentes ou elementos principais desse processo no tópico seguinte. Esse conhecimento também é importante para a compreensão de algumas considerações que são feitas no desenvolvimento deste trabalho.

2.2 COMPONENTES DO PARQUE SOLAR

Os parques solares podem ser representados de forma simplificada pelo conjunto dos painéis fotovoltaicos, cabos, *stringboxes*, ITSs, subestação de energia e grid, cuja correlação já foi apresentada na Figura 1. Ao conjunto de painéis em série é atribuído o nome “*string*”. A “*stringbox*” é justamente a caixa que recebe os cabos vindos das *strings*, sendo a corrente de saída desta (*stringbox*) igual a soma das correntes de entrada das *strings* (Simão *et al.*, 2024). O ITS é o conjunto de inversor e transformador, onde a energia gerada em corrente contínua é convertida em corrente alternada e a tensão é elevada (Galdino; Pinho, 2014). Dependendo da configuração de cada parque o inversor pode ser separado do conjunto do transformador, em alguns casos com pequenos inversores por *string*. Através da subestação, a energia gerada é injetada no sistema elétrico (comumente referido como “*grid*”) (Simão *et al.*, 2024).

As condições ambientais influenciam significativamente o desempenho dos módulos/painéis fotovoltaicos (PV). Estas são a intensidade da radiação solar, temperatura das células, velocidade do vento e umidade. Os módulos PV são projetados para operar sob condições de teste padrão (“*Standard Test Conditions*” - STCs). As condições são: radiação solar de 1000 W/m², temperatura das células de 25 °C, velocidade do vento de 1 m/s e massa de ar (AM) de 1,5. Essas STCs são diferentes das condições reais de operação, que variam conforme a zona climática (Ogbomo *et al.*, 2016). Ou seja, o desempenho na geração de energia dos painéis instalados em uma usina pode ser significativamente afetado pelas condições reais de operação.

Além disso, os painéis também sofrem um processo de degradação que pode representar uma significativa parcela de perda a partir de 5 anos. Esse processo também está relacionado com as condições em que esses painéis estão operando, inclusive as razões de degradação são variadas, como a corrosão, a delaminação do material intrínseco, a descoloração e a quebra dos painéis (Ndiaye *et al.*, 2013).

Dada a dificuldade de se trabalhar com muitos fios extensos, por onde passam as correntes de centenas de fileiras de painéis (*strings*), torna-se necessário utilizar a “caixa de junção” (*stringbox*) para organizar as correntes elétricas em um único barramento. Dessa forma, a corrente de *stringbox* representa a soma das correntes das *strings* (Simão *et al.*, 2024).

A partir desse ponto, a corrente das *stringboxes* é transmitida aos inversores através de cabos com maior robustez e espessura. Vale ressaltar que a quantidade de *strings* por *stringbox* e quantidade de *stringboxes* por inversor é uma variável específica de cada sistema, dependendo da potência nominal dos painéis e inversores, e do layout da usina (Galdino; Pinho, 2014).

O componente *tracker* (que pode ser traduzido como “rastreador do Sol”) é uma importante tecnologia que controla a inclinação dos painéis fotovoltaicos de forma a aumentar a incidência de radiação solar, o que também aumenta a conversão de energia (Kuttybay *et al.*, 2020).

Os inversores são componentes responsáveis pela conversão de corrente contínua em corrente alternada, para que a energia gerada possa ser transmitida. Além disso, a subestação é a parte da usina destinada a receber toda energia elétrica gerada e a conectar essa energia com a rede de distribuição nacional.

2.3 SENSORES DE MEDIÇÃO

Os sensores de maneira geral podem medir potência gerada, correntes elétricas, direção do vento, temperatura, entre outras coisas mais específicas, que não serão detalhadas neste trabalho, porque não se fazem necessárias para a análise de performance em questão.

O piranômetro é um instrumento destinado a medir a irradiância solar (em W/m^2) e está disponível no mercado com tecnologias diferentes para tal:

- a) termopilha: utiliza uma termopilha que converte a energia térmica em energia elétrica. A termopilha é revestida com uma tinta preta especial para simular a resposta de um “corpo negro” de modo que a energia radiante solar incidente é praticamente toda absorvida e convertida em calor, que, por sua vez, é convertido em uma diferença de potencial elétrico proporcional à irradiância solar incidente na termopilha (Pereira *et al.*, 2017).
- b) fotodiodo: apresenta uma célula semicondutora (fotodiodo) como elemento sensor que converte diretamente a radiação solar em corrente elétrica proporcional à irradiância solar incidente. Contudo, tais equipamentos não apresentam resposta espectral plana o que acarreta incertezas distintas

para observações realizadas em condições de céu claro e céu totalmente nublado (Pereira *et al.*, 2017).

2.4 MEDIÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA NAS *STRINGBOXES*

Corrente elétrica é o fluxo de carga elétrica através de um condutor. Nos painéis fotovoltaicos, a corrente elétrica é gerada quando a luz solar ativa os elementos químicos sensíveis e presentes nesses módulos, gerando movimento de elétrons, e conseqüentemente, criando uma diferença de potencial entre os terminais do painel. Isso permite o fluxo de elétrons através de um circuito externo (Galdino; Pinho, 2014).

Portanto, o circuito externo pode ser considerado o conjunto de cabos por onde flui essa corrente elétrica e que conectam os módulos fotovoltaicos em série (formando *strings*), as *stringboxes* (composta pela conexão em paralelo de *strings*), os inversores e transformadores (este último comumente é denominado “Trafo”).

A corrente elétrica (este termo é simplificado para “corrente” durante as explicações posteriores) das *strings* que estão conectadas a uma *stringbox* pode ser medida de forma individual, em Amperes (A), unidade internacional do sistema de medidas. Contudo, em alguns casos, tem-se apenas a medição de corrente total de um setor da planta (soma das correntes de *strings*), sendo esta denominada corrente de *stringbox*. Dependendo do fabricante dos inversores, estes também podem contar com medidores de correntes de *stringbox* (visto que os cabos que chegam nas conexões de entrada do inversor são os mesmos que saem das *stringboxes*). Essas medições de corrente são feitas de forma automática nos componentes e armazenadas digitalmente em tempo real no banco de dados da usina.

Vale ressaltar que o conhecimento sobre os pontos do parque nos quais é feita medição de corrente é relevante para a análise de dados, pois o engenheiro ou analista responsável deve entender a natureza do dado para realizar considerações corretas.

A medição da corrente de *stringbox* é importante para saber o desempenho das *strings*, se há algum fusível queimado ou problema de comunicação (ou medição) com os dados (Simão *et al.*, 2024). A metodologia deste trabalho aborda a comparação entre correntes de *stringboxes* para definir o número de *strings* faltantes em um conjunto (baixo desempenho por fusíveis queimados).

É importante frisar que este tema das análises de correntes das *stringboxes* não possui uma base teórica bem consolidada, tendo como referência mais próxima, o artigo de Simão *et al.* (2024), onde também é desenvolvida uma comparação entre correntes de *stringboxes*, porém não há detalhamento sobre as medições. Por essa razão, muitas informações foram colhidas a partir do estudo em campo.

2.5 LIMITAÇÕES DE ENERGIA

Os inversores fotovoltaicos possuem um *setpoint* de potência que define a quantidade máxima de energia que podem injetar na rede elétrica. Esse *setpoint* é crucial para garantir a estabilidade e segurança do sistema elétrico. O controle do *setpoint* permite ajustar a potência ativa e reativa injetada, ajudando a manter a tensão dentro dos limites aceitáveis (Galdino; Pinho, 2014).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Ele trabalha para garantir a confiabilidade e eficiência do sistema elétrico, promovendo a otimização da operação e garantindo que todos os agentes do setor elétrico tenham acesso à rede de transmissão de forma não discriminatória (ONS, 2024).

A disponibilidade da usina refere-se à capacidade de uma usina de geração de energia de estar operando e fornecendo energia quando necessária. A disponibilidade é afetada por fatores como manutenção, falhas técnicas e condições operacionais. Manter alta disponibilidade é essencial para garantir um fornecimento contínuo e confiável de energia (Pereira *et al.*, 2017).

2.6 SISTEMA POR UNIDADE

O sistema por unidade (Sistema PU) é uma prática fundamental na engenharia elétrica que simplifica e padroniza as análises e cálculos em sistemas elétricos de potência (Kindermann, 1997). Assim, permite-se expressar grandezas elétricas, como tensões, correntes, potências e impedâncias, em relação a um valor de referência pré-determinado, geralmente a potência base do sistema. Algumas vantagens do Sistema PU podem ser destacadas (Kindermann, 1997):

- a) normalização: simplifica os cálculos ao normalizar todas as grandezas elétricas em relação a uma base comum.
- b) comparabilidade: permite a comparação direta de componentes elétricos com bases diferentes, facilitando a análise de desempenho.
- c) redução de erros: reduz a possibilidade de erros ao trabalhar com diferentes níveis de tensão e potência.

Dessa forma, para comparar o desempenho de componentes elétricos com bases diferentes, o sistema por unidade (PU) apresenta grande utilidade. O procedimento pode ser realizado da seguinte forma (Kindermann, 1997):

- a) definição de valores de base: primeiro, define-se os valores de base para potência e tensão. Esses valores são escolhidos arbitrariamente, mas devem ser consistentes ao longo do sistema.
- b) conversão para o sistema PU: converte-se todas as grandezas elétricas (potência, tensão, corrente, impedância) para valores referenciados a uma base unitária, conforme Equação 1.

$$\text{Valor em PU} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}} \quad (\text{Equação 1})$$

Usualmente, atribui-se o valor unitário (em PU) ao valor de referência do sistema, ou seja, é o caso em que o valor real é igual ao valor escolhido como base.

- c) análise e comparação: são realizadas análises e cálculos usando os valores em PU. Como todas as grandezas estão normalizadas, é possível comparar diretamente o desempenho de componentes com bases diferentes.
- d) conversão de resultados: após os cálculos, converte-se os resultados de volta para o Sistema Internacional de Unidades (SI) multiplicando os valores em PU pelo valor da base.

Esse método garante que componentes elétricos de diferentes níveis de tensão e potência, como é o caso deste trabalho, possam ser comparados de maneira precisa e eficiente.

2.7 MEDIÇÃO DE DESEMPENHO

A medição de desempenho auxilia os gestores na tomada de decisão para melhorar o desempenho da empresa, através das informações geradas pelas medidas de desempenho. Pace, Basso e Silva (2003) consideram um bom administrador aquele que controla o desempenho dos sistemas sob sua responsabilidade com a ajuda de medidas de desempenho.

Segundo Attadia e Martins (2003), a medição de desempenho é fundamental para a evolução da melhoria contínua, fornecendo uma base sólida para a implementação de práticas de gestão da qualidade total. Os autores argumentam que a medição de desempenho deve ser vista como um sistema integrado que fornece informações críticas para a gestão. Esse sistema deve ser capaz de capturar dados relevantes, analisá-los e apresentá-los de forma que possam ser utilizados para tomar decisões informadas. A medição de desempenho, portanto, não é apenas uma ferramenta de controle, mas também um mecanismo de aprendizado organizacional que promove a inovação e a adaptação contínua.

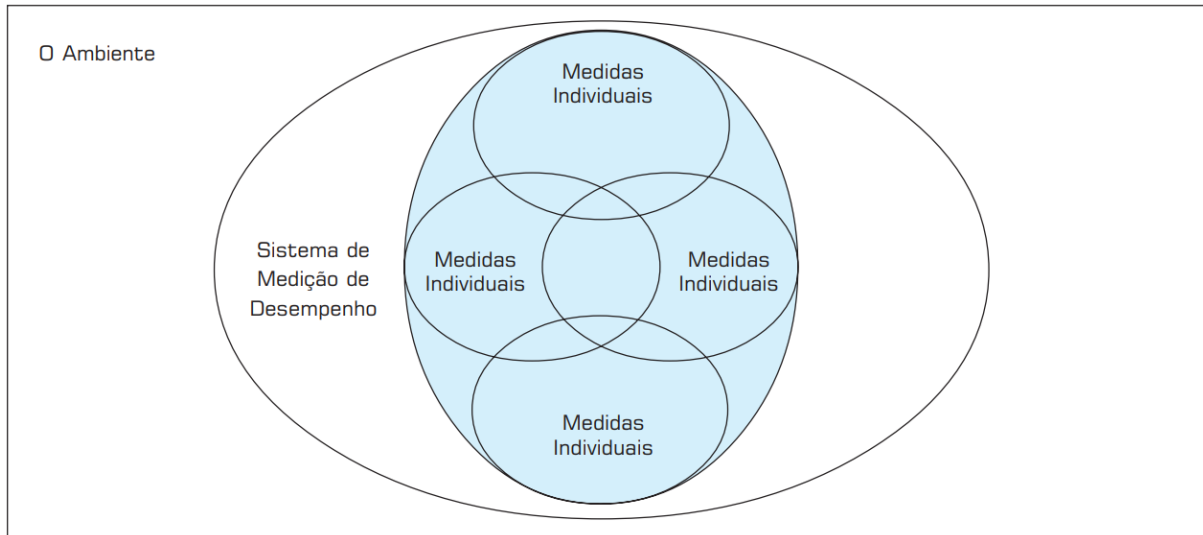
Martins *et al.* (1998) sugere que um sistema de indicadores de desempenho bem estruturado pode ajudar as organizações a monitorar seu progresso em direção à excelência operacional e a identificar rapidamente quaisquer desvios que possam comprometer a qualidade dos produtos ou serviços.

Para que o sistema de medição funcione é crucial que as medidas de desempenho tenham valor prático (Neely, 1998). Isso significa que elas devem ser simples, análogas às atividades, úteis e fáceis de implementar (Hronec, 1994). Além disso, é essencial reconhecer que diferentes objetivos exigem diferentes medidas de desempenho (Neely, 1998). As medidas de desempenho devem acompanhar as mudanças nos objetivos estratégicos, sendo aprimoradas ou substituídas conforme necessário.

O processo de formulação de uma medida de desempenho deve considerar alguns aspectos importantes. Primeiramente, é necessário definir o título da medida de desempenho, a fórmula de cálculo do índice e a frequência de coleta, compilação e disseminação dos índices. Outro passo é determinar a fonte dos dados e verificar sua confiabilidade. Também é importante identificar a finalidade da medida de desempenho e quem irá utilizá-la (Neely *et al.*, 1995; Martins, 2002).

A Figura 2 ilustra o sistema de medição de desempenho, sobretudo como as medidas individuais bem definidas podem compartilhar interesses e contribuir para o objetivo da excelência operacional.

Figura 2 - Visão sistêmica da medição de desempenho



Fonte: (Neely *et al.*, 1995, p.82).

Diversos autores têm se preocupado em definir critérios para o desenvolvimento de sistemas de desempenho eficientes e eficazes do ponto de vista da gestão estratégica. Globerson (1985) destaca que as medidas dos sistemas de desempenho devem estar baseadas nos objetivos da organização e ser coerentes entre si. Nesse contexto, Neely *et al.* (1995) estabelecem os principais passos para o desenvolvimento de um sistema de medição de desempenho efetivo:

- a) definir claramente a missão da organização;
- b) identificar os objetivos estratégicos em relação à lucratividade, participação de mercado, qualidade, custo, flexibilidade e inovação;
- c) desenvolver os objetivos das áreas funcionais em relação às estratégias;
- d) criar, para cada área funcional, medidas de desempenho que definam a competitividade da empresa em nível operacional;
- e) comunicar os objetivos estratégicos e as respectivas medidas de desempenho para todos os níveis hierárquicos;
- f) assegurar a consistência entre os objetivos estratégicos por meio do sistema de medição de desempenho;
- g) usar feedback do sistema de medição de desempenho para identificar pontos fracos organizacionais, melhorando o posicionamento competitivo;

h) e reavaliar periodicamente a eficácia do sistema de medição de desempenho em relação aos objetivos estratégicos.

Vale destacar que as medidas de desempenho no contexto deste trabalho têm dois objetivos principais: apoiar a atividade de campo da usina para melhorar a eficiência das atuações corretivas; trazer respaldo ao plano de negócios previsto pela cúpula gerencial para garantir que o parque está operando em um nível esperado. Ambos os objetivos citados serão atingidos através do estudo de caso desenvolvido neste trabalho. Antes disso, no entanto, o tópico seguinte aprofunda o conceito de sistema de medição de desempenho no contexto das usinas solares fotovoltaicas, abordando medidas individuais importantes para a literatura e também para a atuação prática nesse setor.

2.8 MEDIÇÃO DE DESEMPENHO EM USINAS SOLARES

As medidas têm um papel importante na orientação de operação da usina solar fotovoltaica, bem como também podem auxiliar a alta gestão na tomada de decisão a médio/longo prazo. Essas decisões podem incluir fatores como a compra de novos componentes, expansão dos parques ou números de ativos, troca de fornecedor, contratação de mão de obra etc.

Outro fator importante é o entendimento de como a usina está desempenhando em termos de geração de energia. Para isso é necessário determinar os eventos de limitação energética impostos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a disponibilidade de geração energética da usina.

Na análise proposta deste estudo de caso, uma medida de desempenho foi abordada com mais relevância:

a) percentual de *strings* faltantes: representa o percentual de *strings* que estão indisponíveis, ou seja, é uma parcela da capacidade do parque que está indisponível para gerar energia, representando uma relação diretamente proporcional (Simão *et al.*, 2024).

Outras medidas de desempenho possuem também grande importância na análise de desempenho de parques solares, no entanto não serão aprofundadas neste estudo e ficam como sugestão para outros trabalhos. São essas:

a) *performance ratio (PR)*: é a razão da energia efetivamente gerada em um dado período pela capacidade instalada do parque multiplicada pela

irradiação (medida em energia MWh por metro quadrado) observada no mesmo período (Urrejola *et al.*, 2016).

- b) indisponibilidade de *trackers*: representa o percentual do tempo que os *trackers* ficaram inoperantes (painéis solares travados). Para ser convertido em perda por energia não-gerada requer uma análise mais complexa, considerando os horários de indisponibilidade e a irradiância solar observada em cada instante (Kuttibay *et al.*, 2020).
- c) indisponibilidade de inversores: representa o percentual do tempo que os inversores apresentaram alarme ou falha, ocasionando uma parada do componente. É importante ressaltar que uma parada de poucos minutos pode resultar em grande perda de geração, já que centenas de *strings* estão conectadas ao circuito de um inversor. Existem muitas razões técnicas para falhas dos inversores em usinas de grande porte (Zeb *et al.*, 2018).

A partir da discussão sobre as medidas de desempenho em usinas solares fotovoltaicas, pode-se prosseguir para o método da pesquisa, em que é explicado o procedimento para análise de *strings* faltantes a partir da corrente das *stringboxes*.

3 METODOLOGIA

Este capítulo traz a classificação da pesquisa, abordando a sua natureza, os objetivos e os procedimentos metodológicos, bem como a apresentação da justificativa de escolha do método. Após isso, é apresentada a empresa estudada e são mostradas as etapas do desenvolvimento da pesquisa a partir de dados e informações reais de uma usina solar fotovoltaica.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa é classificada quanto à sua natureza como aplicada, pois visa obter soluções práticas para a melhoria do desempenho em usinas solares fotovoltaicas, utilizando dados reais e implementando procedimentos diretamente aplicáveis ao campo (Bauer & Gaskell, 2000).

Quanto à abordagem metodológica, a pesquisa é quantitativa, uma vez que analisa dados numéricos coletados das *stringboxes*, utilizando um procedimento desenvolvido especificamente para esse fim. Essa abordagem permite a análise precisa e estatística dos dados para identificar e solucionar problemas de desempenho (Lakatos & Marconi, 1999).

Os objetivos desta pesquisa são descritivos, pois buscam determinar e localizar falhas nas *strings* das *stringboxes*, a fim de instruir melhor a equipe de campo. Essa orientação visa monitorar continuamente o desempenho da usina e propor soluções para otimizar sua eficiência operacional, sendo, portanto, uma aplicação científica relacionada à prática (Gil, 2008). Além disso, por meio da medição contínua de desempenho é possível assegurar a consistência entre os objetivos estratégicos da empresa (Neely *et al.*, 1995), portanto as análises também são de grande importância para o nível gerencial, auxiliando na tomada de decisão, o que também caracteriza o cunho descritivo da pesquisa (Gil, 2008). No entanto, também há elementos exploratórios e explicativos no desenvolvimento da metodologia, pois a pesquisa aborda um tema relativamente novo (análise de desempenho em usinas solares), no qual se busca apresentar uma visão geral sobre o problema, assim como há preocupação em identificar os fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos (Gil, 2008).

Em relação ao procedimento técnico, a pesquisa desenvolvida neste trabalho caracteriza-se como um estudo de campo, focado na análise de desempenho de um parque solar específico. O estudo de caso é uma metodologia de pesquisa amplamente utilizada em estudos aplicados, especialmente quando o objetivo é obter uma compreensão aprofundada de fenômenos complexos em seu contexto real (Yin, 2018).

A escolha do estudo de caso como método de pesquisa se justifica pela necessidade de analisar detalhadamente o desempenho do parque solar em questão, utilizando dados reais coletados ao longo de três anos, em tempo real, diretamente do sistema de monitoramento da empresa. Este método permite uma abordagem holística, essencial para compreender as variáveis envolvidas no desempenho da usina fotovoltaica e as interações entre elas (Stake, 1995). Diferente de outros métodos de pesquisa que podem focar em aspectos mais generalizados, o estudo de caso oferece a profundidade necessária para identificar e analisar as peculiaridades de um cenário específico, o que é crucial para o desenvolvimento de recomendações práticas e aplicáveis (Merriam, 2009).

3.2 EMPRESA X

O estudo de caso foi feito sobre a Empresa X, que está dentre as três maiores empresas do Brasil no setor de geração de energia renovável. Ela conta com alguns conjuntos de parques de geração fotovoltaica que estão distribuídos principalmente na Região Nordeste e Sudeste do Brasil, totalizando aproximadamente 1GW de potência instalada, sendo uma referência na geração atual do país.

Além disso, essa empresa está em constante crescimento há alguns anos e busca adquirir mais ativos eólicos e solares. Por essa razão, ela visa melhorar seus processos de gestão das usinas, tanto em nível operacional (capacidade e disponibilidade de geração de energia) quanto em nível estratégico, para que mantenha seu crescimento sustentável.

Ao início do estudo de caso, a Empresa X não possuía um relacionamento profundo com as equipes de manutenção (considerando que a sede da empresa fica em outra cidade), o que dificultava tanto o trabalho de identificação das necessidades mais urgentes do parque bem como o desenvolvimento de análises pelos engenheiros que não estão presentes na rotina da usina. Vale ressaltar que os dados refletem

comportamentos que são mais bem compreendidos quando se tem um acompanhamento próximo dos acontecimentos que cercam a operação da usina.

Os engenheiros e técnicos que compõem a equipe de manutenção são internos da Empresa X, no entanto, normalmente estão envolvidos com as demandas operacionais do conjunto fotovoltaico, restando pouco tempo para desenvolver análises. Por essa razão são os engenheiros que trabalham na sede da Empresa X que ficam encarregados com o trabalho de analisar o desempenho da usina e trazer informações úteis à equipe operacional, visando otimizar a rotina de manutenção.

De forma geral, no Parque X, as manutenções são realizadas para corrigir problemas previamente identificados. Todavia, esporadicamente, ocorrem campanhas voltadas para problemas que representam grandes perdas energéticas, como a troca de fusíveis abertos em *stringboxes*, aproveitando-se também a oportunidade para realizar checagens dos componentes e manutenções preventivas.

No caso das *stringboxes*, o problema mais comum é a queima (abertura) dos fusíveis, o que implica na abertura do circuito da *string* correspondente ao fusível danificado, e, portanto, essa *string* deixa de contribuir à geração do parque. No entanto, em outros casos pode haver falha nos medidores de corrente, o que pode sugerir um baixo desempenho ao analisar os dados, quando na verdade o desempenho é pleno. Por esse motivo, o relacionamento entre a equipe de campo e a equipe responsável por analisar os dados tem grande importância, garantindo que o fluxo de informação seja consistente e confiável.

No tópico seguinte é abordado como foi feita a coleta de dados juntamente com essa empresa.

3.3 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi feita em parceria com a Empresa X, que disponibilizou o acesso a base de dados de um Parque X, localizado no interior do Estado da Bahia, que foi visitado em agosto de 2024, conforme Figura 3. O Parque X tem capacidade instalada igual a 30 megawatt (MW), ou ainda em termos de energia, pode gerar cerca de 200 megawatt-hora (MWh) de energia elétrica em um dia com boas condições meteorológicas. Nessa base de dados havia registros referentes aos últimos 4 anos de operação da usina, o que garante uma base sólida para fazer análises temporais.

Figura 3 - Visita técnica ao parque X em agosto de 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O processo de medição é estabelecido dentro da usina seguindo todas as normas de segurança dos dados, sendo armazenado no sistema interno em tempo real e replicado em um supervisor a cada 5 segundos, de onde é possível estabelecer um banco de dados para acesso externo. Há vários sensores ao longo do parque para medir diferentes naturezas de dados, como condições meteorológicas, medidas elétricas (tensão, corrente, potência, etc) e dispositivos de alarme. Para o caso estudado neste trabalho, os dados de interesse são as correntes de *stringbox*.

Portanto, as correntes das *stringboxes* foram adquiridas através do banco de dados do Parque X. Como os dados são amostrados a cada 5 segundos, o volume de dados é grande e necessitaria uma alta capacidade de processamento do computador para funcionar. Por isso, os dados foram aquisitados em um intervalo de 10 minutos por amostra com cálculo de interpolação temporal. Essa escolha de cálculo, para atender ao objetivo proposto deste trabalho, pode ser justificada pelos seguintes pontos:

- a) uniformidade dos dados: a interpolação temporal garante que os dados estejam em intervalos regulares, facilitando a comparação entre diferentes valores de corrente das *stringboxes* para os mesmos instantes de tempo;

- b) detecção de padrões e tendências: com dados interpolados uniformemente, torna-se mais simples de identificar padrões de desempenho e variações ao longo do tempo;
- c) média robusta: a interpolação temporal suaviza variações abruptas (por exemplo, que podem ocorrer pela sensibilidade de um sensor ou por uma falha de comunicação) e proporciona uma média mais robusta, o que é essencial para análises com intervalos de tempo relativamente grandes;
- d) consistência na análise meteorológica: como as medições meteorológicas variam continuamente, ter dados em intervalos regulares possibilita a correlação dessas condições com o desempenho das *stringboxes*, o que será comentado com maior afinco durante o desenvolvimento do método a seguir.

Outros dados importantes para a análise também foram fornecidos, como a irradiância solar, a energia gerada, a disponibilidade dos *trackers* e o valor de *setpoint* dos inversores da usina. A importância de cada um desses itens será melhor compreendida ao longo da análise. Portanto, após coletar os dados de forma consistente, prosseguiu-se para o processo de análise dos dados, que será abordado no tópico seguinte.

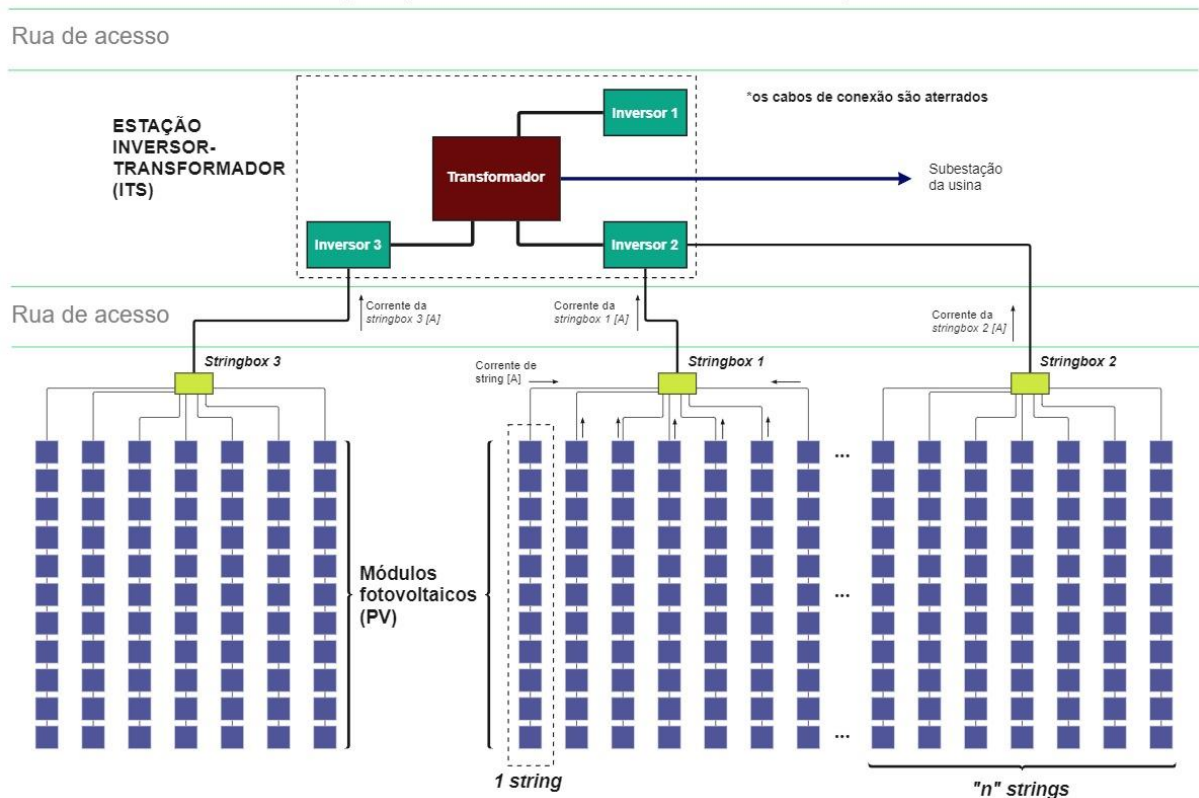
3.4 ANÁLISE DE DADOS

Nesta parte do trabalho será apresentado o procedimento desenvolvido que visa facilitar o trabalho de manutenção e melhorar o desempenho do parque, por meio da análise de *stringboxes*. A partir desta análise, obtém-se o indicador com o número de *strings* que apresentam problema por componente (*stringbox*), bem como a totalização de *strings* faltantes no parque.

O procedimento para analisar o desempenho das *stringboxes*, pautado principalmente na análise dos dados coletados na usina, foi desenvolvido na linguagem de programação *python*, que é uma linguagem mundialmente utilizada no trabalho com dados. Por questões de ética e segurança das informações da Empresa X, o código original não será mostrado neste trabalho, mas o procedimento de análise será comentado de forma detalhada, assim como os resultados também serão apresentados posteriormente.

A Figura 4 representa um recorte da configuração do parque X, com o intuito de apresentar as relações entre *string*, *stringbox* e inversor. Além disso, também permite ao leitor ter uma visualização clara sobre o arranjo dos principais componentes de uma usina solar fotovoltaica. Em geral, uma planta solar pode conter várias estações inversor-transformador (ITSs), replicando o arranjo observado ao longo de quilômetros. Além disso, vale reforçar que os termos *stringbox* (ou *stringboxes*) e *string* (ou *strings*) são repetidos muitas vezes neste procedimento, então é importante que o leitor entenda a diferença entre esses termos para compreender toda a análise.

Figura 4 - Esquema simplificado do parque X
Arranjo simplificado de uma usina solar fotovoltaica da empresa X

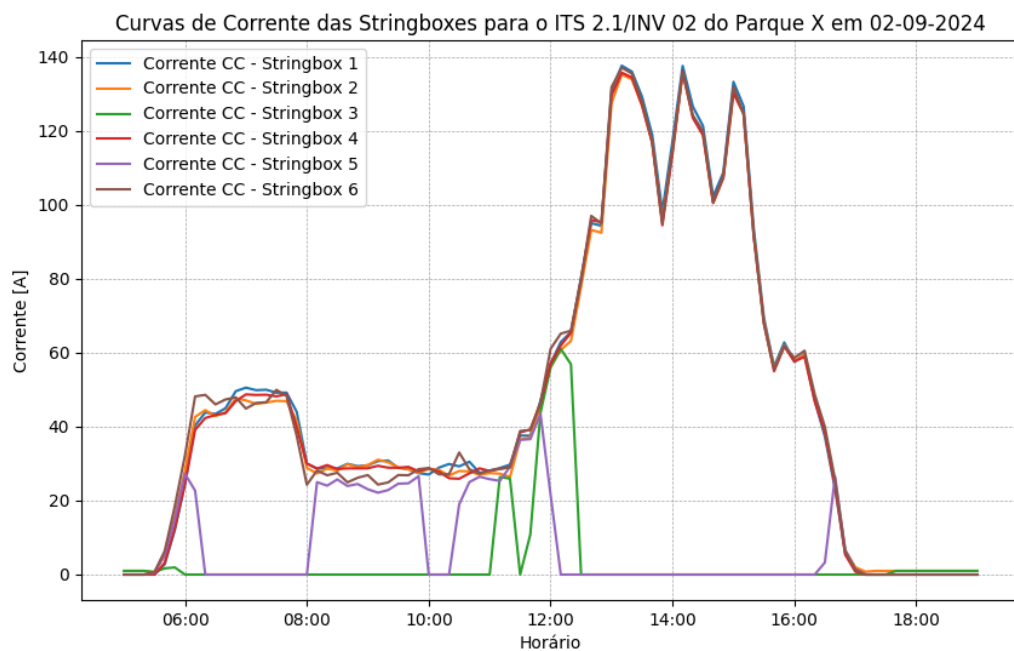


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao iniciar o processo de análise dos dados, uma boa prática é fazer uma exploração inicial para averiguar a qualidade das informações disponíveis, pois pode haver problemas de medição oriundos de falha de comunicação com o sistema, defeito no sensor do componente ou condições climáticas e operacionais não favoráveis (por exemplo dias com muitas nuvens ou com limitações severas de geração impostas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico). Isso acontece com

frequência em dados operacionais de uma usina de grande porte, como pode ser observado na Figura 5, com algumas curvas de corrente chegando a zero em vários instantes de tempo por razão de falhas intermitentes do sinal. Em contraponto, a Figura 6 representa *stringboxes* com boas medições de corrente para o mesmo dia, o que ilustra a dificuldade de comparar o desempenho entre dados com problemas pontuais. Por isso, é necessário realizar o tratamento dos dados antes de prosseguir às etapas seguintes da análise.

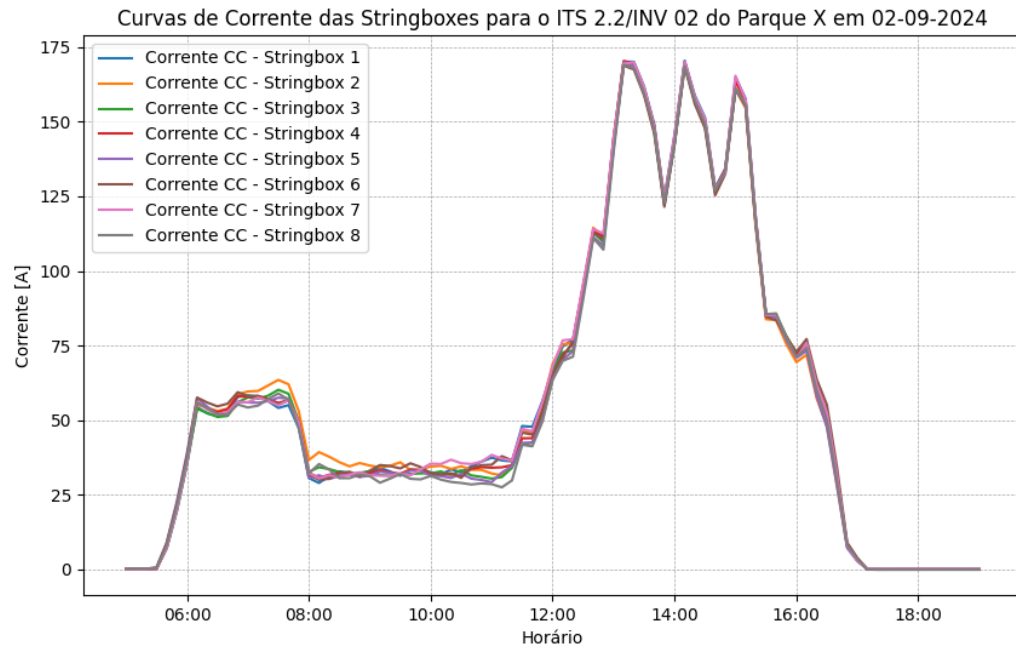
Figura 5 - Curvas de corrente contínua (CC) de *stringboxes* com falhas de sinal



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota: ITS 2.1/ INV 02 representa o código do ITS e inversor, respectivamente, de onde pertencem as conexões das *stringboxes* medidas.

Figura 6 - Curvas de corrente contínua (CC) de *stringboxes* com dados bons

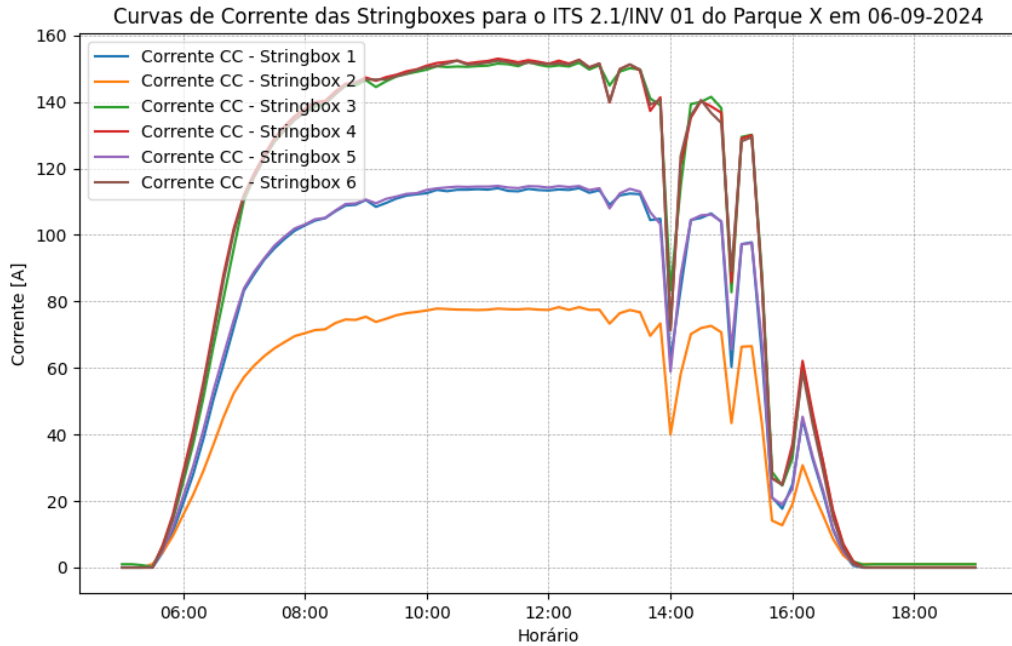


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota: O inversor da Figura 6 contém 8 conexões de *stringboxes*, pois tem uma potência nominal maior que o inversor da Figura 5.

Contudo, algumas premissas que são essenciais para o tratamento de dados nessa pesquisa devem ser explicadas antes. Um fator importante para comparar o desempenho de *stringboxes* (em condições similares de operação) é a quantidade de *strings* que cada *stringbox* possui. Se as *stringboxes* possuem um número igual de *strings*, esse passo pode ser ignorado. Contudo, no caso observado do Parque X, as *stringboxes* podem conter 8, 12 ou 16 *strings*, o que pode ser observado na Figura 7, onde há níveis diferentes de corrente, não por razões de baixo desempenho, mas sim por diferentes condições de operação.

Figura 7 - Curvas de corrente (CC) de *stringboxes* com quantidades diferentes de *strings*



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Legenda: Na figura 7, o menor nível de corrente (em amarelo) representa uma *stringbox* de 8 *strings*, em nível intermediário são *stringboxes* com 12 *strings* e no último nível (maior corrente) são *stringboxes* com 16 *strings*.

Vale ressaltar que esse fato invalidaria uma comparação direta entre correntes observadas em dado período, pois uma medida individual de desempenho deve estar relacionada a apenas uma base de cálculo. Então, nesse caso foi necessário efetuar a normalização de cada medida de corrente de *stringbox* por uma base comum de “n” *strings*.

No caso estudado, a base adotada foi de 16 *strings*, pois era o padrão predominante ao longo do parque. Então, por exemplo, as *stringboxes* que foram observadas com 8 ou 12 *strings* nesta planta, tiveram seus valores de corrente elétrica normalizados, utilizando as relações descritas nas Equações 2 e 3.

$$I_{normalizado} = I_{medido(8\ strings)} \times \left(\frac{16}{8}\right) \quad (\text{Equação 2})$$

$$I_{normalizado} = I_{medido(12\ strings)} \times \left(\frac{16}{12}\right) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde I representa a corrente elétrica de cada *stringbox*.

A Tabela 1 mostra a relação com a quantidade de *strings* por *stringboxes*. Essa informação é vital para o processo de normalização dos dados, o que possibilita o desenvolvimento do método proposto.

Tabela 1 - Relação do número de *strings* pertencentes a cada *stringbox*

Circuito	ITS	Inversor	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9
Circuito 1	ITS11	INV01	12	16	16	16	16	16			
Circuito 1	ITS11	INV02	8	16	16	16	12	16			
Circuito 1	ITS11	INV03	16	16	16	16	16	12			
Circuito 1	ITS12	INV01	16	12	16	12	16	16			
Circuito 1	ITS12	INV02	16	16	16	12	12	16			
Circuito 1	ITS12	INV03	12	16	16	16	16	16			
Circuito 1	ITS13	INV01	8	12	16	16	16	12			
Circuito 1	ITS13	INV02	12	12	16	16	12	12			
Circuito 1	ITS13	INV03	16	12	16	16	12	12			
Circuito 2	ITS21	INV01	12	8	16	16	12	16			
Circuito 2	ITS21	INV02	16	16	16	12	16	8			
Circuito 2	ITS21	INV03	12	16	12	16	16	12			
Circuito 2	ITS22	INV01	16	16	16	16	16	12	16	16	
Circuito 2	ITS22	INV02	16	16	16	16	16	12	12	16	
Circuito 2	ITS23	INV01	12	16	16	16	16	16			
Circuito 2	ITS23	INV02	12	16	16	16	16	16			
Circuito 2	ITS23	INV03	16	16	16	16	16	12			
Circuito 2	ITS24	INV01	16	16	16	16	16	16	16	16	
Circuito 2	ITS24	INV02	16	16	16	16	16	16	16	16	
Circuito 2	ITS24	INV03	12	16	16	16	16	16	16	16	12
Circuito 3	ITS31	INV01	16	16	16	12	16	16			
Circuito 3	ITS31	INV02	16	12	16	16	16	16			
Circuito 3	ITS31	INV03	16	16	16	16	12	16			
Circuito 3	ITS32	INV01	12	16	16	16	16	16			
Circuito 3	ITS32	INV02	16	12	16	12	16	12			
Circuito 3	ITS32	INV03	16	12	16	12	16	16			
Circuito 3	ITS33	INV01	16	12	16	12	16	12			
Circuito 3	ITS33	INV02	16	16	12	16	16	16			
Circuito 3	ITS33	INV03	16	16	16	12	16	16			
Circuito 3	ITS34	INV01	16	16	12	16	16	16			
Circuito 3	ITS34	INV02	16	16	16	16	16	12			
Circuito 3	ITS34	INV03	16	16	16	16	16	12			

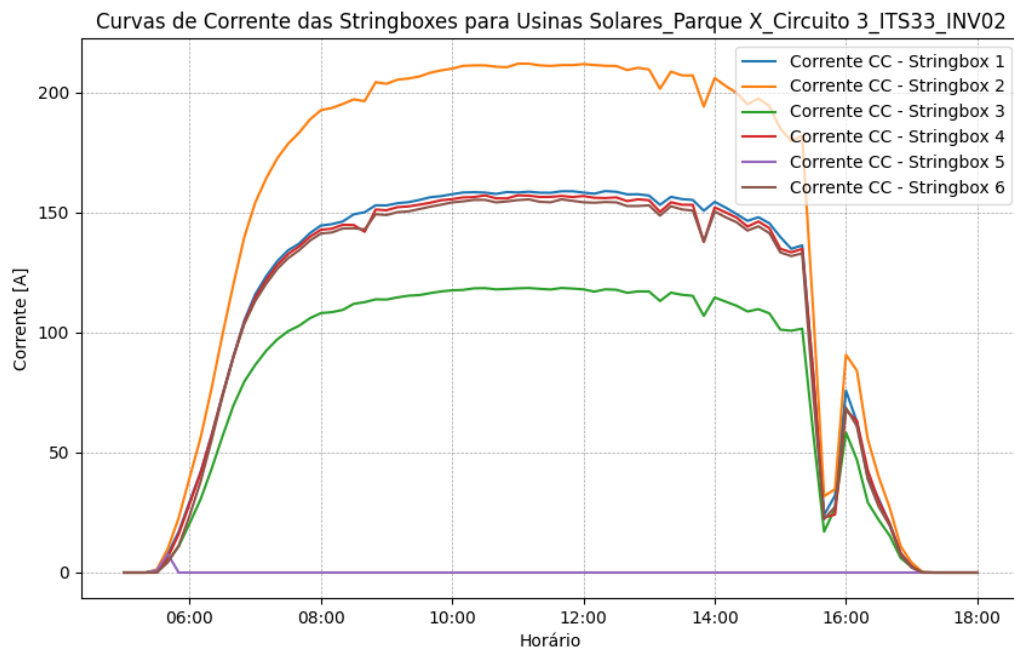
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Notas: *SB* é abreviação para *stringbox*. Alguns inversores possuem mais de 6 *stringboxes* conectadas e por isso são preenchidos com mais campos.

Ao todo o Parque X possui 3 circuitos elétricos principais, nos quais estão presentes 11 ITSs, 32 inversores e 203 *stringboxes*. Cada *string* é formada por 120 módulos fotovoltaicos. Ao realizar a soma de todas *strings* da Tabela 1, chega-se ao número de 3024 *strings*. Ou seja, o Parque X possui um total de 362.880 painéis fotovoltaicos.

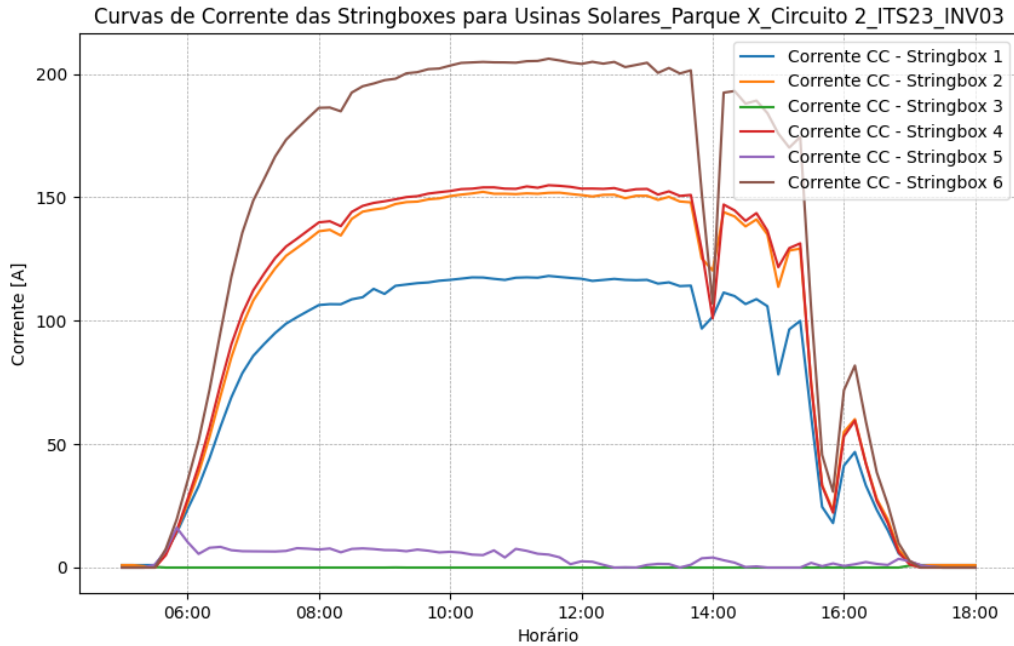
Dando continuidade ao processo de análise exploratória dos dados, notou-se que mesmo após realizar o processo de normalização das curvas de corrente, algumas ainda estavam performando em níveis consideravelmente diferentes. Se fosse somente um desempenho abaixo, isso seria justificável pela ausência de *strings* operando, ou seja, um indício de fusíveis queimados nessas *stringboxes*, o que é o foco central desta análise. Contudo, observou-se que algumas correntes de *stringbox* estavam desempenhando acima do esperado, o que se explica por um erro de medição do sinal ou por haver de fato mais módulos solares conectados a essas *strings* do que se havia conhecimento pela equipe de operação do Parque X. Esses problemas podem ser verificados nas Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 – Curva de corrente da *Stringbox 2* do ITS 33 / Inversor 2 acima do valor nominal



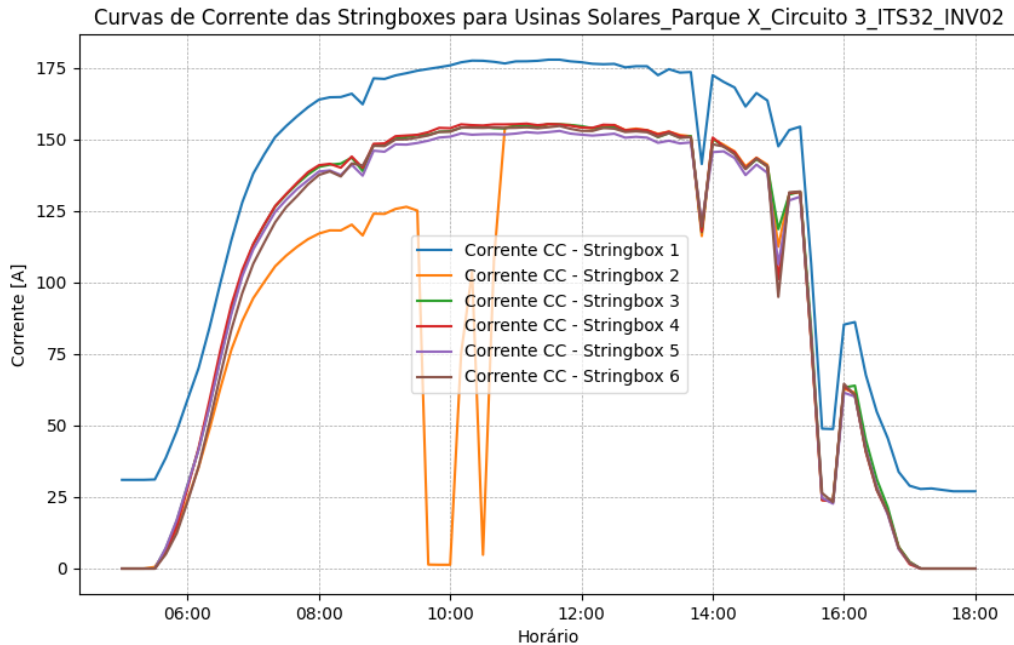
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 9 - Curva de corrente da *Stringbox* 6 do ITS 23 / Inversor 3 acima do valor nominal



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 10 - Curva de corrente da *Stringbox* 1 do ITS 32 / Inversor 2 acima do valor nominal



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Notas: Essa ITS e Inversor em específico aparenta ter problemas de sinal, pois a curva azul está deslocada para cima na origem. Além disso, a curva de outra *stringbox* (amarela) também apresenta problemas com quedas repentinas na medição.

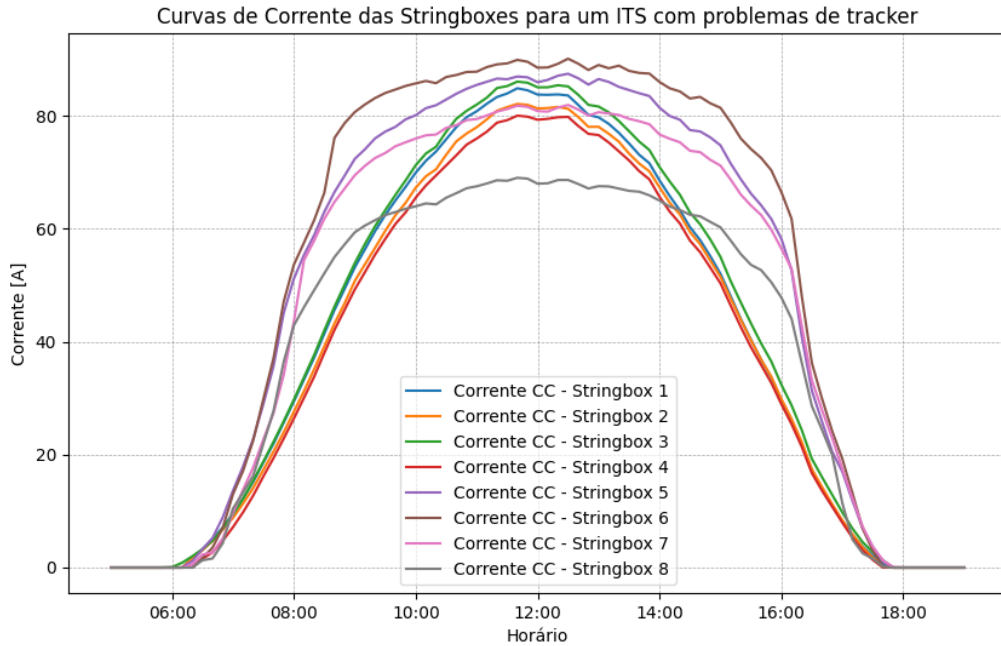
É importante ressaltar que o cálculo de desempenho de uma *stringbox* será feito no algoritmo central desta análise, comparando a sua corrente observada com

as demais, portanto correntes superestimadas podem influenciar de forma significativa o resultado obtido. Para impedir que essas curvas de corrente superestimadas interfiram no resultado da análise, 3 *stringboxes* específicas foram expurgadas do procedimento, sendo estas: *Stringbox* 6 do ITS 23 / Inversor 3; *Stringbox* 1 do ITS 32 / Inversor 2; *Stringbox* 2 do ITS 33 / Inversor 2.

Outra consideração relevante que deve ser esclarecida se trata do horário definido para analisar os dados. Sabe-se que uma usina fotovoltaica solar opera enquanto há luz solar disponível, no entanto, esta análise levou em conta um horário limitado entre 11:00 e 13:00 horas. A razão disso é eliminar a influência dos *trackers* sobre o cálculo de desempenho, pois nesse horário os painéis devem estar posicionados próximos a 0° com o sol em posição aproximada de meio-dia. Como as *strings* com problemas de *tracker* normalmente são mantidas em posição 0° pela equipe de manutenção, isso garante que havendo *strings* com *trackers* defeituosos, estas estarão submetidas às mesmas condições de irradiação solar em relação as *strings* que acompanham o movimento do sol (exclusivamente nesta faixa de horário). Vale ressaltar que essa consideração é feita, pois o foco desta análise é monitorar perdas associadas somente a *strings* faltantes, e, além disso, não seria uma boa prática comparar correntes de *stringboxes* que estão submetidas a condições distintas de operação, pois isso invalidaria a lógica do procedimento em questão.

Na Figura 11, podemos observar a diferença notável nas curvas de corrente das *stringboxes* devido a problemas com *trackers*, em que uma curva mais larga indica que há *trackers* funcionando, enquanto uma curva mais estreita representa a ausência de *trackers* (painéis parados ao longo do dia). A razão desse comportamento é que um módulo que acompanha a direção do sol consegue manter a incidência de luz solar direta por mais tempo.

Figura 11 - Curvas de corrente (CC) das *stringboxes* com problemas de *tracker*



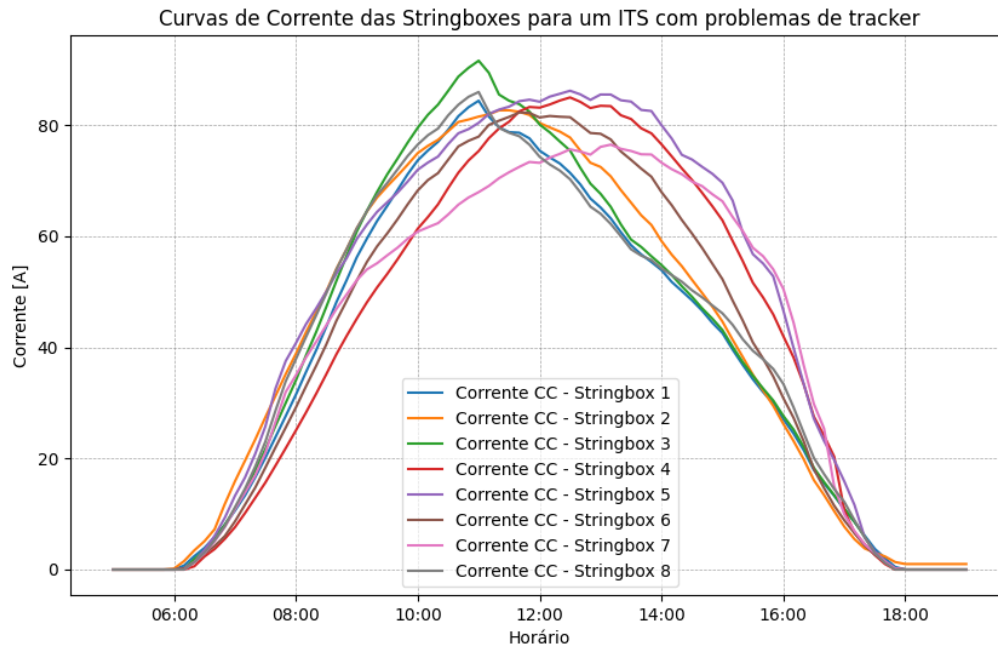
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota: As curvas de corrente foram medidas em um dia ensolarado sem nuvens, ocasião ideal para observar o comportamento das curvas sem ruídos.

Ainda sobre a Figura 11, observa-se que ao meio-dia a maioria das *stringboxes* passam a operar em nível aproximado, pois é o momento que todos os módulos estão posicionados em 0° . Apenas a *Stringbox* 8, que provavelmente está com desempenho abaixo devido a *strings* faltantes, encontra-se mais distante no momento de pico.

Vale ressaltar que a única exceção à premissa a qual todos os módulos devem estar em 0° em horário próximo ao meio-dia, surge na ocasião em que ocorre um defeito de *tracker* no período da manhã, o que resulta em algumas *strings* travadas em ângulos diferentes de 0° ao longo do dia quando não há rápida intervenção da equipe de manutenção. Esse efeito pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Curvas de corrente (CC) das *stringboxes* para um ITS com painéis travados



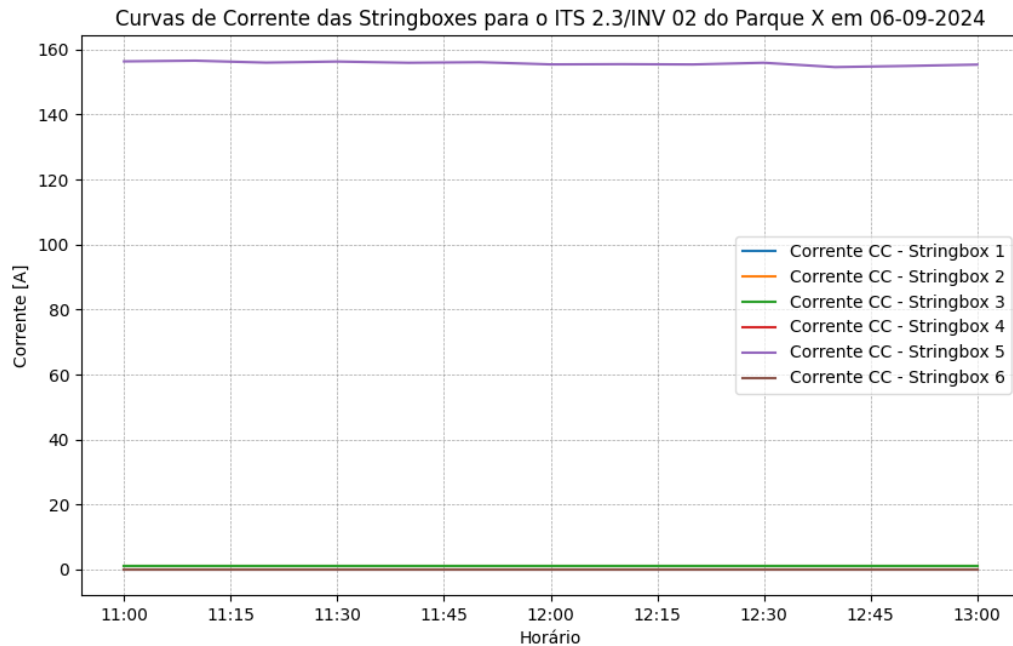
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Notas: Uma evidência de painéis travados por mal funcionamento dos *trackers* são curvas de corrente com picos defasados no tempo. Outra característica é o perfil diferente das curvas.

Para o caso estudado, o horário definido entre 11:00 e 13:00 horas foi suficiente para uma análise apropriada, pois a disponibilidade operacional dos *trackers* do Parque X estava em 98% (monitorada pela equipe em campo através de um sistema automático), então o efeito da Figura 12 não pôde ser observado. Ainda assim, vale ressaltar que caso esse efeito fosse significativo, seria necessário avaliar o resultado da análise de forma crítica considerando tais problemas.

Após ser realizada a filtragem dos dados para o horário ideal e prosseguir-se com a exploração dos dados, foi observado que algumas correntes de *stringbox* apresentavam apenas valores constantes em zero, próximos de zero ou até mesmo valores negativos, conforme a Figura 13. Aos valores negativos foi atribuído zero para simplificar a visualização.

Figura 13 - Curvas de corrente (CC) das *stringboxes* com problema contínuo nos dados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota: Para o ITS 2.3/INV 02, apenas a *Stringbox* 5 apresentou uma medição adequada de corrente nesse dia.

Em reunião com as equipes de campo, verificou-se que as *strings* pertencentes a essas *stringboxes* funcionavam normalmente, confirmando ser apenas um problema de medição ou de comunicação da usina com o banco de dados externo. Além disso, segundo os colaboradores experientes da usina estudada, não era comum que muitas *stringboxes* apresentassem um número elevado de *strings* com problema, pois eles realizavam campanhas rotineiras de checagem das *stringboxes* e troca de fusíveis queimados, ainda que sem uma instrução exata dos pontos mais críticos.

Vale ressaltar que neste caso estudado, há um fusível de proteção para cada *string*, ou seja, o número de fusíveis queimados equivale ao número de *strings* faltantes. Contudo, essa relação pode ser diferente em outras usinas solares, por isso a visita presencial ao parque é essencial para obter tais informações.

O tratamento dos dados na análise de *stringbox* foi feito utilizando medidas estatísticas (desvio padrão e mediana) para identificar os valores *outliers* ou valores contínuos ruins, provenientes de medições com problema. Para isso, calculou-se a mediana e o desvio padrão de todas as amostras para cada intervalo de tempo, obtendo-se essas medidas a cada 10 minutos. Após isso, corrigiu-se os valores que

eram iguais a 0 ou que diferiam mais de dois desvios padrão do valor de referência (mediana calculada) em cada intervalo de tempo, sendo o valor corrigido igual a mediana calculada para os respectivos intervalos de tempo.

A razão de utilizar dois desvios padrão é assegurar que apenas valores com falhas de sinal (*outliers*) serão tratados. Contudo, pode haver algum caso de exceção no qual uma *stringbox* apresente a maioria das *strings* fora e neste cenário o tratamento utilizado seria indevido. Por isso, o processo de análise de dados exige que seja feita uma análise exploratória gráfica inicial para verificar esse tipo de comportamento. Além disso, todos os valores tratados são registrados e serão apresentados no resultado deste trabalho como um percentual de falhas de medição.

Na Tabela 2 é exemplificado o processo de tratamento de dados para as correntes de *stringbox* do ITS 23, Inversor 02.

Tabela 2 - Exemplo de tratamento dos dados por mediana e desvio padrão

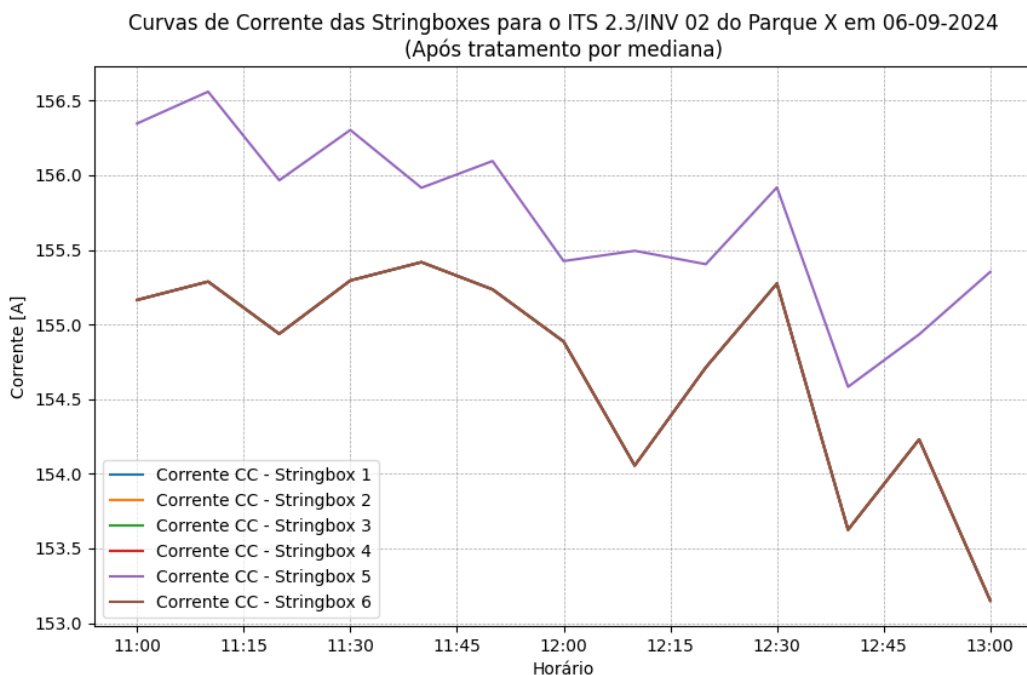
Dia/hora	ITS - Inversor	Stringbox id	CC mediana	Mediana (M)	Desvio padrão (s)	M - 2s	M + 2s	CC tratada	Dado foi tratado ?
06/09/2024 11:00:00	ITS23/INV02	Stringbox 1	0	155,16	53,45	48,26	262,06	155,16	Sim
06/09/2024 11:00:00	ITS23/INV02	Stringbox 2	1	155,16	53,45	48,26	262,06	155,16	Sim
06/09/2024 11:00:00	ITS23/INV02	Stringbox 3	1	155,16	53,45	48,26	262,06	155,16	Sim
06/09/2024 11:00:00	ITS23/INV02	Stringbox 4	0	155,16	53,45	48,26	262,06	155,16	Sim
06/09/2024 11:00:00	ITS23/INV02	Stringbox 5	156,35	155,16	53,45	48,26	262,06	156,35	Não
06/09/2024 11:00:00	ITS23/INV02	Stringbox 6	0	155,16	53,45	48,26	262,06	155,16	Sim
06/09/2024 11:10:00	ITS23/INV02	Stringbox 1	0	155,29	53,54	48,21	262,37	155,29	Sim
06/09/2024 11:10:00	ITS23/INV02	Stringbox 2	1	155,29	53,54	48,21	262,37	155,29	Sim
06/09/2024 11:10:00	ITS23/INV02	Stringbox 3	1	155,29	53,54	48,21	262,37	155,29	Sim
06/09/2024 11:10:00	ITS23/INV02	Stringbox 4	0	155,29	53,54	48,21	262,37	155,29	Sim
06/09/2024 11:10:00	ITS23/INV02	Stringbox 5	156,56	155,29	53,54	48,21	262,37	156,56	Não
06/09/2024 11:10:00	ITS23/INV02	Stringbox 6	0	155,29	53,54	48,21	262,37	155,29	Sim
06/09/2024 11:20:00	ITS23/INV02	Stringbox 1	0	154,94	53,43	48,08	261,8	154,94	Sim
06/09/2024 11:20:00	ITS23/INV02	Stringbox 2	1	154,94	53,43	48,08	261,8	154,94	Sim
06/09/2024 11:20:00	ITS23/INV02	Stringbox 3	1	154,94	53,43	48,08	261,8	154,94	Sim
06/09/2024 11:20:00	ITS23/INV02	Stringbox 4	0	154,94	53,43	48,08	261,8	154,94	Sim
06/09/2024 11:20:00	ITS23/INV02	Stringbox 5	155,97	154,94	53,43	48,08	261,8	155,97	Não
06/09/2024 11:20:00	ITS23/INV02	Stringbox 6	0	154,94	53,43	48,08	261,8	154,94	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota: O exemplo contém 3 amostras no tempo para cada *stringbox*.

Esse procedimento tem como objetivo corrigir dados com valores inapropriados, de forma a minimizar a interferência desses dados no resultado da análise. Vale lembrar que a mediana representa a tendência do conjunto de dados, e a premissa de trabalhar com valores normalizados de corrente, garante que, idealmente, as curvas das correntes das *stringboxes* devem estar em um nível próximo, com exceção àquelas que apresentam problemas reais (fusíveis queimados). As curvas após o tratamento podem ser observadas na Figura 14.

Figura 14 - Curvas de corrente (CC) das *stringboxes* após tratamento dos dados



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota: As curvas estão em escala aproximada, diferentemente da Figura 10.

Contudo, é evidente que em um cenário hipotético no qual os problemas de medição representam um percentual bastante significativo sobre o conjunto de dados, essa técnica de tratamento dos dados pela mediana seria inválida, pois não representaria mais a tendência real da medida (sobre o conjunto). Nesse caso, uma alternativa possível seria expurgar os dados inapropriados da análise. Ainda assim, isso poderia gerar outros problemas que serão compreendidos melhor no decorrer da explicação desta análise.

Após realizar o tratamento apropriado nos dados e levando em consideração as premissas já comentadas, pode-se prosseguir para o desenvolvimento do algoritmo central desta análise, a ser abordado na seção seguinte.

3.4.1 Algoritmo

A variável de entrada a ser utilizada no algoritmo é a corrente elétrica (CC) que passa por cada *stringbox*, considerando que o tratamento sobre os dados já foi realizado. Pode-se observar uma *stringbox* do Parque X na Figura 15 (denominada “SINBOX” pelo fabricante), onde a corrente mencionada flui através dos dois cabos de maior diâmetro na parte de baixo e que estão conectados ao inversor. Já nos cabos de menor diâmetro é por onde vêm a corrente das *strings* (dos painéis fotovoltaicos). O intervalo de tempo estabelecido na análise foi um período semanal (de segunda a domingo), assim como é definido o planejamento de operação da usina e as reuniões para discutir os pontos de melhoria.

Figura 15 - Caixa de combinação das correntes de *strings* (*stringbox*)



Fonte: Autor (2024).

O primeiro passo do algoritmo então é comparar o desempenho de corrente das *stringboxes* que estão conectadas ao mesmo inversor. O fato de pertencerem ao circuito do mesmo inversor garante que essas estejam mais próximas e sujeitas a condições similares no espaço da usina (tais como irradiância solar, nível de

vegetação e nível de sujeira sobre os painéis). Outra possível condição de erro na análise, como o trackeamento³ dos módulos fotovoltaicos, já foi descartada de acordo com as premissas consideradas no tratamento dos dados.

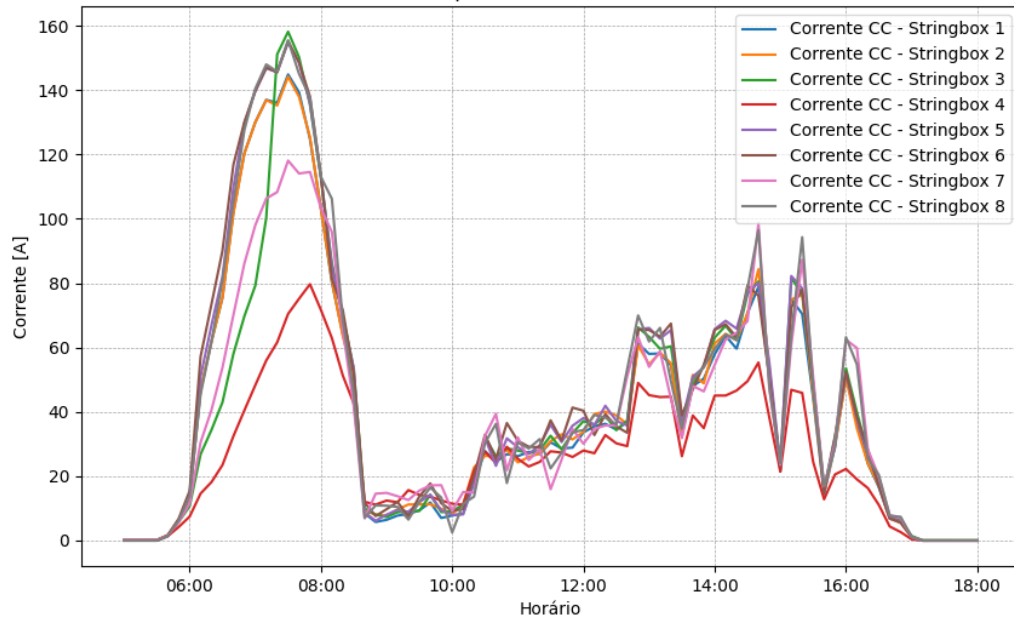
Para fazer a comparação do desempenho das correntes é necessário fazer a média das amostras disponíveis. Vale lembrar que o horário considerado foi entre 11 e 13 horas, e como as amostras estão disponíveis a cada 10 minutos, obteve-se 13 amostras por *stringbox* e por dia analisado. Em um intervalo de 7 dias, totalizou-se 91 amostras por *stringbox*.

No entanto, os dias com limitações severas de geração do ONS, foram desconsiderados desse cálculo, porque os níveis de corrente de grande parte das *stringboxes* atingem valores muito baixos. Foram considerados apenas dias em que o *setpoint* de potência médio dos inversores ficou acima de 0,5 MW. Vale ressaltar que a potência nominal média dos inversores do Parque X é 1 MW, ou seja, o limite estabelecido considerou dados em que no mínimo 50% da capacidade nominal dos inversores estava disponível, o que proporcionou resultados satisfatórios. O efeito de instabilidade gerado sobre os dados após uma sequência de limitações severas pode ser observado na Figura 16.

³ O termo “trackeamento”, derivado da palavra inglesa “*tracker*”, é comumente utilizado no Brasil para referir-se à condição de movimento dos painéis (*strings*) de acordo com a direção do Sol.

Figura 16 - Dados instáveis em dia com severas limitações de potência

Curvas de Corrente das Stringboxes para o ITS 2.2/INV 01 do Parque X em 08-09-2024
Setpoint médio = 26,74%



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Assim, foram descartados os dias 2 e 8 de setembro, pois o *setpoint* de potência médio dos inversores não atendeu a essa condição. Dessa forma, foram consideradas 65 amostras válidas por *stringbox* em todo o período analisado.

Portanto, a partir das amostras válidas, obtém-se a média diária de corrente de cada *stringbox* (no intervalo entre 11h e 13h). Através dessa medida calculada, as *stringboxes* podem ser avaliadas comparativamente. Vale ressaltar que haverá uma média diária de corrente diferente para cada dia, pois uma *stringbox* pode apresentar um novo problema ou ter um problema solucionado pela equipe de manutenção durante o intervalo de tempo analisado, por isso é importante acompanhar a evolução de *strings* faltantes ao longo do tempo.

Então, escolhe-se o máximo valor de corrente (dentro os valores já em médias diárias) de *stringbox* observado em cada inversor. Cada um dos valores máximos representará a base de corrente por unidade, ou seja, $I_{BASE} = 1$. Os outros valores de corrente serão representados como um percentual desse valor. Por essa razão, durante o tratamento dos dados os valores que apresentavam falhas de medição foram corrigidos, de tal modo que a comparação entre correntes de *stringbox* de um mesmo inversor não fosse prejudicada pela falta de dados.

Em posse dos valores máximos de corrente para cada dia, transforma-se os valores de corrente de todas *stringboxes* para o sistema por unidade (PU), conforme a Equação 1. Essa transformação é feita dividindo-se o valor real medido pelo valor estipulado como base, conforme Equação 4.

$$I_{PU} = \frac{I_{medido}}{I_{BASE}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde I representa a corrente elétrica.

Portanto, as correntes são transformadas para o sistema por unidade, e o desempenho é medido a partir desses percentuais. Esse sistema permite que o percentual de corrente encontrado indique diretamente a presença de baixo desempenho, ou seja, *strings* faltantes. Por exemplo, seja um inversor X pertencente a um ITS Y, com *stringboxes* SB1, SB2, SB3, SB4, SB5 e SB6, no 1º dia analisado, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo prático da transformação de corrente PU e cálculo de *strings* faltantes

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	Valor Base
Valores de corrente em Ampere	158,5	128	159	158,2	159,1	160	160
Valores de corrente em PU	0,99	0,80	0,99	0,99	0,99	1,00	1,00
Número de <i>strings</i> esperado	16	12	16	12	16	16	N/A
Número de <i>strings</i> faltantes	0	2	0	0	0	0	N/A

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por esse exemplo, nota-se que SB2 apresenta um subdesempenho de 20%, o que equivale a um número de 2 *strings* inoperantes. Esse número de *strings* faltantes pode ser calculado por meio do cálculo apresentado na Equação 5.

$$\text{Strings faltantes} = N \times (1 - I_{PU}) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde I representa a corrente elétrica, N representa o número esperado de *strings* operantes.

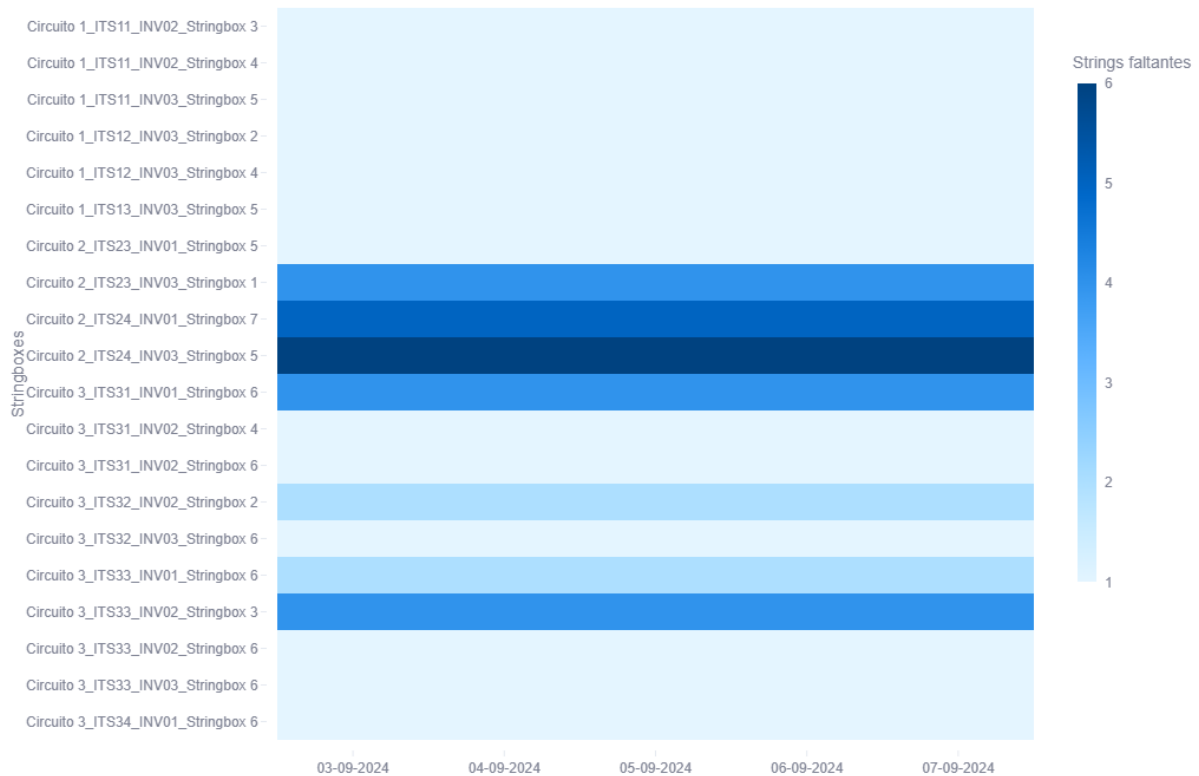
Portanto, o último passo do algoritmo consiste em encontrar um número equivalente de *strings* faltantes, de acordo com o nível de desempenho observado em cada *stringbox* ao longo do período em análise. Para isto, uma *string* faltante é considerada de fato com problema (possível fusível queimado) quando esse resultado se repete durante no mínimo 3 dias consecutivos no algoritmo. Para outros valores de *strings* faltantes que oscilam ligeiramente ao longo do tempo analisado é atribuído o valor que se repete em mais de 50% do tempo (condição dominante do algoritmo) ou a média a cada intervalo de 3 dias. Isso garante que o resultado está estável, o que é esperado pelo comportamento real de problemas com *strings* que é observado em campo. Por questões de sigilo de uma informação confidencial da Empresa X, o algoritmo não será apresentado neste documento.

4 RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados do procedimento realizado de análise de dados para encontrar o número de *strings* faltantes no Parque X em um dado momento, bem como o percentual de indisponibilidade dessas *strings* a nível usina. Mostra-se a lista de *strings* segundo um critério de priorização para a equipe de campo para solucionar tais problemas de forma eficiente. Apresenta-se a perda estimada de geração de energia devido a *strings* faltantes, bem como a estimativa financeira dessa perda.

A análise abrangeu o período de 2 a 8 de setembro de 2024, escolhido devido às condições meteorológicas favoráveis observadas durante esses dias, caracterizadas por céu claro com poucas nuvens, conforme os dados de irradiância solar. Essa estabilidade nas condições climáticas resultou em menores oscilações nos dados, aumentando a precisão dos resultados. Vale ressaltar que, quanto mais constantes os dados, maior a precisão da análise. No entanto, o baixo desempenho de algumas *stringboxes* devido a *strings* faltantes também pode ser observado em dias nublados, especialmente quando há muitas *strings* fora.

Primeiramente, pode-se acompanhar o estado das *strings* faltantes ao longo do tempo, por meio de um mapa de calor na Figura 17.

Figura 17 - Mapa de calor de *strings* faltantes em uma semana analisada

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As descrições das *stringboxes* do eixo y especificam aquelas que contém *strings* faltantes. As *stringboxes* que não possuem *strings* faltantes não são exibidas no mapa de calor. Apenas são mostrados os dias sem limitação severa de geração pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. A partir do valor de *strings* faltantes encontrado para cada *stringbox* ao longo dos dias, foi considerado como valor representativo para o período analisado, a média desses valores com arredondamento para números inteiros. Como o intervalo de análise é curto, os valores já se apresentaram constantes na Figura 14, então nesse caso, a média retornou o mesmo resultado visualizado. Isso significa que nesse período não surgiram novas *strings* faltantes, assim como também não houve reparo de uma *string* com problema.

Os resultados foram conferidos com a equipe de campo responsável pelas rotinas de manutenção, e todas as observações registradas na Tabela 4 representavam problemas reais de fusíveis queimados.

Tabela 4 – Resultado médio de *strings* faltantes para uma semana de análise

Circuito	ITS	Inversor	Stringbox id	Strings faltantes
Circuito 1	ITS11	INV02	Stringbox 3	1
Circuito 1	ITS11	INV02	Stringbox 4	1
Circuito 1	ITS11	INV03	Stringbox 5	1
Circuito 1	ITS12	INV03	Stringbox 2	1
Circuito 1	ITS12	INV03	Stringbox 4	1
Circuito 1	ITS13	INV03	Stringbox 5	1
Circuito 2	ITS23	INV01	Stringbox 5	1
Circuito 2	ITS23	INV03	Stringbox 1	4
Circuito 2	ITS24	INV01	Stringbox 7	5
Circuito 2	ITS24	INV03	Stringbox 5	6
Circuito 3	ITS31	INV01	Stringbox 6	4
Circuito 3	ITS31	INV02	Stringbox 4	1
Circuito 3	ITS31	INV02	Stringbox 6	1
Circuito 3	ITS32	INV02	Stringbox 2	2
Circuito 3	ITS32	INV03	Stringbox 6	1
Circuito 3	ITS33	INV01	Stringbox 6	2
Circuito 3	ITS33	INV02	Stringbox 3	4
Circuito 3	ITS33	INV02	Stringbox 6	1
Circuito 3	ITS33	INV03	Stringbox 6	1
Circuito 3	ITS34	INV01	Stringbox 6	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além disso, a prioridade de atuação foi definida por ITS, pois as *stringboxes* estão mais próximas e assim a movimentação dos mantenedores é reduzida. O critério definido foi a razão entre a soma de *strings* faltantes pela contagem de *stringboxes*, estabelecendo assim uma métrica que prioriza a intervenção mais rápida (com menos deslocamento e números de atuações em *stringboxes*) e efetiva (proporcionalmente impacta mais *strings*). Portanto, a lista de priorização neste caso é apresentada na Tabela 5, em que a prioridade é definida pelo maior critério.

Tabela 5 – Prioridade de atuação da equipe de campo

ITS	Soma de Strings faltantes	Contagem de Stringboxes	Critério
ITS24	11	2	5,5
ITS23	5	2	2,5
ITS33	8	4	2
ITS31	6	3	2
ITS32	3	2	1,5
ITS11	3	3	1
ITS12	2	2	1
ITS34	1	1	1
ITS13	1	1	1
Total Geral	40	20	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A clareza das instruções é de extrema importância para a equipe mantenedora. Conforme relatos dos colaboradores da Empresa X, frequentemente há mais trabalho a ser realizado do que horas-homem disponíveis. Por isso, é crucial realizar uma priorização dos reparos para otimizar o tempo disponível. Após realizar a priorização das *strings* faltantes por ITS, a instrução de atuação foi realizada de acordo com a Tabela 6, já ordenada de acordo com o critério.

Tabela 6 - Ordem de atuação nas *stringboxes*

Circuito	ITS	Inversor	Stringbox id	Strings faltantes
Circuito 2	ITS24	INV03	Stringbox 5	6
Circuito 2	ITS24	INV01	Stringbox 7	5
Circuito 2	ITS23	INV03	Stringbox 1	4
Circuito 2	ITS23	INV01	Stringbox 5	1
Circuito 3	ITS31	INV01	Stringbox 6	4
Circuito 3	ITS33	INV02	Stringbox 3	4
Circuito 3	ITS33	INV01	Stringbox 6	2
Circuito 3	ITS31	INV02	Stringbox 4	1
Circuito 3	ITS31	INV02	Stringbox 6	1
Circuito 3	ITS33	INV02	Stringbox 6	1
Circuito 3	ITS33	INV03	Stringbox 6	1
Circuito 3	ITS32	INV02	Stringbox 2	2
Circuito 3	ITS32	INV03	Stringbox 6	1
Circuito 1	ITS11	INV02	Stringbox 3	1
Circuito 1	ITS11	INV02	Stringbox 4	1
Circuito 1	ITS11	INV03	Stringbox 5	1
Circuito 1	ITS12	INV03	Stringbox 2	1
Circuito 1	ITS12	INV03	Stringbox 4	1
Circuito 1	ITS13	INV03	Stringbox 5	1
Circuito 3	ITS34	INV01	Stringbox 6	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A partir da instrução fornecida a equipe foi motivada a ir a campo para realizar a troca dos fusíveis queimados e checagem de outros possíveis problemas que poderiam estar causando baixo desempenho das *stringboxes*. Observou-se que os fusíveis queimados eram de fato a causa das *strings* faltantes, restaurando-as à normalidade após a atuação corretiva. No entanto, essa atuação levou 15 dias para acontecer desde a identificação do problema

Pode-se observar que o número total de *strings* faltantes para essa semana analisada foi de 40 *strings*. Além disso, houve também correntes de *stringboxes* com

falhas de medição que passaram por um tratamento de dados no tópico anterior e foram registradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados de corrente de *stringbox* que foram tratados

(continua)

Localização	Stringbox id	Contagem de amostras tratadas
Parque X\Circuito 1\ITS11\INV03	Stringbox 3	65
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV01	Stringbox 1	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV01	Stringbox 2	3
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV01	Stringbox 3	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV01	Stringbox 4	65
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV01	Stringbox 5	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV01	Stringbox 6	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV02	Stringbox 1	3
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV02	Stringbox 2	3
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV02	Stringbox 3	3
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV02	Stringbox 4	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV02	Stringbox 5	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV02	Stringbox 6	65
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV03	Stringbox 1	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV03	Stringbox 2	3
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV03	Stringbox 3	65
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV03	Stringbox 4	4
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV03	Stringbox 5	65
Parque X\Circuito 1\ITS12\INV03	Stringbox 6	4
Parque X\Circuito 1\ITS13\INV01	Stringbox 3	65
Parque X\Circuito 1\ITS13\INV02	Stringbox 3	65
Parque X\Circuito 1\ITS13\INV02	Stringbox 6	10
Parque X\Circuito 1\ITS13\INV03	Stringbox 3	64
Parque X\Circuito 2\ITS21\INV02	Stringbox 3	65
Parque X\Circuito 2\ITS21\INV02	Stringbox 5	65
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV01	Stringbox 6	65
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV02	Stringbox 1	65
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV02	Stringbox 2	64
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV02	Stringbox 3	64
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV02	Stringbox 4	65
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV02	Stringbox 6	65
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV03	Stringbox 3	64
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV03	Stringbox 5	64
Parque X\Circuito 2\ITS23\INV03	Stringbox 6	65
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV01	Stringbox 1	1
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV01	Stringbox 2	1
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV01	Stringbox 6	1
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV01	Stringbox 8	2
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV02	Stringbox 1	1

(conclusão)

Localização	Stringbox id	Contagem de amostras tratadas
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV02	Stringbox 2	1
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV02	Stringbox 3	1
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV02	Stringbox 4	1
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV02	Stringbox 5	1
Parque X\Circuito 2\ITS24\INV02	Stringbox 8	1
Parque X\Circuito 3\ITS31\INV01	Stringbox 2	64
Parque X\Circuito 3\ITS32\INV01	Stringbox 5	65
Parque X\Circuito 3\ITS32\INV02	Stringbox 1	65
Parque X\Circuito 3\ITS33\INV02	Stringbox 2	65
Parque X\Circuito 3\ITS33\INV02	Stringbox 5	65
Parque X\Circuito 3\ITS34\INV01	Stringbox 2	65
Parque X\Circuito 3\ITS34\INV01	Stringbox 3	63
Parque X\Circuito 3\ITS34\INV02	Stringbox 6	65
Parque X\Circuito 3\ITS34\INV03	Stringbox 4	64

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nota-se que uma parcela considerável das *stringboxes* tiveram a totalidade (ou bem próximo disso) das amostras tratadas para os dias analisados. Em contrapartida, há um subconjunto desses dados que apresenta outro comportamento, com poucas amostras tratadas, observando-se um máximo de 10 amostras tratadas na *Stringbox 6* do ITS 13 – Inversor 02. Esse fato pode ser explicado pela diferença na causa do problema que afeta os dados. No primeiro caso, ocorre problema de comunicação constante com o banco de dados (exemplo apresentado na Figura 10) ou o medidor de corrente não funciona. Já no segundo caso, ocorrem falhas pontuais de medição no sinal de corrente (exemplo apresentado na Figura 5), que podem indicar um mal funcionamento do sensor em caso de grande frequência observada.

Na Tabela 8, apresenta-se o percentual de amostras que receberam tratamento, com as respectivas causas possíveis do problema observado.

Tabela 8 – Percentual de amostras tratadas por tipo de problema e total

	Contagem	Percentual
Total de amostras analisadas	13130	100%
Amostras com possível problema de comunicação	1811	13,79%
Amostras com falhas intermitentes de sinal	72	0,55%
Amostras tratadas	1883	14,34%
Amostras não tratadas	11247	85,66%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Percebe-se que as amostras tratadas representam um percentual grande sobre o conjunto de dados, atingindo quase 15%. No entanto, como esses valores foram substituídos pela mediana no procedimento de análise dos dados, a interferência desses dados sobre o resultado final é minimizada. Ainda assim, o desafio é compreender e solucionar as causas desses problemas de medição, pois pode haver *strings* faltantes nas *stringboxes* que não foram identificadas.

A Tabela 9 apresenta a geração total apresentada pelo Parque X na semana analisada. Vale ressaltar, que a geração frustrada é a parcela que seria gerada caso não houvesse uma limitação de energia pela ONS. Essa parcela é calculada baseada em parâmetros de irradiância e desempenho histórico da usina nas últimas semanas, mas não é o foco do trabalho abordar como é feito esse cálculo, pois envolve certa complexidade e esse valor foi obtido diretamente com a Empresa X.

Tabela 9 – Energia medida e frustrada (calculada) no período para o Parque X

Data	Geração medida (MWh)	Geração frustrada (MWh)	Geração total (MWh)
02/09/2024	148,19	122,80	270,99
03/09/2024	291,30	0,00	291,30
04/09/2024	267,18	13,36	280,54
05/09/2024	182,98	35,16	218,14
06/09/2024	275,98	0,00	275,98
07/09/2024	216,48	30,13	246,61
08/09/2024	106,66	103,97	210,63
Total	1488,76	305,43	1794,19

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Convertendo-se a quantidade de 40 *strings* faltantes em perdas de geração de energia, considerando os 7 dias de operação, chega-se a um total aproximado de 24 MWh de perda. Utilizando a tarifa média da energia para o Estado da Bahia de R\$ 0,80 por kWh (COELBA, NEOENERGIA, 2024), e descontando-se o custo médio de transmissão de energia de R\$ 0,35 por kWh, estima-se o contrato de venda da energia gerada em R\$ 0,45 por kWh e calcula-se a perda estimada em reais conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Perda estimada em geração de energia e receita na semana analisada

<i>Strings</i> operando	Geração total acumulada (MWh)	Geração média por <i>string</i> (MWh)	Perda estimada para 40 <i>strings</i> (MWh)	Contrato de energia estimado (R\$/kWh)	Perda estimada em reais
2984	1794,19	0,601270714	24,05082854	R\$ 0,45	R\$ 10.822,87

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Sabendo que as *strings* continuaram inoperantes por mais 15 dias até que as *stringboxes* fossem consertadas e supondo que a capacidade de geração da usina se manteve relativamente constante, a perda estimada em receita devido às *strings* faltantes reportadas seria aproximadamente o triplo da observada na Tabela 10.

Vale ressaltar que antes a Empresa X realizava os cálculos de indisponibilidades de *strings* através de uma planilha, considerando apenas a comparação entre as médias diárias de corrente de *stringboxes* e utilizando um fator de tolerância fixo para expurgar os valores nulos. No entanto, isso não tratava efetivamente os problemas presentes nos dados, visto que não levava em conta as premissas discutidas na seção anterior. Por isso, o cálculo tinha uma incerteza grande.

Além disso, por vezes as equipes de manutenção se deslocavam até *stringboxes* com possíveis *strings* faltantes, indicadas pela equipe que monitorava o desempenho da usina, porém não encontravam problemas de fato. Então, era comum que as *strings* faltantes apontadas na análise fossem falso-positivos, o que gerava certa desconfiança dos mantenedores sobre o processo de análise de dados.

A Tabela 11 mostra a comparação do procedimento desenvolvido nesta pesquisa com o procedimento que era utilizado anteriormente pela Empresa X, com base no indicador de indisponibilidade média de *strings* observado para a mesma semana.

Tabela 11 – Comparação da indisponibilidade de *strings* para cada método para a mesma semana analisada

	Strings totais	Strings faltantes	Indisponibilidade
Método proposto	3024	40	1,32%
Método antigo da Empresa X	3024	91	3,01%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao se comparar o número de *strings* faltantes apontadas pelo método antigo da Empresa X, conclui-se que a diferença é significativa, apresentando erro maior que 100% no indicador de indisponibilidade. Além disso, a imprecisão gerada na identificação das *stringboxes* com *strings* problemáticas, aumentava consideravelmente o tempo de atuação da equipe de manutenção, ou seja, o problema persistia por mais tempo, e conseqüentemente, a receita perdida em decorrência dessa indisponibilidade também era maior que a calculada e apresentada

na Tabela 11. Isso implica dizer que o custo com o método antigo apresentado na Tabela 11 está subestimado, pois não mensura as perdas financeiras com o deslocamento da equipe de manutenção de forma desnecessária. Adicionalmente, a confiança perdida pelos colaboradores sobre o processo de análise das *stringboxes*, somado ao fato de a equipe técnica ser enxuta e possuir outras obrigações rotineiras da usina, resultava em uma atuação menos célere sobre este problema das *strings* faltantes.

Na Tabela 12 é mostrada indisponibilidade média mensal de *strings* observada a partir do mês de abril de 2024, calculada a partir da metodologia deste trabalho.

Tabela 12 - Evolução da indisponibilidade de strings nos últimos meses

Parque X	
Mês referência	Indisponibilidade de <i>strings</i> (%)
abr/24	1,26%
mai/24	1,36%
jun/24	1,92%
jul/24	3,94%
ago/24	1,09%
set/24	0,99%
out/24	1,22%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Reiterando o argumento anterior, sobre a lentidão no processo de manutenção das *strings* indisponíveis, percebe-se como a indisponibilidade cresceu consideravelmente entre abril e julho. Se fosse considerado o somatório das indisponibilidades desses meses, obter-se-ia, aproximadamente, 8,50% de indisponibilidade acumulada em quatro meses, o que equivale a uma média de 2,12% de indisponibilidade nesses meses. Utilizando como referência financeira a estimativa da Tabela 10 (sendo uma previsão conservadora, pois na semana analisada houve considerável limitação de geração pelo ONS), estima-se a receita perdida em 302.946,65 reais de abril a julho 2024.

Em agosto (Tabela 12) é observada uma queda na indisponibilidade, decorrente de uma campanha realizada pela equipe de campo para substituição de fusíveis queimados. No entanto, essa intervenção veio somente após o acúmulo de uma indisponibilidade alta de *strings* nos meses anteriores. Caso fosse feita uma atuação mais rápida, a perda estimada poderia ter sido minimizada.

A partir da utilização do método proposto nesta pesquisa a partir de setembro, a equipe que monitora o desempenho da usina conseguiu iniciar o acompanhamento semanal das *stringboxes*, com aumento na confiabilidade da análise e retornos positivos sobre os resultados encontrados. Dessa forma, houve melhora no relacionamento com a equipe de campo, o que trouxe mais importância para as análises e instruções passadas, contribuindo para o objetivo principal de aumentar a disponibilidade de geração da usina. Ainda assim, chegou-se à conclusão que contratar mais colaboradores para a equipe técnica de campo seria vantajoso para otimizar as rotinas de manutenção, em conjunto com a utilização do método proposto, para atingir o melhor desempenho.

Finalmente, no tópico seguinte são feitas as últimas considerações sobre esta pesquisa, destacando-se os pontos de maior relevância do método desenvolvido, bem como são indicados temas para estudos do setor da geração fotovoltaica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de desempenho das *stringboxes* é importante para monitorar as perdas atreladas ao número de falhas de *strings*. No entanto, essa perda representa apenas uma de tantas possíveis em uma usina solar fotovoltaica. Há perdas relacionadas a parada de transformador e inversor, *tracker*, nível de sujeira, efeitos de sombreamento (causado por vegetação, parques eólicos vizinhos, entre outros exemplos), degradação dos painéis. Idealmente, todos esses pontos devem ser monitorados se o objetivo é melhorar o desempenho da planta solar, assim como se deve levar isso em conta no plano de negócios.

Vale ressaltar que as indisponibilidades observadas nas *strings* podem ter diferentes causas, como um fusível queimado ou problemas de cabos rompidos. Neste caso, a análise do desempenho contribui para a identificação das falhas, a priorização da atividade mantenedora e o monitoramento da operação vigente da usina. Sendo assim, a determinação mais específica das falhas é um trabalho que pode ser realizado pela equipe de campo a partir de um direcionamento inicial que diminui o tempo despendido.

Outra consideração importante é sobre os alarmes de falhas, quando estes estão disponíveis para análise. Pode ser um recurso útil para o refinamento de análises e entendimento mais aprofundado das causas raízes de falha dos equipamentos/peças. Estas análises fogem do escopo deste trabalho e seguem como sugestão para estudos futuros. Em todo caso, o relacionamento com a equipe de campo da usina é imprescindível para entender o que os dados comunicam, é um trabalho conjunto de análise, validação e melhoria dos processos.

Este trabalho contribui para o conhecimento dos problemas que afetam o desempenho das usinas solares fotovoltaicas, com ênfase nas perdas por *strings* faltantes. Além disso, o procedimento e as considerações feitas na análise dos dados expõem grande quantidade de informações práticas fornecidas pela equipe de campo da usina, assim como um processo desenvolvido ao longo de meses de experiência. Sendo assim, este trabalho constitui uma importante referência para o campo da análise de dados em usinas solares.

Adicionalmente, vale ressaltar a importância de compreender a informação que o dado fornece e quais são as condições a que estão submetidos, a fim de evitar falsas correlações ou premissas equivocadas na análise dos dados. Por exemplo,

durante esta pesquisa notou-se que alguns arranjos de *stringbox* possuíam um número diferente de *strings* ao que era informado pela usina, o que foi percebido durante a exploração dos dados quando se observou que algumas correntes de *stringbox* apresentavam curvas anormais mesmo após a normalização dos dados. Após conversar com a equipe de campo e relatar tais inconformidades, chegou-se à conclusão de que a informação fornecida inicialmente sobre o número de *strings* estava equivocada. Por isso a compreensão dos dados e das condições que afetam o problema é essencial para estabelecer uma análise confiável.

Como sugestão para pesquisas futuras, pode ser interessante realizar análises de desempenho com foco em outras perdas e indisponibilidades presentes na realidade da usina. A análise do nível de sujeira sobre os painéis, por exemplo, é um tema que está em alta nas empresas do setor e não há um consenso na literatura sobre o impacto estimado em perda de geração de energia. Outro tema recente e que tem sido inserido no planejamento da Empresa X é a identificação de problemas em campo por meio dos voos com “*drones*”, que podem fornecer uma visualização aérea (térmica) e evidenciar defeitos que dificilmente seriam percebidos em um parque de grande dimensão. Esses temas representam boas oportunidades de agregar novos conhecimentos à base literária e de fornecer soluções práticas ao setor das usinas solares fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatórios e indicadores**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores>. Acesso em: 15 setembro 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Informações sobre usinas solares no Brasil**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/>. Acesso em: 15 setembro 2024.

ATTADIA, Lesley C. do L.; MARTINS, Roberto A. **Medição de desempenho como base para evolução da melhoria contínua**. *In: Jornal da Produção* v. 13, n. 2, p. 33-41, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-65132003000200004>.

BAUER, Martin W.; GASKELL, George (orgs.). **Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático**. Petrópolis: Vozes, 2000.

CNN. **Notícia divulgada pela equipe do jornal da CNN sobre a escassez de mão de obra qualificada para o setor energético no Brasil**. Redação de jornal da CNN, 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/empregabilidade-na-area-da-energia-renovavel-cresce-mas-falta-mao-de-obra-qualificada-diz-relatorio/>. Acesso em: 16 set. 2024.

COELBA, NEOENERGIA. **Informações sobre tarifa de energia elétrica no Estado da Bahia**. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/web/bahia/composicao-tarifaria>. Acesso em: 30 out. 2024.

ESPOSITO, Alexandre Siciliano; FUCHS, Paulo Gustavo. **Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil**. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, n. 40, p. 85-113, dez. 2013.

GALDINO, Marco Antonio; PINHO, João Tavares (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB, 2014. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GLOBERSON, Shlomo. **Issues in developing a performance criteria system for an organization**. *In: International Journal of Production Research*, v. 23, n. 4, p. 639-646, 1985.

HRONEC, S. M.; ANDERSEN, A. **Sinais vitais: usando medidas do desempenho da qualidade, tempo e custo para traçar a rota para o futuro de sua empresa**. São Paulo: Makron Books, 1994.

KABIR, E.; KUMAR, P.; KUMAR, S.; ADELODUN, A. A.; KIM, K. H. **Solar energy: Potential and future prospects**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-Circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

KUTTYBAY, Nurzhigit *et al.* **Optimized single-axis schedule solar tracker in different weather conditions**. *Energies*, 13(19), 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13195226>.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

MARTINS, Roberto A.; COSTA NETO, Pedro Luiz de O. **Indicadores de desempenho para a gestão pela qualidade total: uma proposta de sistematização**. *Gestão & Produção*, 5(3), 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0104-530x1998000300010>.

MARTINS, Roberto A. **Uso da informação sobre desempenho como direcionador de projeto de sistemas de medição de desempenho**. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXII; INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, VIII, 2002, Curitiba, PR. Anais [...]. Curitiba: PUC-PR/ABEPRO, 2002.*

MERRIAM, S. B. **Qualitative Research: A Guide to Design and Implementation**. Jossey-Bass, 2009.

NDIAYE, A.; CHARKI, A.; KOBI, A.; KÉBÉ, C. M. F.; NDIAYE, P. A.; SAMBOU, V. **Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review**. *Solar Energy*, 96, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.005>.

NEELY, Andy; GREGORY, Mike; PLATTS, Ken. **Performance measurement system design – a literature review and research agenda**. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 15, n. 4, p. 80-116, 1995.

NEELY, Andy; GREGORY, Mike; PLATTS, Ken. **“Visão sistêmica da medição de desempenho”** (tradução nossa). *In: Performance measurement system design – a literature review and research agenda. International Journal of Operations & Production Management*, v. 15, n. 4, p. 82, 1995, il. color.

NEELY, Andy. **Measuring business performance**. London: The Economist Newspaper and Profile Books, 1998.

OGBOMO, O. O.; AMALU, E. H.; EKERE, N. N.; OLAGBEGI, P. O. **A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 75, p. 1225–1238, 2017. DOI: [10.1016/j.rser.2016.11.109](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.109).

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Informações sobre o Operador Nacional do Sistema Elétrico brasileiro**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 9 de nov. de 2024.

PACE, E. S. U.; BASSO, L. F. C.; SILVA, M. A. **Indicadores de desempenho como direcionadores de valor**. Revista de Administração Contemporânea, Curitiba, v.7, n.1, 2003.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. DOI: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

SIMÃO, Tiago E. *et al.* **A Method for the Estimation of Missing Strings in Very-Large-Scale Photovoltaic Power Plants**. In IEEE Journal of Photovoltaics, 2024. DOI 10.1109/JPHOTOV.2024.3430977.

STAKE, R. E. **The art of case study research**. Sage Publications, Inc, 1995.

URREJOLA, E.; ANTONANZAS, J.; AYALA, P.; SALGADO, M.; RAMÍREZ-SAGNER, G.; CORTÉS, C.; PINO, A.; ESCOBAR, R. **Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile**. *In*: Energy Conversion and Management, 114, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.016>.

VRINDA NANO TECHNOLOGIES. **Ilustração retratando o monitoramento com stringboxes em usinas solares fotovoltaicas**. 2024, il. color. Disponível em: <https://vnt.in/blogs/solar-string-combiner-boxes-with-monitoring-supervision-made-easy/>. Acesso em: 9 de set. 2024.

YIN, R. K. **Case Study Research and Applications: Design and Methods**. Sage Publications, 2018.

ZEB, K.; UDDIN, W.; KHAN, M. A.; ALI, Z.; ALI, M. U.; CHRISTOFIDES, N.; KIM, H. J. **A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system**. *In*: Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 94, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.053>.