



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Garanhuns

Bacharelado em Engenharia Elétrica

MÚCIO D'EMERY ALVES FILHO

**GESTÃO DA ENERGIA E DA MANUTENÇÃO DA USINA SOLAR  
FOTOVOLTAICA DO IFPE – CAMPUS GARANHUNS: Avaliação Tarifária e  
Proposta FMEA**

Garanhuns - PE

2023

MÚCIO D'EMERY ALVES FILHO

**GESTÃO DA ENERGIA E DA MANUTENÇÃO DA USINA SOLAR  
FOTOVOLTAICA DO IFPE – CAMPUS GARANHUNS: Avaliação Tarifária e  
Proposta FMEA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Manoel Alves Cordeiro Neto

Coorientador: Prof. Wilker Victor da Silva Azevêdo

Garanhuns - PE

2023

A474g

Alves Filho, Múcio D'Emery.

Gestão da energia e da manutenção da usina solar fotovoltaica do IFPE – Campus Garanhuns: avaliação tarifária e proposta FMEA / Múcio D'Emery Alves Filho ; orientador Manoel Alves Cordeiro Neto ; Coorientador Wilker Victor da Silva Azevêdo , 2023.  
60 f. : il.

Orientador: Manoel Alves Cordeiro Neto.

Coorientador: Wilker Victor da Silva Azevêdo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal de Pernambuco. Pró-Reitoria de Ensino. Diretoria de Ensino. Campus Garanhuns. Coordenação do Curso Superior em Engenharia. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2023.

1. Energia elétrica - Conservação. 2. Serviços de eletricidade – Tarifas – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (Campus Garanhuns). 3. Geração de energia fotovoltaica. 4. Usinas heliotérmicas. I. Título.

CDD 621.473

Riane Melo de Freitas Alves –CRB4/1897

MÚCIO D'EMERY ALVES FILHO

**GESTÃO DA ENERGIA E DA MANUTENÇÃO DA USINA SOLAR  
FOTOVOLTAICA DO IFPE – CAMPUS GARANHUNS: Avaliação Tarifária e  
Proposta FMEA**

Trabalho aprovado. Garanhuns, PE, 6 de julho de 2023.

---

Prof. Esp. Manoel Alves Cordeiro Neto

---

Prof. Dr. Márcio Severino da Silva

---

Prof. Me. José Tavares de Luna Neto

Garanhuns - PE

2023

Dedico aos meus pais, que sempre incentivaram meus estudos e apoiaram minhas decisões. Sem seu suporte não conseguiria ter chegado aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Múcio e Jaqueline d'Emery, que me ensinaram desde cedo a importância dos estudos e sempre apoiaram minhas decisões acadêmicas.

Agradeço aos familiares e amigos que tornaram essa jornada um caminho muito mais fácil.

Aos colegas de curso que compartilharam o peso das frustrações e a alegria das conquistas.

Aos professores do curso que se esforçaram para transmitir o conhecimento na melhor de suas habilidades.

A equipe administrativa do instituto, em especial a Mônica Cantalupo da Hora, que se disponibilizou em fornecer dados essenciais para o presente trabalho.

E aos meus orientadores, Professor Manoel Alves Cordeiro Neto e Professor Wilker Victor da Silva Azevêdo, pela instrução e pelo comprometimento com a orientação.

*“Mas ainda tente, pois quem sabe o que é possível?”*

(Michael Faraday)

## RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso teve como principal objetivo buscar soluções para o gerenciamento energético do campus Garanhuns do Instituto Federal de Pernambuco. Para alcançar os resultados, foram concluídos dois procedimentos fundamentais: a análise tarifária das instalações e a aplicação do método FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) voltado para a manutenção da usina solar fotovoltaica local. Para o primeiro procedimento, foi realizada uma análise das tarifas de energia elétrica aplicadas ao campus Garanhuns com o objetivo de identificar maneiras de otimizar o consumo e promover a eficiência energética. Foram levadas em consideração os padrões de consumo e as demandas específicas das instalações. Através dessa análise, foi possível propor adequações ao contrato de energia elétrica, reduzindo os custos do instituto. Para o segundo procedimento, o método FMEA foi aplicado à usina solar fotovoltaica do campus. A Análise de Modo de Falha e seus Efeitos é uma ferramenta sistemática que visa identificar e avaliar potenciais modos de falha, suas causas e efeitos, além de recomendar medidas de mitigação. Através do preenchimento do formulário FMEA, foi possível identificar vulnerabilidades e riscos associados à operação da usina solar fotovoltaica, bem como propor medidas de manutenção que garantirão a sua confiabilidade. Com a análise tarifária e a aplicação do método FMEA, este trabalho apresenta propostas de melhoria do gerenciamento energético do campus. Espera-se que as soluções propostas sejam implementadas e tragam benefícios significativos para o campus e para a comunidade acadêmica como um todo.

Palavras-chave: Gerenciamento energético. Análise tarifária. Usina solar fotovoltaica. Método FMEA.



## **ABSTRACT**

The present final project aimed to seek solutions for the energy management of the Garanhuns campus of the Federal Institute of Pernambuco. In order to achieve the desired outcomes, two fundamental procedures were carried out: the tariff analysis of the facilities and the application of the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method focused on the maintenance of the local solar photovoltaic plant. For the first procedure, an analysis of the electricity tariffs applied to the Garanhuns campus was conducted with the objective of identifying ways to optimize consumption and promote energy efficiency. Consumption patterns and specific demands of the facilities were taken into consideration. Through this analysis, adjustments to the electricity contract were proposed, reducing the institute's costs. For the second procedure, the FMEA method was applied to the campus's solar photovoltaic plant. Failure Mode and Effects Analysis is a systematic tool that aims to identify and evaluate potential failure modes, their causes and effects, as well as recommend mitigation measures. By filling out the FMEA form, vulnerabilities and risks associated with the operation of the solar photovoltaic plant were identified, along with maintenance measures to ensure its reliability. Through the tariff analysis and the application of the FMEA method, this project presents proposals to improve the energy management of the campus. It is expected that the proposed solutions will be implemented and bring significant benefits to the campus and the academic community as a whole.

**Keywords:** Energy management. Tariff analysis. Solar photovoltaic plant. FMEA method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da curva de demanda típica de uma unidade consumidora .....	20
Figura 2 - Triângulo de Potências .....	23
Figura 3 - Formulário FMEA completo .....	35
Figura 4 - Visão parcial do relatório de faturas.....	38
Figura 5 – Planta baixa do projeto da usina .....	39
Figura 6 - Painel fotovoltaico coberto de sujidades .....	41
Figura 7 - Vegetação sobre painéis fotovoltaicos.....	42
Figura 8 - Caixa de proteção coberta de sujidades .....	42
Figura 9 - Inversor coberto de sujidades .....	43
Figura 10 - Gráfico da demanda ativa máxima registrada.....	44
Figura 11 - Gráfico do consumo ativo registrado.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupos Tarifários.....	25
Tabela 2 - Subgrupos A .....	25
Tabela 3 - Faturamento do Grupo B.....	28
Tabela 4 - Faturamento do Grupo A.....	28
Tabela 5 - Severidade dos efeitos.....	34
Tabela 6 - Probabilidade de ocorrência.....	34
Tabela 7 - Índice de detecção de falhas.....	34
Tabela 8 - Simulação de otimização do contrato de demanda ativa (Modalidade azul) .....	45
Tabela 9 - Simulação de otimização do contrato de demanda ativa (Modalidade verde) .....	45
Tabela 10 - Comparação de faturas entre modalidades azul e verde .....	47
Tabela 11 - Economia da modalidade tarifária verde .....	47
Tabela 12 - Formulário FMEA preenchido .....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCER	Contrato de Compra de Energia Regulada
CIP	Contribuição de Iluminação Pública
CONFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
DEOF	Divisão de Execução Orçamentária e Financeira
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FMEA	Análise de Modo e Efeito de Falha
GD	Geração Distribuída
GW	Gigawatt
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco
kVA	Quilovolt-ampere
kV	Quilovolt
kvarh	Quilovolt-ampere-reativo-hora
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt-pico
kWh	Quilowatt-hora
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
NPR	Número de Prioridade de Risco
PIS	Programa de Integração Social
PRORET	Procedimentos de Regulação Tarifária
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de uso do Sistema de Distribuição
TWh	Terawatt-hora
Wp	Watt-pico

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização	15
1.2 Justificativa	16
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	17
1.4 Estrutura do Trabalho	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Tarifação de Energia Elétrica no Brasil	18
2.1.1 Conceitos Básicos	18
2.1.1.1 Potência Elétrica	18
2.1.1.2 Energia Elétrica Ativa	19
2.1.1.3 Energia Elétrica Reativa	19
2.1.1.4 Demanda	19
2.1.1.5 Demanda Média	20
2.1.1.6 Demanda Máxima	21
2.1.1.7 Demanda Medida	21
2.1.1.8 Demanda Contratada	21
2.1.1.9 Fator de Carga	21
2.1.1.10 Fator de Potência	22
2.1.1.11 Horário de Ponta	23
2.1.1.12 Horário Fora de Ponta	24
2.1.1.13 Horário Intermediário	24
2.1.1.14 TE e TUSD	24
2.1.2 Tensão de Fornecimento	24
2.1.2.1 Grupo A	25
2.1.2.2 Grupo B	26
2.1.3 Modalidades Tarifárias	26
2.1.3.1 Modalidade Tarifária Convencional Monômnia	26
2.1.3.2 Modalidades Tarifárias Horárias	26
2.1.4 Enquadramento	27

2.1.5 Faturamento	27
2.2 Manutenção	28
2.2.1 Defeitos, Falhas e Panes	29
2.2.2 Tipos de Manutenção	29
2.2.2.1 Manutenção Corretiva	30
2.2.2.2 Manutenção Preventiva	31
2.2.2.3 Manutenção Preditiva	31
2.2.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade	32
2.2.4 Análise de Modo de Falha e seus Efeitos - FMEA	32
2.3 Trabalhos Relacionados	36
3 METODOLOGIA	37
3.1 Análise Tarifária	37
3.2 Gestão de Manutenção para a Usina Fotovoltaica	38
4 RESULTADOS E ANÁLISES	40
4.1 Coleta de Dados	40
4.2 Adequação Tarifária	43
4.3 Proposta do Plano de Manutenção para a Usina Fotovoltaica	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59

## 1 INTRODUÇÃO

Para que as demandas elétricas sejam atendidas, geração e consumo devem ser equilibrados. No plano da geração de energia elétrica, estudos são realizados para que novas fontes geradoras sejam introduzidas ao sistema elétrico quando o viés econômico desse investimento apresenta resultados positivos. Já pelo lado dos consumidores, é incentivado o uso de equipamentos e métodos que possuem uma maior eficiência no uso da energia elétrica. De modo adicional, estudar o faturamento de energia e eventuais desdobramentos de enquadramento tarifário merecem um olhar dedicado e cíclico devido às mudanças no relacionamento dos novos consumidores/geradores com as concessionárias de distribuição.

Nisto, o trabalho expõe duas projeções importantes: a mudança imposta pela geração distribuída fotovoltaica, em que se revê o olhar unidirecional de consumo para um cenário de geração/consumo com uma preocupação adicional relativa aos desdobramentos tarifários, além dos impactos na avaliação da manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

No contexto em tela, o conceito de eficiência energética é trazido, uma vez que diz respeito ao estudo de técnicas que permitam a execução de um determinado trabalho com o menor gasto energético, mas também pensando em minimizar os custos financeiros. No Brasil, diversas instituições lidam com o tema de eficiência energética, tais como o MME, a ANEEL, a Eletrobras e a Petrobras (ELEKTRO, 2012).

Uma maneira de incentivar a prática da eficiência energética está presente no sistema tarifário de energia elétrica. O sistema tarifário horo-sazonal estimula os consumidores, através de tarifas diferenciadas a depender da hora do dia e período do ano, a migrarem seu consumo para momentos de menor demanda elétrica. Os clientes também podem alterar suas modalidades tarifárias, buscando o tipo que mais se adequa a seu perfil de consumo, diminuindo assim seus custos monetários. Esta é uma preocupação relevante uma vez que a Geração Distribuída (GD) altera as curvas de demanda dos clientes em cenário de importação, além de permitir, a depender da situação, o fluxo de potência em direção aos ramais da distribuidora (exportação). Uma vez que, em âmbito público, se verifica uma ampliação em Usinas Fotovoltaicas,

o estudo das características tarifárias e o cuidado com a manutenção destes sistemas se torna essencial.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na última década, a geração solar fotovoltaica vem se tornando bastante popular. As fontes fotovoltaicas no Brasil, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), avançaram de 2 MW instalados em 2012 (EPE, 2015), para 7,38 GW instalados em 2022 (EPE, 2023). Além disso, as projeções futuras continuam indicando crescimento, até 2050, em que o Brasil poderá possuir geração solar de 118 GW (EPE, 2016).

A geração fotovoltaica se tornou bastante atraente para os consumidores residenciais, comerciais e instituições públicas por ser um método de geração própria compacto (a depender da potência gerada) e de atrativo tempo de retorno do investimento. Além disso, o Brasil possui um elevado índice de radiação solar, principalmente quando comparado a países da Europa, o que afeta positivamente o potencial de geração fotovoltaica (DA ROSA e GASPARIN, 2016).

Dada a diversificação tarifária associada aos consumidores de alta tensão (Classe A), verificar demanda e perfil de consumo energético é essencial para indicar potenciais alterações em contrato. Além disso, para garantir que os módulos fotovoltaicos manterão sua eficiência, é necessário a realização de manutenções periódicas nos equipamentos. Segundo Pinho e Galdino (2014), módulos fotovoltaicos instalados no Brasil já apresentaram perdas de até 10% no desempenho devido a presença de poeira (sujidades). Perdas ôhmicas, sobreaquecimento (temperatura), falhas em dispositivos de rastreamento de máxima potência também podem ocorrer (ROMANELI *et al.*, 2022). As perdas podem ser ainda piores quando se trata de sombreamentos, dejetos animais e falhas nos demais equipamentos que compõe o sistema.

A manutenção ideal dos equipamentos é precedida pelo planejamento de manutenção. Um dos métodos utilizados na engenharia de manutenção é o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) ou Análise de Modo de Falha e seus Efeitos. O FMEA é uma ferramenta útil para a identificação de falhas, efeitos e métodos corretivos nos módulos fotovoltaicas, e sua aplicação reduz o risco de danos ao



sistema fotovoltaico (PIMPALKAR et al., 2023). Se trata de um método que depende do analista e pode ser personalizado ao modelo do sistema sob estudo, requerendo uma imersão em seus ativos (inversores, quadros, painéis, dentre outros) e suas principais características.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Em abril de 2021, o campus Garanhuns do Instituto Federal de Pernambuco iniciou a operação de sua própria Usina Solar Fotovoltaica. Esse evento, juntamente com a contextualização anterior, cria precedentes para que sejam realizados estudos atualizados sobre o gerenciamento elétrico do campus. Sendo assim, o presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo a análise tarifária do consumo elétrico do campus e o desenvolvimento de um plano de manutenção para a usina fotovoltaica.

Para a realização do presente Trabalho de Conclusão de Curso foi necessário o estudo das áreas de Gerenciamento de Energia, Eficiência Energética e Manutenção de Equipamentos, áreas com grande presença no âmbito profissional do engenheiro eletricitista atual. Além disso, o resultado desse trabalho poderá ser utilizado no próprio instituto, como documento balizador para a evolução da infraestrutura elétrica do campus, ou como referência para trabalhos futuros.

## 1.3 OBJETIVOS

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Analisar as tarifas de consumo elétrico do campus Garanhuns, sugerindo adequações de contrato caso justificável, e produzir um plano de manutenção para a usina fotovoltaica, baseado no método FMEA.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar uma análise histórica do consumo elétrico do campus Garanhuns.
- Propor adequações tarifárias, caso cabível.
- Produzir um relatório FMEA para a usina fotovoltaica do campus Garanhuns.
- Propor um plano de manutenção para a usina fotovoltaica.

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. A contextualização do tema do estudo e os objetivos a serem alcançados com trabalho são expostos no Capítulo 1.

No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos sobre o sistema de tarifação elétrica do Brasil e a gestão de manutenção de equipamentos.

O Capítulo 3 descreve os métodos utilizados e procedimentos efetuados para a análise tarifária do consumo de energia elétrica do campus Garanhuns e para o preenchimento do Formulário FMEA voltado para a usina solar fotovoltaica.

No Capítulo 4 são apontados os resultados do trabalho, na forma de uma proposta de adequação do modelo tarifário utilizado pelo campus e sugestões para a criação de um plano de manutenção da usina solar fotovoltaica.

As Considerações Finais e propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 5.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conteúdo do presente trabalho está focado em duas áreas de estudo principais: o sistema de tarifação elétrica do Brasil e a gestão de manutenção de equipamentos. Portanto, esta seção irá apresentar o referencial teórico necessário para o entendimento dos temas abordados.

### 2.1 TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A Agência Nacional de Energia Elétrica é a entidade governamental que regula e estabelece as regras de prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2021). Atualmente, dois documentos regem o sistema tarifário de energia elétrica no Brasil: a Resolução Normativa ANEEL Nº 1000/2021 e os Procedimentos de Regulação Tarifária – PRORET. A partir deles são trazidos conceitos e aspectos complementares para compreensão do sistema tarifário, os quais serão expostos nas subseções que seguem.

#### **2.1.1 Conceitos Básicos**

Neste tópico serão brevemente definidos conceitos e elementos que compõe a estrutura tarifária de eletricidade.

##### *2.1.1.1 Potência Elétrica*

A potência elétrica pode ser descrita como a quantidade de trabalho realizado por um circuito elétrico em um determinado intervalo de tempo. Circuitos, aparelhos eletrônicos e equipamentos elétricos geralmente informam sua potência, expressa em watts. Sua compreensão, no contexto do trabalho, é importante porque subsidia o entendimento de elementos da fatura energética, da característica de equipamentos do sistema fotovoltaico e da carga do consumidor.

### *2.1.1.2 Energia Elétrica Ativa*

É a potência útil consumida por um sistema em um determinado intervalo de tempo. Ou seja, é a parcela da energia elétrica que é convertida em outro tipo de energia. A energia ativa é geralmente informada em quilowatt-hora (kWh). É um importante parâmetro analisado no estudo de adequações tarifárias, pois determina o consumo ativo nas faturas de energia elétrica. As tarifas aplicadas ao consumo de energia elétrica ativa mensal no campus Garanhuns são determinadas pela concessionária Neoenergia Pernambuco seguindo as normativas da ANEEL.

### *2.1.1.3 Energia Elétrica Reativa*

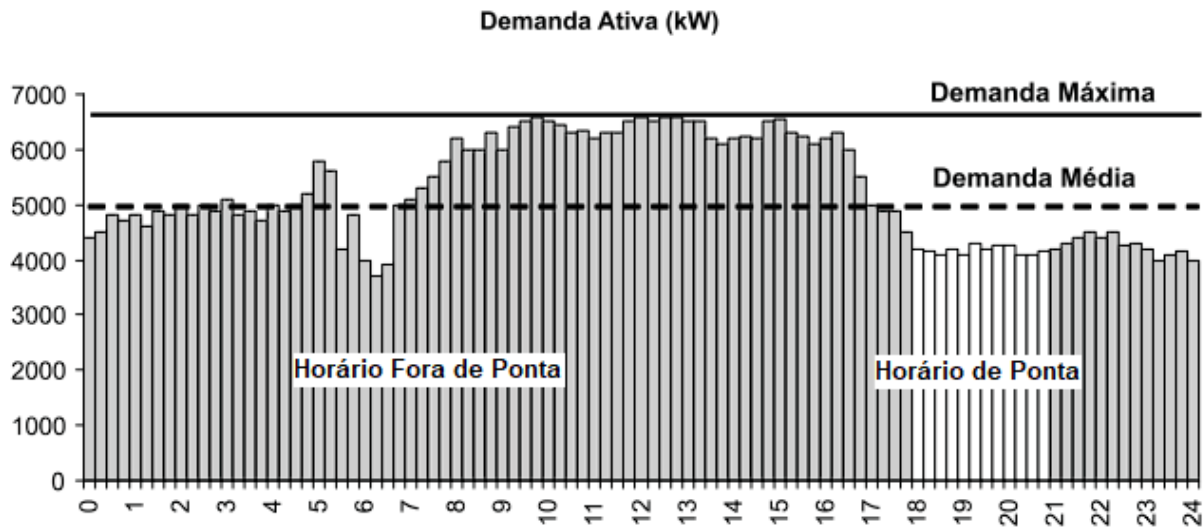
A ANEEL (2021) define energia elétrica reativa como: “aquela que circula entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada sem produzir trabalho, em kvarh (quilovolt-ampère-reactivo-hora)”. Os montantes de energia elétrica reativa registrados nas unidades consumidoras de classe A só são cobrados quando ultrapassam os limites determinados pelo fator de potência e indicados pela ANEEL. O controle da energia elétrica reativa é um importante procedimento para a redução de gastos dos consumidores classe A.

### *2.1.1.4 Demanda*

A demanda é a média das potências elétricas ativas ou reativas, entregues pelo sistema elétrico, à uma unidade consumidora, em um determinado intervalo de tempo. Essa média é geralmente expressa em quilowatts (kW) ou quilovolt-ampère-reactivo (kvar). No Brasil, o intervalo de integração é de 15 minutos. A Figura 1 apresenta a curva de demanda ativa de um consumidor genérico.

A demanda ativa é um dos principais componentes do faturamento de energia elétrica e sua medição deve estar dentro de limites informados pelo próprio cliente, para que multas pela ultrapassagem não sejam pagas.

Figura 1 - Gráfico da curva de demanda típica de uma unidade consumidora



#### 2.1.1.5 Demanda Média

A demanda média é a razão entre a quantidade de energia consumida em um sistema dado um intervalo de tempo. Essa demanda pode ser observada na Figura 1 e pode obtida através da Equação (1):

$$D_{MED} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} p \cdot dt}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

Onde:

$D_{MED}$  = Demanda média;

$p$  = Potência instantânea;

$T_1$  = Tempo inicial;

$T_2$  = Tempo final.

O estudo da demanda média pode servir de instrumento balizador para que o cliente defina o contrato de demanda ativa mais adequado ao seu perfil de consumo.

#### *2.1.1.6 Demanda Máxima*

É o maior valor de demanda registrado em um certo intervalo de tempo, podendo esse período ser diário, mensal, anual etc. Na Figura 1 é ilustrada uma linha horizontal que demarca o valor de demanda máxima. A demanda ativa máxima é um indicador que deve ser utilizado nas determinações de contrato de demanda ativa.

#### *2.1.1.7 Demanda Medida*

Segundo a ANEEL (2021) a demanda medida é a: “maior demanda de potência ativa injetada ou requerida do sistema elétrico de distribuição pela carga ou geração, verificada por medição e integralizada em intervalos de 15 minutos durante o período de faturamento, em kW (quilowatts)”. Em um período de faturamento mensal (30 dias), existem 2880 intervalos de 15 minutos. A partir desta demanda, a concessionária verifica se o contrato do cliente foi excedido e cobra as tarifas de ultrapassagem cabíveis.

#### *2.1.1.8 Demanda Contratada*

É a demanda que dever ser continuamente disponibilizada pela distribuidora no ponto de conexão, conforme valores informados no contrato. Essa demanda deve ser paga integralmente, mesmo que o consumidor não a utilize por inteiro, geralmente expressa kW. Do ponto de vista do cliente, essa demanda não deve ser ultrapassada, pois acarretará a tarifação dos valores excedentes. A contratação da demanda ativa ocorre durante o processo de adesão ao serviço de distribuição de energia elétrica, mas a solicitação de sua alteração pode se dar a qualquer momento, caso o cliente verifique uma mudança relevante em seu perfil de consumo.

#### *2.1.1.9 Fator de Carga*

É a razão entre a demanda média e a demanda máxima para um consumidor em um mesmo intervalo de tempo. O fator de carga é calculado pela Equação (2):

$$FC = \frac{D_{MED}}{D_{MAX}} = \frac{D_{MED} \cdot \Delta t}{D_{MAX} \cdot \Delta t} = \frac{kWh}{D_{MAX} \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Onde:

$FC$  = Fator de carga;

$D_{MAX}$  = Demanda máxima;

$\Delta t$  = Intervalo de tempo.

O fator de carga é informado na fatura pela concessionária e pode ser utilizado no estudo de gerenciamento energético de uma instalação para adequar a distribuição do consumo elétrico ao longo do dia.

#### 2.1.1.10 Fator de Potência

Barros (2011, p.5) define o fator de potência da seguinte forma:

Fator de potência é um fator que indica percentualmente quanto da potência fornecida pela fonte geradora é efetivamente convertida em trabalho útil, em outras palavras, em potência ativa. Assim, o fator de potência é utilizado como indicador de eficiência do uso de sistemas elétricos evidenciando numericamente o aproveitamento da energia elétrica.

Matematicamente, o fator de potência pode ser definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente em um sistema elétrico. A potência aparente é uma combinação das potências ativas e reativas e é expressa em quilovolt-ampères (kVA). A representação gráfica da relação entre essas potências é chamada de triângulo de potências e está ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - Triângulo de Potências



Fonte: Barros (2011).

O fator de potência pode ser calculado utilizando a Equação (3):

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos\varphi = \cos \left[ \tan^{-1} \left( \frac{Q}{P} \right) \right] \quad (3)$$

Quanto mais próximo o valor do fator de potência se aproxima de 1, mais eficiente é a utilização da energia elétrica no sistema. A ANEEL determina que o valor mínimo de  $fp$  é de 0,92.

#### 2.1.1.11 Horário de Ponta

O horário de ponta, ou posto tarifário ponta, é um período de 3 horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora de energia elétrica, que não sendo aplicado aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da paixão, Corpus Christi e aos feriados nacionais dos dias 1º de janeiro, 21 de abril, 1º de maio, 7 de setembro, 12 de outubro, 2 de novembro, 15 de novembro e 25 de dezembro (ANEEL, 2021). O horário de ponta está exemplificado na Figura 1.

O horário de ponta representa o período com maior demanda elétrica, visto pela concessionária, por essa razão, as tarifas aplicadas pela utilização do sistema elétrico nesse horário são mais elevadas, incentivando assim, a migração do consumo para horas de menor demanda.



#### *2.1.1.12 Horário Fora de Ponta*

Também chamado de posto tarifário fora de ponta, pela Resolução Normativa ANEEL Nº 1000/2021, é o horário composto pelo conjunto de horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta (e horário intermediário, caso aplicável). O horário fora de ponta está exemplificado na Figura 1.

O horário fora de ponta representa o período com menor demanda elétrica, visto pela concessionária, por essa razão, as tarifas aplicadas pela utilização do sistema elétrico nesse horário são reduzidas.

#### *2.1.1.13 Horário Intermediário*

Também denominado posto tarifário intermediário, é o período de duas horas, uma hora imediatamente antes e uma hora imediatamente depois do horário de ponta, válido apenas para a modalidade tarifária branca do grupo B (ANEEL, 2021).

#### *2.1.1.14 TE e TUSD*

A Tarifa de Energia – TE, é o valor determinado pela ANEEL, em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh), utilizado para o cálculo do faturamento mensal do consumo de energia elétrica.

A Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD, é o valor determinado pela ANEEL, em Reais por megawatt-hora ou em Reais por quilowatt (R\$/kW), utilizado para o cálculo do faturamento mensal do consumidor pelo uso do sistema de distribuição de energia elétrica.

### **2.1.2 Tensão de Fornecimento**

De acordo com a Resolução Normativa ANEEL Nº 1000/2021 é obrigação da distribuidora definir o nível de tensão de conexão ao sistema elétrico de cada unidade consumidora. Essa definição deve seguir os critérios de carga instalada determinados pela Agência Nacional de Energia Elétrica. A tensão de fornecimento é utilizada para

classificar as unidades consumidoras como pertencentes ao grupo tarifário A ou B, como explicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Grupos Tarifários

Grupo	Tensão de Fornecimento	Carga Instalada	Demanda Contratada
<b>B</b>	< 2,3 kV	≤ 75 kW	-
<b>A</b>	≥ 2,3 < 69 kV	> 75 kW	≤ 2500 kW
<b>A</b>	≥ 69 kV	-	> 2500 kW

Fonte: Elaboração própria (2023).

### 2.1.2.1 Grupo A

Os clientes que integram este grupo se caracterizam por serem conectados em tensões superiores ou iguais a 2,3 kV, ou conectados por sistemas subterrâneos com tensão inferior a 2,3 kV. Esse grupamento é subdividido em seis subgrupos, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Subgrupos A

Subgrupo	Tensão de conexão mínima	Tensão de conexão máxima
<b>A1</b>	≥ 230 kV	-
<b>A2</b>	≥ 88 kV	≤ 138 kV
<b>A3</b>	69 kV	69 kV
<b>A3a</b>	≥ 30 kV	≤ 44 kV
<b>A4</b>	≥ 2,3 kV	≤ 25 kV
<b>AS</b>	-	< 2,3 kV subterrâneo

Fonte: Elaboração própria (2023).

O campus Garanhuns está inserido no subgrupo A4, uma vez que a instalação é alimentada por um ramal trifásico de 13.8 kV. Os custos de consumo e demanda por kW em cada subgrupo são diferenciados, clientes A1 pagam tarifas menores que clientes A2 e assim por diante.

### *2.1.2.2 Grupo B*

Os clientes que integram este grupo se caracterizam por serem conectados em tensões inferiores a 2,3 kV. Esse grupamento é subdividido em quatro subgrupos, como demonstrado abaixo:

- B1: subgrupo residencial;
- B2: subgrupo rural;
- B3: subgrupo com demais clientes de baixa tensão;
- B4: subgrupo de iluminação pública.

### **2.1.3 Modalidades Tarifárias**

Segundo a Elektro (2012, p.87): “A modalidade ou estrutura tarifária é um conjunto de tarifas aplicáveis às componentes de consumo de energia elétrica e demanda de potência ativas.”

#### *2.1.3.1 Modalidade Tarifária Convencional Monômnia*

É uma modalidade tarifária exclusiva do grupo B onde o consumidor é cobrado uma única tarifa pelo consumo de energia elétrica, independente dos postos tarifários horários.

#### *2.1.3.2 Modalidades Tarifárias Horárias*

Consumidores podem adotar uma de três modalidades tarifárias existentes, desde atendam os requisitos de enquadramento. As modalidades são: Branca, Verde e Azul. Elas são caracterizadas pela aplicação de tarifas diferenciadas dependendo do horário em que foi registrado o consumo.

A modalidade tarifária horária branca é exclusiva para clientes da classe B, e possui três tarifas distintas, uma aplicada ao horário de ponta, uma aplicada ao horário intermediário e uma aplicada ao horário fora de ponta.

A modalidade tarifária horária verde também inclui a existência de três tarifas, mas uma delas é aplicada ao contrato de demanda, independente de horário, e as outras duas são aplicadas ao consumo ativo no horário de ponta e no horário fora de ponta respectivamente.

Por fim a modalidade tarifária horária azul é constituída por quatro tarifas distintas, uma aplicada a demanda ativa no horário de ponta, uma para a demanda ativa fora de ponta, uma para o consumo ativo no horário de ponta e uma para o consumo ativo no horário fora de ponta.

#### **2.1.4 Enquadramento**

As unidades consumidoras são enquadradas nas modalidades tarifárias de acordo com os seguintes critérios:

- Unidades consumidoras do grupo B são enquadradas na modalidade:
  - I. Convencional Monômia: de forma compulsória e automática;
  - II. Horária branca: de acordo com solicitação do consumidor, caso não seja classificado como baixa renda residencial, iluminação pública ou pré-pagamento.
- Unidades consumidoras do grupo A são enquadradas na modalidade:
  - I. Azul: caso tensão de conexão seja maior ou igual a 69 kV;
  - II. Azul ou verde: caso tensão de conexão seja menor que 69 kV, de acordo com a opção do consumidor.

O enquadramento permite que o consumidor, uma vez que atenda aos requisitos mínimos de cada modalidade tarifária, solicite a migração de uma modalidade para outra caso acredite ser mais econômico dado o seu perfil de consumo.

#### **2.1.5 Faturamento**

A fatura de energia elétrica é o valor que dever ser pago, em moeda corrente, pela utilização do sistema de distribuição de energia elétrica. Impostos não são aplicados sobre o consumo de energia elétrica ativa, demanda de potência ativa,

demanda de potência reativa excedente e utilização do sistema. Os modelos resumidos do faturamento por grupo estão dispostos nas Tabelas 3 e 4, e descritos nos subtópicos abaixo:

Tabela 3 - Faturamento do Grupo B

	Branca	Convencional
Consumo ativo	Um preço para ponta	Preço único
	Um preço para fora de ponta	
	Um preço para intermediário	

Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 4 - Faturamento do Grupo A

	Verde	Azul
Demanda ativa	Preço único	Um preço para ponta
		Um preço para fora de ponta
Consumo Ativo	Um preço para ponta	Um preço para ponta
	Um preço para fora de ponta	Um preço para fora de ponta

Fonte: Elaboração própria (2023).

## 2.2 MANUTENÇÃO

O conceito de manutenção pode ser descrito como o conjunto de atividades realizadas para garantir que determinado sistema de produção se mantenha operacional, constante e eficiente. Para Gurski (2002, p.7), a missão da manutenção é: “garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção e a preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados.”

A norma que estabelece os termos relacionados a manutenção é a NBR 5462/1994. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1994, p.6), manutenção é a: “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.”

### **2.2.1 Defeitos, Falhas e Panes**

Como visto, a manutenção deve assegurar a confiabilidade de determinado processo produtivo, para isso ela deve prevenir e/ou corrigir situações adversas sempre que necessário. Essas situações são denominadas defeitos, falhas ou panes.

A ABNT (1994, p.3) define defeito como: “qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos.” Ou seja, é uma intercorrência que altera o funcionamento ideal de um processo e que, dependendo de sua gravidade, pode resultar em uma falha no sistema.

Falha é quando ocorre a interrupção na capacidade de um elemento de desempenhar sua função (ABNT, 1994). Falhas possuem intensidades diferentes e são classificadas pela sua gravidade em relação ao sistema como um todo. O episódio de uma falha ocasiona o estado de pane no processo.

A ABNT (1994, p.3) define pane como o:

Estado de um item caracterizado pela incapacidade de desempenhar uma função requerida, excluindo a incapacidade durante a manutenção preventiva ou outras ações planejadas, ou pela falta de recursos externos.

Sendo assim, a manutenção deve atuar no sistema (de uma forma geral) com o objetivo de prevenir prováveis defeitos ou falhas nos elementos e manter equipamentos e máquinas em condições de pleno funcionamento para garantir a produção normal e a qualidade dos produtos (MORO e AURAS, 2007).

### **2.2.2 Tipos de Manutenção**

As atividades de manutenção são divididas quanto a sua função e estado de planejamento. De acordo com sua preparação, as manutenções são classificadas em programadas e não-programadas:

- Manutenção programada: é aquela que segue um plano de manutenção previamente estabelecido;

- Manutenção não-programada: é aquela que não é realizada de acordo com um plano preestabelecido, mas sim quando falhas ocorrem e ações corretivas devem ser tomadas.

Quanto a função da manutenção, a NBR 5462/1994 admite a existência de três tipos distintos: Manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

#### *2.2.2.1 Manutenção Corretiva*

De acordo com a ABNT (1994, p.7), esse tipo de manutenção é categorizado como: “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.”

A manutenção Corretiva é destinada a falhas súbitas ou inesperadas, que precisam ser reparadas para que o processo produtivo possa retornar ao funcionamento ideal. É o tipo mais básico de manutenção e o mais primitivo, mas ainda muito utilizado, pois defeitos repentinos ainda são comuns na indústria. As ações corretivas podem ser planejadas ou não planejadas, a forma com qual a ocorrência é prevista, ou não, implica grandes mudanças nos custos da manutenção e tempos improdutivos no processo.

De maneira geral, a manutenção corretiva não planejada tem custos mais elevados e os defeitos espontâneos podem gerar consequências desastrosas para o processo produtivo. Deve-se sempre evitar esse tipo de correção, buscando a identificação de falhas em potencial e a eficiência produtiva.

Gurski (2002) destaca a qualidade superior da manutenção corretiva planejada nomeando razões que levam a melhores resultados:

- Possibilidade de compatibilizar a necessidade da intervenção com os interesses da produção;
- Melhor planejamento dos serviços;
- Garantia da existência de sobressalentes, equipamentos e ferramentas;
- Garantia da existência de recursos humanos com a qualificação necessária para a execução dos serviços e em quantidade suficiente, que pode, inclusive, ser buscados externamente à organização.

### 2.2.2.2 *Manutenção Preventiva*

Manutenção programada que segue um projeto previamente estabelecido. Geralmente realizada de forma periódica, a fim de minimizar os tempos de indisponibilidade de equipamentos. Os serviços de manutenção preventiva devem ser bem planejados e suas etapas de execução devem estar bem definidos, para que, segundo Tovar (2017), as seguintes vantagens sejam percebidas:

- Redução dos riscos de falhas;
- Aumento da vida útil dos equipamentos;
- Diminuição dos custos de aquisição de novos itens;
- Manutenção mais barata que serviços corretivos.

### 2.2.2.3 *Manutenção Preditiva*

Também chamada de manutenção controlada, é definida pela NBR 5462/1994 como a:

Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva. (ABNT, 1994, p.7)

A manutenção preditiva preocupa-se com o estudo dos fatores causadores de falhas, dos componentes associados aos defeitos e das ações corretivas mais eficazes. Moro e Auras (2007) destacam os objetivos dessa manutenção:

- Determinar, com antecedência, a necessidade de manutenção em uma peça em específico;
- Eliminar a necessidade de desmontagens para inspeção;
- Aumentar a disponibilidade de equipamentos;
- Reduzir a ocorrência de falhas não planejadas;
- Minimizar danos;
- Aumentar a vida útil de equipamentos;
- Elevar índices de confiabilidade de equipamentos;



- Determinar previamente as interrupções na cadeia de produção

### **2.2.3 Manutenção Centrada na Confiabilidade**

Para Gurski (2002, p.9): “Confiabilidade é a probabilidade de que um componente, equipamento, ou sistema exercerá sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas.”. Portanto, para aumentar a confiabilidade de um item, dessa maneira, garantindo que ele permanecerá em plena operação pelo maior tempo possível, é necessário a utilização de um processo de manutenção específico, a Manutenção centrada na confiabilidade.

A manutenção centrada na confiabilidade reúne conhecimentos técnicos de várias áreas da engenharia para analisar o funcionamento de equipamentos e garantir que eles continuarão exercendo suas funções por determinados espaços de tempo. O aumento da confiabilidade trás diversos benefícios para a organização, tais quais:

- Ganho de conhecimento sobre a operação de equipamentos;
- aplicação de recursos de forma mais eficiente;
- melhoria dos parâmetros ambientais e de segurança;
- aumento da vida útil dos equipamentos.

Várias ferramentas são utilizadas para auxiliar organizações que decidem adotar as práticas da manutenção centrada na confiabilidade, dentre elas está presente a Análise de Modo de Falha e seus Efeitos, ou FMEA.

### **2.2.4 Análise de Modo de Falha e seus Efeitos - FMEA**

O método FMEA é um estudo de confiabilidade que verifica os modos de falha que podem ocorrer em cada item de determinado processo e seus efeitos relacionados. Sakurada (2001, p.49) define o método da seguinte forma:

O FMEA é um método qualitativo que estuda os possíveis modos de falha dos componentes, sistemas, projetos e processos e os respectivos efeitos gerados por esses modos de falha. O modo de falha é a expressão utilizada para caracterizar o processo e o mecanismo de falha que ocorre nos itens. O efeito é maneira como o modo de falha vai se tornar mais ou menos evidente,

dependendo da função que o item está desempenhando naquele caso específico. O efeito, por sua vez, segue a mesma sistemática.

A aplicação da FMEA é dependente do conhecimento técnico sobre o processo estudado. Os responsáveis pela execução do método devem ser capazes de compreender o funcionamento minucioso do sistema, para que os modos de falha, suas causas e seus efeitos sejam descritos com alta fidelidade. Após a identificação de cada modo e falha, deve-se analisar três parâmetros qualitativos: Severidade, Ocorrência e Detecção.

- Severidade: é o indicador de gravidade dos efeitos dos modos de falha;
- Ocorrência: representa a probabilidade de acontecimento da falha;
- Detecção: aponta a capacidade dos controladores de perceber a falha.

Para cada um desses parâmetros é atribuído um valor de 1 a 10. Autores debatem a melhor maneira de representar o significado de cada dígito dessa métrica, mas, de maneira geral, as Tabelas 5, 6 e 7 podem ser utilizadas.

Os valores de Severidade, Ocorrência e Detecção são usados para o cálculo do Número de Prioridade de Risco (NPR), como determinado pela equação (4). Esse último indicador é um importante elemento utilizado para que os responsáveis pela aplicação da FMEA possam definir quais falhas requerem a maior atenção da equipe de manutenção.

$$NPR = Ocorrência * Severidade * Detecção \quad (4)$$

Os elementos da FMEA são então preenchidos em um formulário. Não existe uma padronização definitiva para esse documento, mas Sakurada (2001) delimita 17 itens essenciais para um formulário completo:

1. Identificação do sistema: Nome do sistema ou processo avaliado;
2. Participantes: Nome das pessoas da equipe FMEA;
3. Página e datas: Número da página e datas das reuniões;
4. Componente: Nome do equipamento do sistema;
5. Função: Propósito do equipamento do sistema;
6. Modo potencial de falha: Maneira que o equipamento pode falhar;
7. Efeitos potenciais de falha: Consequências da falha no equipamento;

Tabela 5 - Severidade dos efeitos

Severidade	Escore
O cliente provavelmente não tomará conhecimento	1
Leve aborrecimento	2 - 3
Insatisfação do cliente	4 - 6
Alto grau de insatisfação	7 - 8
Atinge as normas de segurança	9 - 10

Fonte: Bem-Day e Raouf (1996).

Tabela 6 - Probabilidade de ocorrência

Probabilidade de não detectar a falha	Probabilidade (%) de um defeito individual alcançar o cliente	Escore
Remota	0 - 5	1
Baixa	6 - 15	2
	16 - 25	3
Moderada	26 - 35	4
	36 - 45	5
	46 - 55	6
Alta	56 - 65	7
	66 - 75	8
Muito alta	76 - 85	9
	86 - 100	10

Fonte: Bem-Day e Raouf (1996).

Tabela 7 - Índice de detecção de falhas

Probabilidade de ocorrência	Chances de ocorrência	Escore
Remota	0	1
Baixa	1/20,000	2
	1/10,000	3
Moderada	1/2,000	4
	1/1,000	5
	1/200	6
Alta	1/100	7
	1/20	8
Muito alta	1/10	9
	1/2	10

Fonte: Bem-Day e Raouf (1996).

8. Ocorrência: Atribuição do índice de ocorrência;
9. Severidade do efeito: Atribuição do índice de severidade;
10. Causas potenciais da falha: A causa do modo de falha;
11. Controles atuais: Métodos atuais de detecção de falhas;
12. Detecção: Atribuição do índice de detecção;
13. Número de prioridade de risco (NPR): atribuição do índice NPR;
14. Ações recomendadas: Ações recomendadas para novo controle de falhas;
15. Responsabilidade e data de conclusão limite: Responsáveis pela tomada de decisões e definição de prazos para entrega das ações;
16. Ações tomadas: Ações que foram efetivadas no novo controle de falhas;
17. Número de prioridade de risco revisado: Atribuição do novo índice NPR após aplicação do novo controle de falhas.

O formulário da Figura 3 foi produzido seguindo as definições acima:

Figura 3 - Formulário FMEA completo

C A B E C A L H O		ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA															
		Projeto: Organizado por: Responsável do projeto:				FMEA n°: Componente: Data:											
D E S E N V O L V I M E N T O	INSPEÇÃO								RESULTADOS								
	Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	S E V E R I D A D E	Causa da Falha	O C O R R Ê N C I A	Controles atuais	D E T E C Ç Ã O	R I S C O NPR	Ações recomendadas	Responsáveis	Ação tomada	S E V E R I D A D E	O C O R R Ê N C I A	D E T E C Ç Ã O	R I S C O NPR

Fonte: Elaboração própria (2023).

## 2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

O embasamento teórico visto anteriormente também foi utilizado como validação para outros estudos realizados na área da engenharia. Adequações tarifárias são temas bastante abordados no âmbito da engenharia elétrica, o que reforça sua relevância para estudos de eficiência energética. Alguns exemplos são os trabalhos de Alves (2019) e Barros (2011). Já a utilização do método FMEA é pouco abordada dentro da engenharia elétrica, mas Cavenaghi (2014) contribuiu para a literatura, além de estudiosos de outros campos, como de Araújo (2018), que utilizaram a ferramenta para análise de sistemas fotovoltaicos.

O trabalho de Alves (2019) é voltado a determinar as condições ideais em que consumidores da classe B deveriam migrar para o modelo tarifário branco. Apesar dele, diferentemente do presente trabalho, lidar com unidades consumidoras da classe B, suas análises para adequação tarifária são baseadas na mesma fundamentação teórica e podem ser replicados em estudos em diferentes níveis de consumo.

Barros (2011) apresenta uma abordagem em relação ao gerenciamento de energia elétrica similar ao visto na presente monografia. Seu estudo também é voltado para uma instituição federal de ensino superior, porém, o seu diferencial está na aplicação dispositivo capaz de monitorar medidores de energia digitais, enquanto este trabalho aplica noções de manutenção para gerenciamento de uma usina fotovoltaica.

Em sua monografia, de Araújo (2018) aplica o método FMEA para o controle de módulos fotovoltaicos, realizando o preenchimento do formulário e sugestões para planos de manutenção. Contudo, o texto está mais próximo de conceitos relacionados a engenharia de produção e a FMEA é aplicada somente aos painéis fotovoltaicos, ignorando os outros itens que compõem a geração solar.

Já Cavenaghi (2014) utiliza a FMEA para painéis fotovoltaicos com análises mais estruturadas em conhecimentos da engenharia elétrica. Suas identificações de modos de falhas apresentam conhecimento técnico do funcionamento elétrico dos elementos, mas, o trabalho é resumido apenas aos painéis, e seus resultados não contém sugestões para concretização das ações recomendadas.

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção serão discutidas as etapas da produção do trabalho, seus objetivos e as técnicas utilizadas. Seguindo o mesmo raciocínio apresentado anteriormente, a metodologia aplicada no presente trabalho também foi decomposta para melhor alcançar seus dois principais objetivos.

#### 3.1 ANÁLISE TARIFÁRIA

Para a produção de um relatório que seja justificativa suficiente para a alteração, ou não, do atual contrato de adesão do serviço de energia elétrica do campus Garanhuns, os seguintes procedimentos tiveram que ser completados:

1. Coleta das faturas de energia elétrica do campus;
2. Reprodução do histórico de faturas;
3. Otimização da demanda de potência;
4. Análise de opção tarifária.

O campus Garanhuns do Instituto Federal de Pernambuco é uma unidade consumidora da classe A4, cliente da concessionária Neoenergia Pernambuco e sua demanda elétrica é abastecida por uma rede trifásica de 13,8 kV. As faturas de energia elétrica, necessárias para a realização deste estudo, foram solicitadas a Divisão de Execução Orçamentária e Financeira – DEOF do campus, que disponibilizou as contas do período de fevereiro de 2019 até maio de 2023.

Os elementos definidos na seção 2.1.1 foram extraídos das faturas e utilizados na confecção de um relatório com o histórico do consumo elétrico do campus. Uma visão parcial desse relatório está esboçada na Figura 4.

A otimização da demanda visa sua adequação às reais necessidades da unidade consumidora. Deve-se analisar as demandas de potência contratadas, medidas e faturadas para procurar reduzir ou eliminar as ociosidades e ultrapassagens de demanda (ELEKTRO, 2012).

Por fim, os dados de consumo elétrico mensal obtidos foram utilizados para determinar a melhor modalidade tarifária para o perfil do campus. Essa decisão foi tomada levando em consideração os pontos levantados por Eletrobrás (2006):

Figura 4 - Visão parcial do relatório de faturas

Mês	Ano	Demanda Ativa na Ponta (kW)			Demanda Ativa Fora de Ponta (kW)		
		Quantidade	Tarifa (R\$)	Fatura (R\$)	Quantidade	Tarifa (R\$)	Fatura (R\$)
MARÇO	2022	60	R\$ 66,79	R\$ 4.007,52	80	R\$ 26,52	R\$ 2.121,74
FEVEREIRO	2022	60	R\$ 65,88	R\$ 3.952,60	80	R\$ 26,16	R\$ 2.092,67
JANEIRO	2022	60	R\$ 64,20	R\$ 3.852,18	80	R\$ 25,49	R\$ 2.039,50
DEZEMBRO	2021	60	R\$ 67,86	R\$ 4.071,75	80	R\$ 26,95	R\$ 2.155,75
NOVEMBRO	2021	60	R\$ 68,12	R\$ 4.086,94	80	R\$ 27,05	R\$ 2.163,79
OUTUBRO	2021	60	R\$ 67,40	R\$ 4.044,28	80	R\$ 26,77	R\$ 2.141,21
SETEMBRO	2021	60	R\$ 66,03	R\$ 3.961,99	80	R\$ 26,22	R\$ 2.097,64
AGOSTO	2021	60	R\$ 70,35	R\$ 4.220,95	80	R\$ 27,93	R\$ 2.234,74
JULHO	2021	60	R\$ 70,10	R\$ 4.206,14	80	R\$ 27,84	R\$ 2.226,90
JUNHO	2021	60	R\$ 69,52	R\$ 4.171,38	80	R\$ 27,61	R\$ 2.208,50
MAIO	2021	60	R\$ 68,72	R\$ 4.122,96	80	R\$ 27,29	R\$ 2.182,86
ABRIL	2021	60	R\$ 66,41	R\$ 3.984,65	80	R\$ 24,29	R\$ 1.943,38
MARÇO	2021	60	R\$ 65,80	R\$ 3.947,86	75	R\$ 23,92	R\$ 1.793,71

Fonte: Elaboração própria (2023).

- Os valores mensais de consumo e de demanda em cada um dos segmentos de ponta e fora de ponta;
- Os valores mensais a serem faturados em cada um dos segmentos de ponta e fora de ponta;
- As despesas mensais com cada um dos modelos tarifários.

### 3.2 GESTÃO DE MANUTENÇÃO PARA A USINA FOTOVOLTAICA

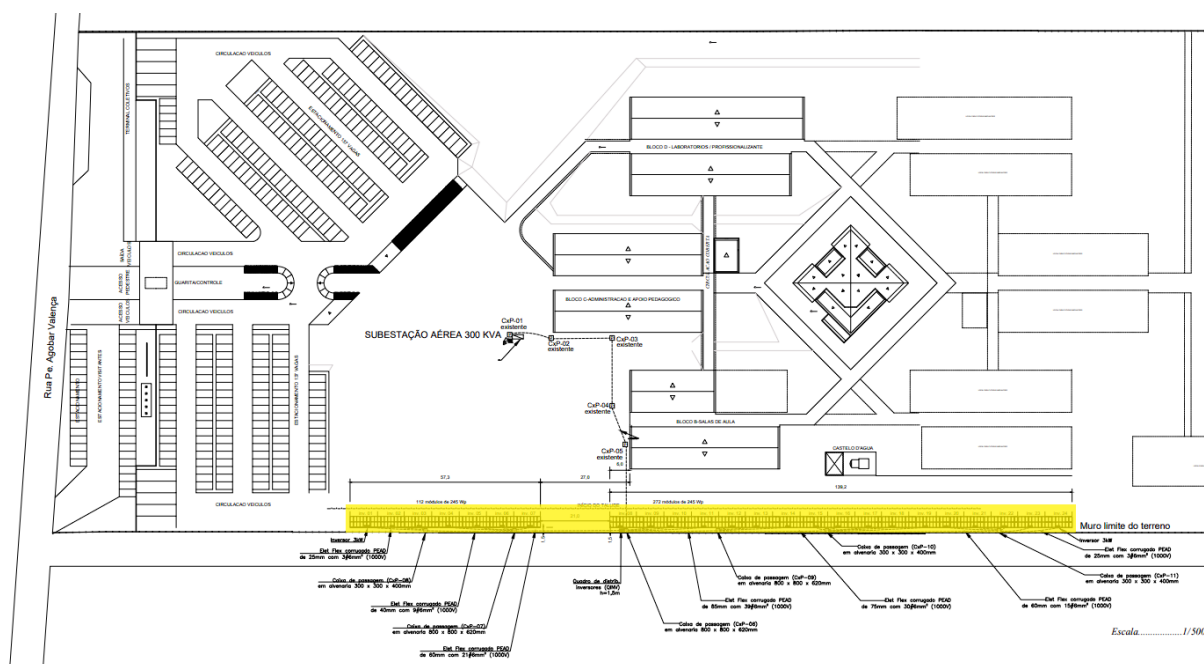
A usina fotovoltaica do campus Garanhuns é uma microgeradora de 72 kW (94,08 KWp – quilowatt pico) on grid, composta por 384 painéis fotovoltaicos de silício policristalino de 255 Wp (watt pico) conectados à 24 inversores de 3kW. Cada inversor é conectado a 2 séries de 8 painéis, totalizando 16 painéis para cada inversor. A usina ocupa uma área de 627 m<sup>2</sup> e possui uma grande importância financeira para a administração do instituto e acadêmica para os cursos superiores e técnicos ofertados pelo campus Garanhuns. A localização da usina, destacada em amarelo, pode ser vista na Figura 5.

Para a produção de um plano de manutenção para a usina fotovoltaica, os seguintes passos tiveram de ser concluídos:

1. Inspeção da usina para identificação de seus elementos constitutivos e possíveis modos de falha;

2. Preenchimento do formulário FMEA;
3. Produção de uma proposta de manutenção baseada nos dados do formulário FMEA.

Figura 5 – Planta baixa do projeto da usina



Fonte: Adaptado de Pedrosa Filho (2017).

Durante a inspeção, todos os itens verificados e os modos de falha observados foram registrados por meio de anotações, áudios descritivos e imagens. A produção desse acervo foi essencial para garantir a confiabilidade do conteúdo preenchido no formulário FMEA.

O método FMEA foi aplicado de acordo com a bibliografia e conhecimentos técnicos adquiridos ao longo da trajetória do curso de engenharia elétrica. Os critérios de atribuição para os indicadores foram baseados na referência proposta por Bem-Daya e Raouf (1996) e os parâmetros alcançados foram comparados aos obtidos em trabalhos relacionados citados neste texto, a fim de assegurar a fidelidade dos resultados.

Os Números de Prioridade de Risco (NPR) de cada modo de falha foram então comparados e utilizados, juntamente com suas respectivas ações recomendadas, na produção de um plano de manutenção periódica.



## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção serão discutidos os resultados alcançados para os dois objetivos motivadores do trabalho.

### 4.1 COLETA DE DADOS

Em ambas as vertentes do presente trabalho se fez necessário a coleta de dados referentes ao objeto de estudo. Para a análise tarifária, foram adquiridas as informações de consumo elétrico do período de fevereiro de 2019 até maio de 2023, entretanto, esse histórico não foi utilizado em sua totalidade para o estudo de adequação tarifária por dois motivos:

1. A usina fotovoltaica do campus teve sua geração iniciada em maio de 2021, sendo assim, os consumos mensais correspondentes ao período antes de maio de 2021 não refletem o atual perfil de consumo da instituição. Essa situação pode ser observada ao comparar o consumo ativo na fora de ponta do mês de junho de 2020, cerca de 5739 kWh, com o mesmo mês do ano de 2021, que não apresentou nenhum registro de consumo ativo fora de ponta, pois esse já estava sendo suprido pela microgeração fotovoltaica;
2. Entre os meses de maio de 2021 e fevereiro de 2022, o Brasil ainda estava enfrentando a pandemia do coronavírus, portanto muitas instituições estavam fechadas, ou realizavam suas atividades de forma remota, como foi o caso no campus Garanhuns. Durante esse intervalo, em nenhum mês foi registrado consumo ativo para o campus, situação que mudou com retorno das atividades em fevereiro de 2022.

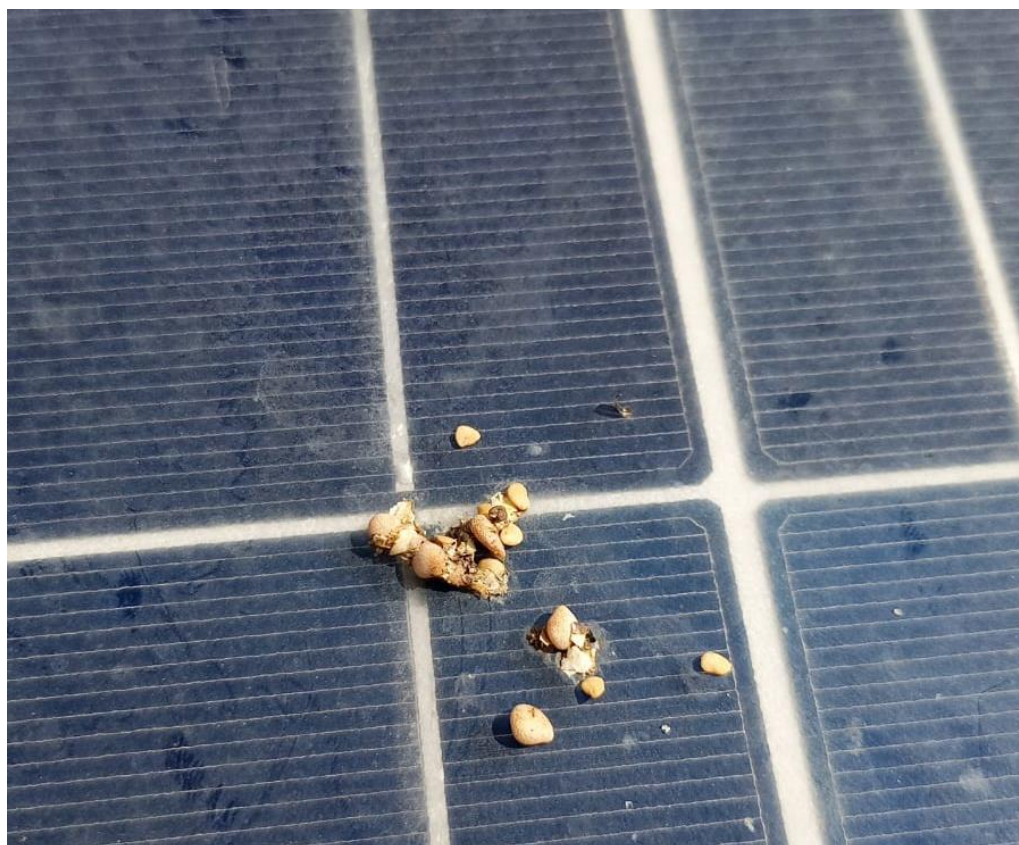
Dessa forma, os dados utilizados para a análise tarifária compreenderão apenas os meses de fevereiro de 2022 até maio de 2023. Uma importante observação que dever ser feita sobre o atual contrato de adesão do serviço de energia elétrica do campus é que em setembro de 2022 ele foi modificado da modalidade tarifária azul para a modalidade verde, decisão que será discutida mais à frente.

Para o preenchimento do formulário FMEA, a maior parte dos dados foram coletados a partir de uma inspeção de campo nas instalações da usina fotovoltaica. A

visita se mostrou indispensável para a correta aplicação do método, pois além de ser uma excelente maneira para identificação dos elementos que compõe a usina, também de verificar presencialmente alguns dos modos de falha e seus efeitos. Com a finalidade de demonstração do método, alguns dos itens observados serão descritos e ilustrados a seguir.

A figura 6 apresenta um painel que está coberto por uma camada de poeira e dejetos animais. Essa sujidade interfere na captação da radiação solar pelas células fotovoltaicas e diminui os níveis de geração.

Figura 6 - Painel fotovoltaico coberto de sujidades



Fonte: Elaboração própria (2023).

Em algumas seções da usina, a vegetação local se desenvolve e cresce por entre os painéis, ocasionando em sombreamento nas células fotovoltaicas e diminuição dos níveis de geração. Essa situação está exemplificada na Figura 7.

O acúmulo de poeira sobre o invólucro das caixas de proteção, visto na Figura 8, e a exposição aos elementos naturais (umidade, chuva e calor), pode comprometer

a vedação e submeter os equipamentos de proteção elétrica ao contato com agentes externos, criando o risco de interrupção da geração fotovoltaica.

Figura 7 - Vegetação sobre painéis fotovoltaicos



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 8 - Caixa de proteção coberta de sujidades



Fonte: Elaboração própria (2023).

Como último exemplo, a Figura 9 apresenta um inversor que está coberto de poeira e dejetos animais. Esses elementos podem causar corrosão na carcaça metálica do equipamento ou sobreaquecimento, caso se acumulem sobre o dissipador

de calor. Numa situação de falha, o inversor pode parar de funcionar, ser danificado ou perdido.

Figura 9 - Inversor coberto de sujidades

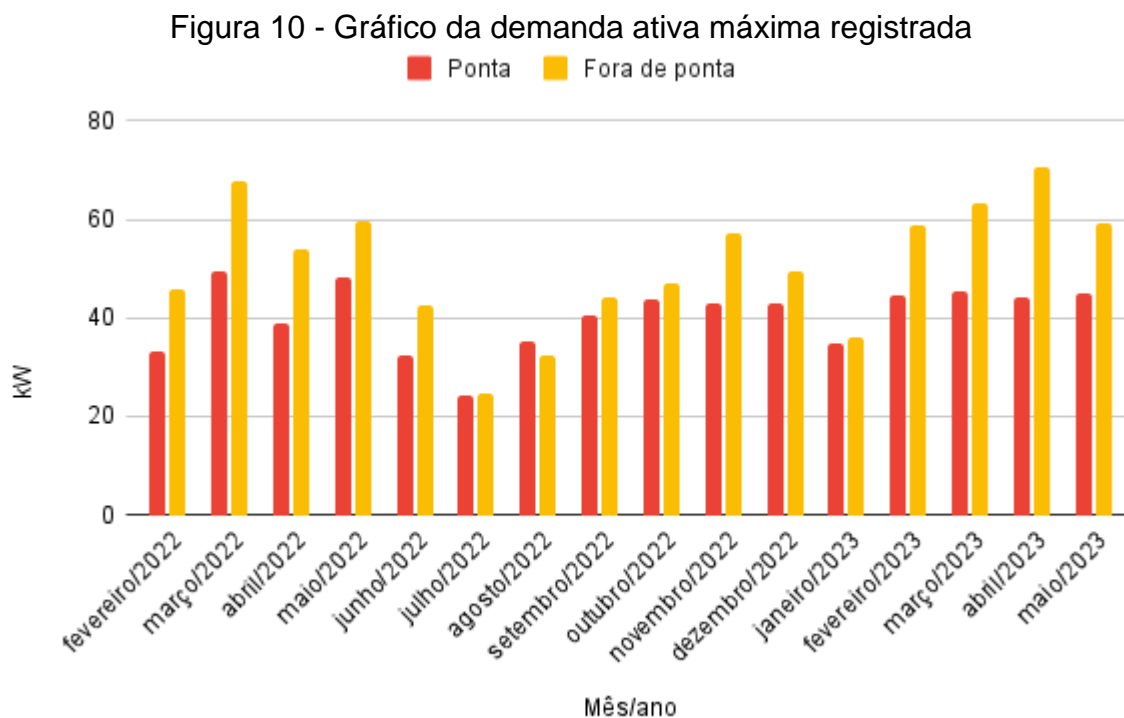


Fonte: Elaboração própria (2023).

Os elementos restantes serão vistos no formulário FMEA.

#### 4.2 ADEQUAÇÃO TARIFÁRIA

Dentro do período de 16 meses estudado, as demandas de potência ativa máximas registradas estão dispostas na Figura 10.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Os maiores valores de demanda ativa registrados foram de 49,34 kW na ponta em março de 2022 e 70,46 kW fora de ponta em abril de 2023. De 2022 para 2023 houve uma redução de 7,97% na maior demanda ativa registrada na ponta e um aumento de 4,11% na maior demanda registrada fora de ponta.

Atualmente o campus Garanhuns contrata uma demanda máxima única de 80 kW na modalidade verde. Esse valor é 13,54% maior que a máxima demanda ativa verificada, ou seja, a demanda contratada não é ideal. Para simulação de um novo perfil, mais adequado para a realidade da demanda ativa, foram utilizados os valores de 48 kW e 70 kW para a demanda contratada na ponta e fora de ponta, respectivamente. Essas demandas foram calculadas levando em consideração o cenário de aumento da demanda ativa fora de ponta e a ultrapassagem de 5% permitida pela ANEEL.

A tarifas utilizadas na simulação foram as mesmas definidas na Tabela de Tarifas de Energia Elétrica Grupo A (sem aplicação de impostos) vigentes para o período de 14/05/2023 a 28/04/2024, disponibilizados pela Neoenergia Pernambuco (2023). As Tabelas 8 e 9 apresentam o resultado das simulações para as modalidades azul e verde, respectivamente. O objetivo dessas simulações é verificar que

independente da modalidade tarifária, seja o retorno à modalidade azul ou permanência na modalidade verde, existirá um corte de gastos considerável caso a novo contrato de demanda seja adotado.

Tabela 8 - Simulação de otimização do contrato de demanda ativa (Modalidade azul)

Modalidade azul					
	Demanda ativa na ponta (kW)	Tarifa na ponta (R\$/kW)	Demanda ativa fora de ponta (kW)	Tarifa fora de ponta (R\$/kW)	Custo mensal (R\$)
Contrato antigo	60	R\$ 55,80	80	R\$ 22,87	R\$ 5.177,60
Contrato sugerido	48	R\$ 55,80	70	R\$ 22,87	R\$ 4.279,30
Economia mensal (R\$)					R\$ 898,30
Economia anual (R\$)					R\$ 10.779,60

Fonte: Elaboração própria (2023).

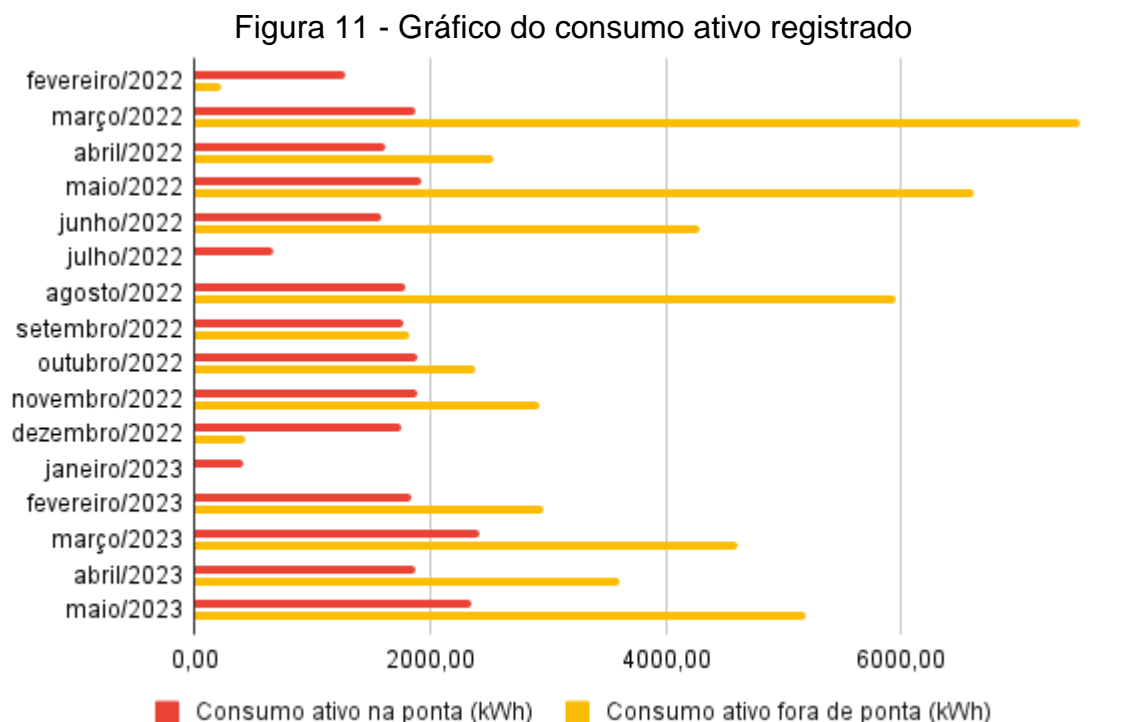
Tabela 9 - Simulação de otimização do contrato de demanda ativa (Modalidade verde)

Modalidade verde			
	Demanda ativa (kW)	Tarifa (R\$/kW)	Custo mensal (R\$)
Contrato atual	80	R\$ 22,87	R\$ 1.829,60
Contrato sugerido	70	R\$ 22,87	R\$ 1.600,90
Economia mensal (R\$)			R\$ 228,70
Economia anual (R\$)			R\$ 2.744,40

Fonte: Elaboração própria (2023).

Verificou-se que a mudança do contrato de demanda ativa acarretará uma economia significativa ao longo do ano. Percebe-se que os valores observados para a modalidade azul são mais expressivos, porém para o estudo de adequação tarifária, também é necessário analisar as diferentes tarifas sobre o consumo. Os novos valores de contrato de demanda ativa serão utilizados na análise de opção tarifária.

No intervalo de fevereiro de 2022 a maio de 2023 não foi registrado nenhum caso de consumo reativo excedente, dessa forma, a Figura 11 informa os consumos ativos mensais registrados nesse período.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Os dados estabelecidos acima foram utilizados para a simulação comparativa entre os custos das faturas nas modalidades azul e verde. Novamente, os valores das tarifas foram retirados de (NEOENERGIA PERNAMBUCO, 2023). O resultado dessa análise está disposto na Tabela 10.

Analisando a Tabela 10 percebe-se que a utilização da modalidade a verde é economicamente mais vantajosa que a modalidade azul. A economia mensal e total está disposta com mais detalhes na Tabela 11.

Os principais resultados a serem observados são os seguintes:

- Os meses de férias apresentam as economias mais significativas, pois o consumo nesses meses é bastante reduzido e o valor da fatura é constituído quase que inteiramente pelo custo da demanda ativa;
- A corte de gastos total com a adoção da modalidade tarifária verde chegou a R\$ 6.300,82, valor substancial que é comparável com valores das faturas de meses regulares. Ou seja, com utilização da tarifa verde, economiza-se praticamente um mês inteiro de consumo;

Tabela 10 - Comparação de faturas entre modalidades azul e verde

Adequação tarifária - Modalidade AZUL e VERDE						
Mês/ano	Custo do consumo na ponta (R\$)	Custo do consumo na ponta (R\$)	Custo do consumo fora de ponta (R\$)	Custo do consumo fora de ponta (R\$)	Valor da fatura (R\$)	Valor da fatura (R\$)
fevereiro/2022	R\$ 802,85	R\$ 2.541,64	R\$ 94,13	R\$ 94,13	R\$ 5.176,27	R\$ 4.236,66
março/2022	R\$ 1.177,70	R\$ 3.728,34	R\$ 3.116,79	R\$ 3.116,79	R\$ 8.573,79	R\$ 8.446,03
abril/2022	R\$ 1.018,50	R\$ 3.224,34	R\$ 1.050,77	R\$ 1.050,77	R\$ 6.348,56	R\$ 5.876,01
maio/2022	R\$ 1.202,85	R\$ 3.807,96	R\$ 2.739,69	R\$ 2.739,69	R\$ 8.221,84	R\$ 8.148,55
junho/2022	R\$ 998,44	R\$ 3.160,84	R\$ 1.775,63	R\$ 1.775,63	R\$ 7.053,37	R\$ 6.537,37
julho/2022	R\$ 414,62	R\$ 1.312,59	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 4.693,92	R\$ 2.913,49
agosto/2022	R\$ 1.117,17	R\$ 3.536,71	R\$ 2.467,12	R\$ 2.467,12	R\$ 7.863,59	R\$ 7.604,73
setembro/2022	R\$ 1.112,71	R\$ 3.522,59	R\$ 759,66	R\$ 759,66	R\$ 6.151,66	R\$ 5.883,15
outubro/2022	R\$ 1.185,43	R\$ 3.752,80	R\$ 986,60	R\$ 986,60	R\$ 6.451,32	R\$ 6.340,30
novembro/2022	R\$ 1.182,20	R\$ 3.742,58	R\$ 1.212,07	R\$ 1.212,07	R\$ 6.673,57	R\$ 6.555,55
dezembro/2022	R\$ 1.094,95	R\$ 3.466,36	R\$ 176,27	R\$ 176,27	R\$ 5.550,51	R\$ 5.243,52
janeiro/2023	R\$ 257,58	R\$ 815,45	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 4.536,88	R\$ 2.416,35
fevereiro/2023	R\$ 1.150,78	R\$ 3.643,11	R\$ 1.228,94	R\$ 1.228,94	R\$ 6.659,02	R\$ 6.472,95
março/2023	R\$ 1.514,54	R\$ 4.794,69	R\$ 1.910,75	R\$ 1.910,75	R\$ 7.704,58	R\$ 8.306,34
abril/2023	R\$ 1.178,58	R\$ 3.731,13	R\$ 1.495,02	R\$ 1.495,02	R\$ 6.952,90	R\$ 6.827,05
maio/2023	R\$ 1.468,90	R\$ 4.650,23	R\$ 2.150,52	R\$ 2.150,52	R\$ 7.898,72	R\$ 8.401,65

Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 11 - Economia da modalidade tarifária verde

Mês/ano	Ecônomoia pelo uso da modalidade verde
fevereiro/2022	R\$ 939,61
março/2022	R\$ 127,76
abril/2022	R\$ 472,55
maio/2022	R\$ 73,29
junho/2022	R\$ 516,00
julho/2022	R\$ 1.780,43
agosto/2022	R\$ 258,86
setembro/2022	R\$ 268,52
outubro/2022	R\$ 111,03
novembro/2022	R\$ 118,02
dezembro/2022	R\$ 306,99
janeiro/2023	R\$ 2.120,53
fevereiro/2023	R\$ 186,07
março/2023	-R\$ 601,76
abril/2023	R\$ 125,85
maio/2023	-R\$ 502,92
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 6.300,82</b>

Fonte: Elaboração própria (2023).



- Os meses de março e maio de 2023 acabaram apresentando um custo de fatura maior na modalidade verde do que na modalidade azul, isso se deu pelo fato desses meses terem valores de consumo ativo na ponta mais elevados. Esses gastos não são o suficiente para viabilizar a adoção do modelo tarifário azul imediatamente, mas são indicadores importantes para análises futuras.

Dessa maneira, de acordo com as análises realizadas na presente seção, recomenda-se a alteração do montante de demanda ativa contratada para 70 kW. Essa mudança contratual implicará em um corte de gastos mensais de pelo menos R\$ 228,70 e de pelo menos R\$ 2.744,40 anuais. Na prática, a economia alcançada será ainda maior. Se na simulação da Tabela 9, a tarifa ideal (sem impostos) da for substituída pela tarifa de demanda ativa (com impostos) vista no mês de maio de 2023, os cortes de gastos mensais chegam a R\$ 274,90 e anuais a R\$ 3.298,80.

Também se recomenda o monitoramento do consumo ativo na ponta nas instalações do campus, pois a intensificação desse consumo poderá validar viabilidade econômica da migração para a modalidade tarifária azul.

#### 4.3 PROPOSTA DO PLANO DE MANUTENÇÃO PARA A USINA FOTOVOLTAICA

Utilizando os dados coletados durante a inspeção de campo na usina fotovoltaica e os conhecimentos adquiridos com a bibliografia e literatura, foi possível completar o preenchimento da seção de inspeção do formulário FMEA apresentado anteriormente. O resultado está disponibilizado na Tabela 12.

De posse das informações contidas no formulário FMEA, o presente trabalho propõe três ações que poderão compor o plano de manutenção da usina fotovoltaica:

1. Realização de manutenções periódicas baseadas na hierarquia de prioridades informadas pelo parâmetro NPR;
2. Implementação do sistema de monitoramento em tempo real das características elétricas da usina fotovoltaica;
3. Aquisição de equipamentos que auxiliarão nas inspeções e manutenções da usina fotovoltaica.

Tabela 12 - Formulário FMEA preenchido

ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA											
Projeto: Proposta de manutenção da usina fotovoltaica do IFPE campus Garanhuns						FMEA nº: 01					
Organizado por: Múcio d'Emery Alves Filho						Componente: Usina fotovoltaica					
Reponsável do projeto: Múcio d'Emery Alves Filho						Data: 14/06/2023					
INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCONPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Painel Fotovoltaico	Conversão da radiação solar em energia elétrica	Sujeira ou sombreamento no vidro	Diminuição dos níveis de geração	4	Acúmulo de poeira; Dejetos animais; Vegetação local.	7	Manutenção não-programada	4	112	Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas no vidro	Perda do produto; Risco de Choque Elétrico; Risco de Incêndio.	10	Interpérie meteorológica; Sobreaquecimento; Manuseio inadequado; Vandalismo.	3	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	150	Inspeção visual periódica; Manuseio adequado; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Corrosões na moldura	Danificação do painel; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Exposição a água, umidade e/ou poeira.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	6	84	Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva; Manuseio adequado; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas na moldura	Danificação do painel; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Sobreaquecimento; Manuseio Inadequado.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	6	84	Inspeção visual periódica; Manuseio adequado; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCO NPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Painel Fotovoltaico	Conversão da radiação solar em energia elétrica	Descoloração do encapsulante	Diminuição dos níveis de geração	6	Sobreaquecimento; Exposição a raios ultravioleta.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	60	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas no encapsulante	Diminuição dos níveis de geração	6	Manuseio inadequado; Infiltração de agentes externos.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	60	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas nas células	Diminuição dos níveis de geração; Pontos quentes;	8	Interpérie meteorológica; Manuseio inadequado.	3	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	120	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Pontos quentes nas células	Diminuição dos níveis de geração	5	Células defeituosas; Sombreamento ; Diodos defeituosos.	6	Escolha de Materiais.	5	150	Inspeção periódica com uso de câmera termográfica; Utilizar materiais de qualidade.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCO NPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Painel Fotovoltaico	Conversão da radiação solar em energia elétrica	Delaminação	Diminuição dos níveis de geração; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Sobreaquecimento; Umidade.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	70	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Defeitos nos diodos de passagem	Diminuição dos níveis de geração; Redução da tensão de circuito aberto;	6	Curto-circuitos; Descargas Elétricas; Materiais de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Dispositivos de proteção elétrica.	3	36	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Bolhas ou rupturas na camada inferior (backsheet)	Diminuição dos níveis de geração; Exposição do painel à infiltração de agentes externos.	7	Sobreaquecimento; Umidade; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	6	84	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Corrosão ou ruptura na caixa de junção	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Diminuição dos níveis de geração; Fuga de corrente; Curto-circuito; Risco de incêndio;	9	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	4	72	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCONPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Estrutura metálica	Proteção mecânica, fixação e sustentação dos painéis	Corrosão na estrutura	Danificação ou perda dos painéis	8	Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal; Material de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	80	Inspeção visual periódica; Manutenção preventiva; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Rupturas/Torções na estrutura	Danificação ou perda dos painéis	8	Sobreaquecimento; Material de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	5	80	Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Condutores	Conduzir corrente elétrica por entre os diversos elementos que compõe a usina fotovoltaica	Condutor sobrecarregado	Sobreaquecimento do condutor; Risco de incêndio.	9	Condutores subdimensionados; Falha no sistema elétrico.	3	Escolha de materiais; Dispositivos de proteção elétrica.	2	54	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Defeitos na isolação do condutor	Curto-circuito; Diminuição dos níveis de geração; Abertura de circuito; Corrente de fuga; Sobreaquecimento; Risco de choque elétrico; Risco de incêndio.	10	Flexão dos condutores; Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal; Material de baixa qualidade.	2	Escolha de materiais; Dispositivos de proteção elétrica; Inspeção não-programada.	2	40	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Utilizar materiais de qualidade; Inspeção periódica; Teste de continuidade.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCO NPR	Ações recomendadas	Responsáveis
Caixa de proteção (string box)	Proporcionar proteção elétrica ao circuito de corrente contínua da usina fotovoltaica	Corrosão ou ruptura no invólucro da string box	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Diminuição dos níveis de geração; Fuga de corrente; Curto-circuito; Risco de incêndio;	9	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	4	72	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Inversor	Converter a corrente elétrica contínua, proveniente dos painéis, para corrente elétrica alternada	Corrosão ou ruptura no invólucro do inversor	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Diminuição dos níveis de geração; Curto-circuito; Perda do equipamento; Risco de incêndio;	10	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	4	80	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Sobreaquecimento do inversor	Danos ao equipamento; Diminuição dos níveis de geração; Risco de incêndio.	10	Falha dos dissipadores de calor; Acúmulo de poeira e/ou dejetos animais	3	Escolha de materiais; Inspeção não-programada.	4	120	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

INSPEÇÃO											
Item	Função	Modo de Falha	Efeito da Falha	SEVERIDADE	Causa da Falha	OCORRÊNCIA	Controles atuais	DETECÇÃO	RISCO	Ações recomendadas	Responsáveis
Inversor	Converter a corrente elétrica contínua, proveniente dos painéis, para corrente elétrica alternada	Sobrecarga no inversor	Sobreaquecimento no inversor; Dano ao equipamento; Diminuição dos níveis de geração	9	Falha elétrica	2	Dispositivos de proteção elétrica	2	36	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
		Inversor em falta elétrica	Interrupção da geração associada ao inversor	7	Queda de tensão; Falha nos painéis; Disparo dos dispositivos de proteção;	5	Inspeção não-programada	5	175	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Inspeção visual periódica.	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Central de distribuição	Núcleo de proteção e transmissão de energia da usina fotovoltaica	Corrosão ou ruptura no invólucro da central de distribuição	Exposição dos terminais elétricos à infiltração de agentes externos; Perda da geração; Perda do equipamento; Curto-circuito; Risco de choque elétrico; Risco de incêndio;	10	Sobreaquecimento; Exposição a água, umidade e/ou poeira; Ação animal.	2	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	2	40	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.
Malha de aterramento	Atuar na proteção contra descargas atmosféricas, dissipar cargas estáticas e mediar conexão Circuito-terra	Ruptura e/ou corrosão nos cabos de aterramento	Panorama no sistema de segurança elétrico da usina; Dano ao equipamento; Diminuição dos níveis de geração; Risco de choque elétrico.	9	Interferências meteorológicas; Sobreaquecimento; Ação animal.	1	Escolha de materiais; Inspeção não-programada; Dispositivos de proteção elétrica.	2	18	Monitoramento das características elétricas dos painéis; Manutenção preventiva; Inspeção visual periódica; Utilizar materiais de qualidade	Engenheiros do projeto; Equipe técnica.

Fonte: Elaboração própria (2023).

As manutenções periódicas baseadas nos resultados obtidos por este trabalho devem utilizar o parâmetro NPR como base para o desenvolvimento de seus cronogramas. Itens com índices NPR mais elevados implicam em maiores riscos de falha e conseqüentemente devem receber manutenções preventivas com maior frequência. As sugestões a seguir podem ser utilizadas no cronograma de manutenção de cada item.

Itens com modos de falha com NPR acima de 100 são os que apresentam os maiores riscos à operação da usina solar fotovoltaica, portanto devem ser inspecionados e receber as devidas manutenções mais frequentemente. Recomenda-se a manutenção desses equipamentos pelo menos 3 vezes ao ano. As ações de manutenção recomendadas estão disponíveis na Tabela 12.

Números de Prioridade de Risco em magnitudes entre 50 e 100 podem designar o item como sob risco moderado. São modos de falha que não ocorrem com tanta frequência, ou são detectados com mais facilidade. Para esses itens recomenda-se a manutenção bianual, também seguindo as ações recomendadas pelo formulário FMEA.

Modos de falha com NPR abaixo de 50 apresentam as menores severidades ou são detectados facilmente pelos dispositivos de proteção e controle existentes. Para garantir a confiabilidade da operação da usina solar fotovoltaica, os equipamentos associados a esses níveis de risco também devem ser inspecionados periodicamente, mas o cronograma utilizado pode conter apenas uma vistoria anual.

Observando a Tabela 12, percebe-se que em 11 dos 24 modos de falha encontrados, as ações recomendadas de controle e manutenção incluem o monitoramento das características elétricas da usina solar fotovoltaica. No presente momento, a única maneira de visualizar essas características é através da tela do inversor. Contudo, todos os 24 inversores PHB 3000-SS que estão instalados na usina possuem terminais de conexão de dados RS485. A sua conexão pode ser realizada através de um registrador de dados conectado a um servidor ou a uma rede *ethernet* local. A execução dessa atividade permitirá o monitoramento em tempo real dos parâmetros de produção de cada inversor e facilitará a detecção de possíveis defeitos. A recomendação acima, além de apontar uma maneira de reduzir os riscos de operação da usina, também pode servir como um futuro objeto de estudo para disciplinas da ênfase em controle e automação.



A última ação proposta é a aquisição de equipamentos e ferramentas para auxiliar na manutenção das instalações. Um dos equipamentos sugeridos é o registrador de dados, sua importância já foi enunciada na recomendação anterior. Sugere-se também adquirir uma câmera termográfica para inspeção de pontos quentes em diversos equipamentos da usina solar fotovoltaica. Sua utilização proporcionará a expansão das capacidades de inspeção e pode ser usado como ferramenta didática para o curso de engenharia elétrica. O incremento na eficiência e confiabilidade da usina devem ser vistos como motivadores para essas aquisições e a economia alcançada, caso o procedimento de adequação tarifária visto anteriormente seja posto em prática, pode ser repassada para auxiliar no processo de arrecadação de verbas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foram buscadas soluções para o gerenciamento energético do campus Garanhuns do Instituto Federal de Pernambuco. Essas soluções se deram por meio da análise tarifária do consumo elétrico do campus e da aplicação do método FMEA para otimizar a operação da usina solar fotovoltaica local.

Ao longo do estudo, foram obtidos resultados significativos. Através da análise tarifária, foram identificados métodos que podem ser utilizados para reduzir imediatamente os custos do instituto, além de procedimentos que promovem a eficiência energética que poderão ser utilizados em um horizonte de evolução do perfil de consumo. Levando em consideração os dados de consumo e de demanda mais recentes das instalações, foi proposta a redução da demanda ativa contratada para 70 kW, essa adequação resultará em uma economia de pelo menos R\$ 2.744,40 anuais, chegando a valores de R\$ 3.298,80 quando aplicados os impostos.

A aplicação do método FMEA à usina solar fotovoltaica permitiu identificação de vulnerabilidades no sistema. Com base nessa análise, foram recomendadas ações voltadas a manutenção que garantirão a evolução dos índices de eficiência e confiabilidade da usina. Dessa forma, pode-se afirmar que o presente estudo tem o potencial de fortalecer a infraestrutura elétrica do campus Garanhuns.

As soluções propostas neste trabalho têm relevância significativa para o campus e para a comunidade acadêmica. A implementação dessas medidas resultará não apenas em uma redução dos custos operacionais, mas também servirão de objetos de estudo para as novas gerações de alunos do IFPE.

É importante ressaltar que este estudo apresenta algumas limitações. Para garantir que as estratégias propostas se mantenham eficazes algumas medidas são recomendadas: O monitoramento contínuo das tarifas de energia elétrica, atualizações periódicas do contrato energético e revisões regulares do método FMEA.

Para pesquisas futuras, sugere-se o seguinte:

- Estudo da viabilidade econômica da alimentação em 69 kV;
- Viabilidade de implantação de medidores de energia locais;
- Viabilidade de migração para o mercado livre de energia;

- Viabilidade da readequação a modalidade de tarifação azul, tendo em vista a evolução de consumo do campus;
- Aplicação das ações recomendadas pelo método FMEA e estudo de seus resultados;
- Aplicação de outras ferramentas de Manutenção Centrada na Confiabilidade;

Em conclusão, espera-se que as medidas aqui apresentadas sejam implementadas, contribuindo assim para a melhoria contínua do gerenciamento energético e servindo como referência para outras instituições interessadas em buscar soluções semelhantes.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021**. 7 dez. 2021. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- ALVES, Emanuel Filipe Galdino. **Gerenciamento Ótimo da Energia para Consumidores Residenciais e Comerciais na Tarifa Branca**. 2019. P. 82. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande, PB. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, p. 37. 1994.
- BARROS, José Danilo Leão. **Gerenciamento de Energia Elétrica no Campus da UFCG em Campina Grande**. 2011. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande. 2011.
- BEM-DAYA, M., RAOUF, A. **A Revised Failure Mode and Effects Analysis Model**, International Journal of Quality & Reliability Management, Vol 13, n. 1, 1996.
- CAVENAGHI, Gustavo Lara Campos. **Modelo Ontológico e Método FMEA Aplicados à Análise de Falhas em Painéis Fotovoltaicos**. 2014. P. 55. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia elétrica) Universidade de São Paulo – USP. São Carlos. 2014.
- DA ROSA, Antonio Robson Oliveira; GASPARIN, Fabiano Perin. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista brasileira de energia solar**, v. 7, n. 2, p. 140-147. dez. 2016.
- DE ARAÚJO, Maria Vitória Medeiros. **Aplicação do FMEA como Suporte para a Gestão da Manutenção de Placas Fotovoltaicas**. 2018. P. 66. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Sumé, PB. 2018.
- ELEKTRO. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. Campinas. SP. 2012.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia 2023**. Maio de 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional: ano base 2014**. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-127/topico-97/Relat%C3%B3rio%20Final%202015.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2023
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Série: Estudos da Demanda de Energia. Nota Técnica DEA 13/15. **Demanda de Energia: 2050**. Jan. 2016. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- ELETROBRÁS. **Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. 3. ed. Itajubá. 2006.

GURSKI, Carlos Alberto. **Curso de formação de operadores de refinaria: noções de confiabilidade e manutenção industrial**. PETROBRAS. Curitiba. 2002.

MORO, Noberto; AURAS, André Paegle. **Introdução à Gestão da Manutenção**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Florianópolis. 2007. Disponível em: <<https://norbertocefetsc.pro.br/downloads/manutencao.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

NEOENERGIA PERNAMBUCO, **Tabela de Tarifas de Energia Elétrica: Grupo A**. Resolução homologatória Nº 3195 de 09 de maio de 2023. Disponível em: <[https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Documents/01\\_NEOENERGIA%20PERNAMBUCO\\_TARIFAS%20DE%20ENERGIA%20EL%C3%89TRICA%20GRUPO%20B%20\\_MAIO\\_2023\\_REH\\_N%C2%BA%203.195.pdf](https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Documents/01_NEOENERGIA%20PERNAMBUCO_TARIFAS%20DE%20ENERGIA%20EL%C3%89TRICA%20GRUPO%20B%20_MAIO_2023_REH_N%C2%BA%203.195.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2023.

PIMPALKAR, Rita et al. A comprehensive review on failure modes and effect analysis of solar photovoltaic system. **Materials Today: Proceedings**. V. 77, p. 687-691, 2023. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Rita-Pimpalkar/publication/366143016\\_A\\_comprehensive\\_review\\_on\\_failure\\_modes\\_and\\_effect\\_analysis\\_of\\_solar\\_photovoltaic\\_system/links/6418076a92cfd54f84144fb5/A-comprehensive-review-on-failure-modes-and-effect-analysis-of-solar-photovoltaic-system.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Rita-Pimpalkar/publication/366143016_A_comprehensive_review_on_failure_modes_and_effect_analysis_of_solar_photovoltaic_system/links/6418076a92cfd54f84144fb5/A-comprehensive-review-on-failure-modes-and-effect-analysis-of-solar-photovoltaic-system.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2023.

PEDROSA FILHO, Manoel Henrique de Oliveira. **Projeto Elétrico Instalação Sistema de Geração Solar Fotovoltaica de 72 kW**. Nov. 2017. Planta baixa.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL - CRESESB. Rio de Janeiro. Mar. 2014.

Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2023.

ROMANELI, Eduardo F. R. et al. **Análise de Desempenho do Sistema Fotovoltaico Conectado à rede do IFAM Campus Manaus Centro em seu Primeiro Ano de Operação**. Congresso Brasileiro de Energia Solar 2022 (CBENS 2022). Anais CBENS, 16 ago. 2022. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1044>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

SAKURADA, Eduardo Yuji. **As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no Desenvolvimento e na Avaliação de Produtos**. 2001. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis. 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80128>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

TOVAR, Pedro Henrique Henrigger. **Análise FMEA para Aplicação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade: Estudo de Caso em Motor Hidráulico Poclairn**. 2017. p. 65. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória. 2017. Disponível em:

<[https://engenhariamecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/21.\\_projeto\\_de\\_graduacao\\_2\\_-\\_finalizado.pdf](https://engenhariamecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/21._projeto_de_graduacao_2_-_finalizado.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2023.