



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

BRUNO RAFAEL MORAIS DA SILVA

SEGURANÇA PERIMETRAL PARA MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL:
ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA, TECNOLOGIAS E ESTUDO DE CASO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FORTALEZA

2025

BRUNO RAFAEL MORAIS DA SILVA

**SEGURANÇA PERIMETRAL PARA MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL:
ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA, TECNOLOGIAS E ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Engenharia de
Energias Renováveis da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Amanda Pereira
Monteiro

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S578s Silva, Bruno Rafael Morais da.
Segurança perimetral para minigeração fotovoltaica no Brasil : análise técnico-econômica, tecnologias e estudo de caso / Bruno Rafael Morais da Silva. – 2025.
65 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2025.
Orientação: Profa. Dra. Amanda Pereira Monteiro.
1. Minigeração fotovoltaica. 2. Segurança de perímetro. 3. Monitoramento patrimonial. 4. Análise comparativa de tecnologias. 5. Custo total de propriedade. I. Título.
- CDD 621.042
-

BRUNO RAFAEL MORAIS DA SILVA

**SEGURANÇA PERIMETRAL PARA MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL:
ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA, TECNOLOGIAS E ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Engenharia de
Energias Renováveis da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Amanda Pereira
Monteiro

Aprovada em: 16/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Amanda Pereira Monteiro (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Natália Maria Cordeiro Barroso

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Junior

Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À Instituição da Universidade Federal do Ceará, que pela Pró-Reitoria de Assistência Estudantil tornou possível minha estadia na cidade de Fortaleza e a conclusão deste curso.

À CAPES pelo apoio aos estudantes mediante bolsas e programas de incentivo à educação no Brasil.

À Profa. Dra. Amanda Pereira Monteiro, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Dra. Amanda Pereira Monteiro, Dra. Natália Maria Cordeiro Barroso e Francisco Ilson da Silva Junior pelo tempo, ensino, e pelas valiosas colaborações e sugestões.

À minha amada família que reside no interior do Ceará, pelos anos de formação cidadã e apoio financeiro e emocional. À minha mãe, Glayciane, minha avó, Liduína, minhas irmãs, Milena e Maria Luíza, meu tio, João Carlos, minha tia Andréia e à minha finada tia, Aline, que mesmo em seus últimos anos de vida, não poupou esforços em construir fortes laços de amizade comigo, me mostrando um amor que transborda em minha vida até os dias de hoje.

Aos colegas da turma de graduação, pelos momentos compartilhados, críticas e aplausos aos nossos acertos. Alguns ainda presentes na minha vida e que tornam meus dias mais leves e felizes. Em especial, Pedro Andreazza.

Aos colegas de vivência na Residência Universitária, pela troca cultural, pelos momentos de esporte e lazer, e de profundas conversas que me permitiram crescer como indivíduo. Em especial, Hefersson, Joaquim, Cleber, Weverton, Douglas, Jairo e Wagner.

À minha amada, Ana Carolina Miranda, pelo seu companheirismo, sua alegria, e pela sua maneira singular de viver a vida que me mostra todos os dias como essa experiência passageira pode ser repleta de pequenos grandes momentos de apreciação ao belo.

Aos meus amigos de anos, Wanderson, Rafael e Vitória, por tantos bons momentos que são criados a cada nova interação.

Aos meus amigos mais recentes a quem amo tanto, Alef, Juan, Nadine e Isabelle. Sou grato a cada um.

RESUMO

A crescente expansão da minigeração fotovoltaica no Brasil, impulsionada por seu potencial energético e benefícios econômicos, introduz desafios significativos relacionados à segurança patrimonial, dada a vulnerabilidade de plantas frequentemente localizadas em áreas remotas a furtos e vandalismo. Este trabalho identifica uma lacuna na literatura técnica quanto à análise comparativa de soluções de segurança de perímetro especificamente para este segmento (75 kW a 5 MW). O objetivo geral foi identificar, descrever e analisar criticamente tecnologias de monitoramento e segurança de perímetro (CFTV, IA, PIDS, barreiras, sensores, drones, etc.), comparando sua eficiência, aplicabilidade técnico-operacional e viabilidade econômica. Adotou-se uma metodologia de pesquisa mista, predominantemente qualitativa, com revisão bibliográfica e documental, complementada por análise quantitativa de custos (CAPEX, OPEX, TCO) baseada em dados do mercado brasileiro. A análise comparativa demonstrou que não há solução única ideal, recomendando-se uma abordagem de segurança em camadas, integrando diferentes tecnologias. A Inteligência Artificial (IA) aplicada ao videomonitoramento (CFTV) mostrou-se crucial para reduzir alarmes falsos e otimizar custos operacionais. O estudo de caso da UFV Cristalina, uma planta de minigeração real, ilustra a aplicação prática dessa abordagem, destacando a cerca perimetral como primeira barreira física e o sistema de CFTV com IA, NVR, acesso remoto e sirenes como elementos centrais para dissuasão e detecção eficazes. Conclui-se que a seleção da configuração ótima depende de análise de risco específica, porte da planta, orçamento e condições locais, sendo a análise do Custo Total de Propriedade (TCO) fundamental para a decisão. O estudo propõe diretrizes e cenários comuns para auxiliar na escolha de sistemas eficazes e economicamente viáveis.

Palavras-chave: Minigeração Fotovoltaica, Segurança de Perímetro, Monitoramento Patrimonial, Análise Comparativa de Tecnologias, Custo Total de Propriedade, Inteligência Artificial, Estudo de Caso.

ABSTRACT

The growing expansion of photovoltaic minigeneration in Brazil, driven by its energy potential and economic benefits, introduces significant challenges related to asset security, given the vulnerability of plants often located in remote areas to theft and vandalism. This work identifies a gap in the technical literature regarding the comparative analysis of perimeter security solutions specifically for this segment (75 kW to 5 MW). The general objective was to identify, describe, and critically analyze perimeter monitoring and security technologies (CCTV, AI, PIDS, barriers, sensors, drones, etc.), comparing their efficiency, technical-operational applicability, and economic viability. A mixed research methodology was adopted, predominantly qualitative, with bibliographic and documentary review, complemented by quantitative cost analysis (CAPEX, OPEX, TCO) based on Brazilian market data. The comparative analysis showed that there is no single ideal solution, recommending a layered security approach integrating different technologies. Artificial Intelligence (AI) applied to video surveillance (CCTV) proved crucial for reducing false alarms and optimizing operational costs. The UFV Cristalina case study, a real minigeneration plant, illustrates the practical application of this approach, highlighting the perimeter fence as the first physical barrier and the CCTV system with AI, NVR, remote access, and sirens as central elements for effective deterrence and detection. It is concluded that the selection of the optimal configuration depends on a specific risk analysis, plant size, budget, and local conditions, with Total Cost of Ownership (TCO) analysis being fundamental for the decision. The study proposes guidelines and typical scenarios to assist in choosing effective and economically viable systems.

Keywords: Photovoltaic Minigeneration, Perimeter Security, Asset Monitoring, Comparative Technology Analysis, Total Cost of Ownership, Artificial Intelligence, Case Study.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil..... | 17 |
| Figura 2 - Riscos de segurança para usinas fotovoltaicas | 19 |
| Figura 3 - Cerca perimetral de uma UFV | 24 |
| Figura 4 - Exemplo de diagrama do SCADA de uma UFV | 25 |
| Figura 5 - Esquema de IOT de uma UFV | 26 |
| Figura 6 - Sistema de detecção por fibra óptica instalado ao longe de uma cerca perimetral.. | 28 |
| Figura 7 - Drone sobrevoando uma UFV como parte do sistema de segurança | 29 |
| Figura 8 - Topologias de comunicação existentes no mercado | 31 |
| Figura 9 - Esquema de Topologia de comunicação do CFTV da UFV Cristalina..... | 33 |
| Figura 10 - À esquerda, exemplo de poste comercial para CFTV, à direita, base de um poste de CFTV com seu chumbador | 35 |
| Figura 11 - Desenho técnico de um QDC instalado em poste | 36 |
| Figura 12 - Sirene SIR 3000, escolhida para o projeto da UFV Cristalina | 38 |
| Figura 13 - Diagrama de camadas da integração de sistemas. | 46 |
| Figura 14 - Desenho técnico do detalhamento da cerca perimetral..... | 51 |
| Figura 15 - Câmera VIP 94120 ULTRA IA FT | 52 |
| Figura 16 - Câmera VIP 7445 SD IA FT | 52 |
| Figura 17 - Instalação de um poste de CFTV com câmera e Sirene | 53 |
| Figura 18 - Diagrama de ligação dos equipamentos internos ao QDC..... | 54 |
| Figura 19 - Diagrama unifilar da rede de fibra óptica implementada, mostrando a interligação entre os QDCs..... | 55 |
| Figura 20 - Diagrama de camadas da integração dos sistemas de segurança da UFV Cristalina | 56 |
| Figura 21 - Planta baixa da usina com layout do sistema de segurança, mostrando posição dos postes, câmeras e traçado da fibra óptica..... | 56 |
| Figura 22 – Planta baixa da usina com layout do sistema de segurança, com ênfase na cobertura de alcance das câmeras de segurança. | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tabela comparativo de tecnologias de segurança de perímetro para minigeração .. | 44 |
| Tabela 2 - Tabela de soluções recomendadas para diferentes cenários de porte de usinas | 49 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ABESE | Associação Brasileira das Empresas de Sistemas Eletrônicos de Segurança |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABSOLAR | Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CA | Corrente Alternada |
| CAPEX | <i>Capital Expenditure</i> (Despesas de Capital) |
| CC | Corrente Contínua |
| CFTV | Circuito Fechado de Televisão |
| DPS | Dispositivo de Proteção contra Surtos |
| EMI | Interferência Eletromagnética |
| FAR | <i>False Alarm Rate</i> (Taxa de Falsos Alarmes) |
| GD | Geração Distribuída |
| IA | Inteligência Artificial |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IHM | Interface Homem-Máquina |
| IoT | <i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas) |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| IR | Infravermelho |
| IVA | Inteligência de Vídeo Analítica |
| LoRaWAN | <i>Long Range Wide Area Network</i> |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentar |
| NR-10 | Norma Regulamentadora 10 (Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade) |

| | |
|-------|--|
| NVR | <i>Network Video Recorder</i> |
| OPEX | <i>Operational Expenditure</i> (Despesas Operacionais) |
| O&M | Operação e Manutenção |
| PIDS | <i>Perimeter Intrusion Detection Systems</i> (Sistemas de Detecção de Intrusão Perimetral) |
| PoE | <i>Power over Ethernet</i> |
| PTZ | Pan-Tilt-Zoom |
| PUCPR | Pontifícia Universidade Católica do Paraná |
| QDC | Quadro de Comando |
| QoS | <i>Quality of Service</i> (Qualidade de Serviço) |
| REN | Resolução Normativa |
| ROI | <i>Return on Investment</i> (Retorno sobre o Investimento) |
| RSTP | <i>Rapid Spanning Tree Protocol</i> |
| SCADA | <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> |
| SCEE | Sistema de Compensação de Energia Elétrica |
| SFV | Sistema Fotovoltaico |
| SIBI | Sistema Integrado de Bibliotecas |
| TCO | <i>Total Cost of Ownership</i> (Custo Total de Propriedade) |
| UFC | Universidade Federal do Ceará |
| UFV | Usina Fotovoltaica |
| VMS | <i>Video Management Software</i> (Software de Gerenciamento de Vídeo) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----|-------------|
| R\$ | Real |
| % | Porcentagem |
| GW | Gigawatt |
| kW | Quilowatt |
| MW | Megawatt |
| MP | Megapixel |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| AGRADECIMENTOS..... | 6 |
| RESUMO | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | 11 |
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 Formulação do Problema e Justificativa..... | 18 |
| 1.2 Objetivos..... | 19 |
| 1.2.1 Objetivo Geral..... | 19 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos..... | 20 |
| 1.3 Estrutura do Trabalho | 20 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 22 |
| 2.1 Plantas Fotovoltaicas: Conceitos Fundamentais e o Contexto da Minigeração | 22 |
| 2.2 A Importância Estratégica do Monitoramento de Perímetro em Plantas de Minigeração | 22 |
| 2.3 Tecnologias de Monitoramento de Segurança do Perímetro: Uma Visão Detalhada.. | 23 |
| 2.3.1 Barreiras Físicas Passivas (Cercas)..... | 23 |
| 2.3.2 Sistemas de Controle de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) | 24 |
| 2.3.3 IoT (Internet das Coisas)..... | 25 |
| 2.3.4 Videomonitoramento (CFTV - Circuito Fechado de Televisão)..... | 26 |
| 2.3.5 Sensores de Barreira (Infravermelho e Micro-ondas)..... | 27 |
| 2.3.6 Sistemas de Detecção de Intrusão Perimetral (PIDS - Perimeter Intrusion Detection Systems)..... | 28 |
| 2.3.7 Tecnologias Avançadas: LiDAR, Radar e Drones..... | 29 |
| 2.3.8 Inteligência Artificial (IA) e Análise de Vídeo | 30 |
| 2.3.9 Topologias de Comunicação para Sistemas de Segurança..... | 30 |
| 2.3.10 Meios Físicos de Comunicação..... | 33 |

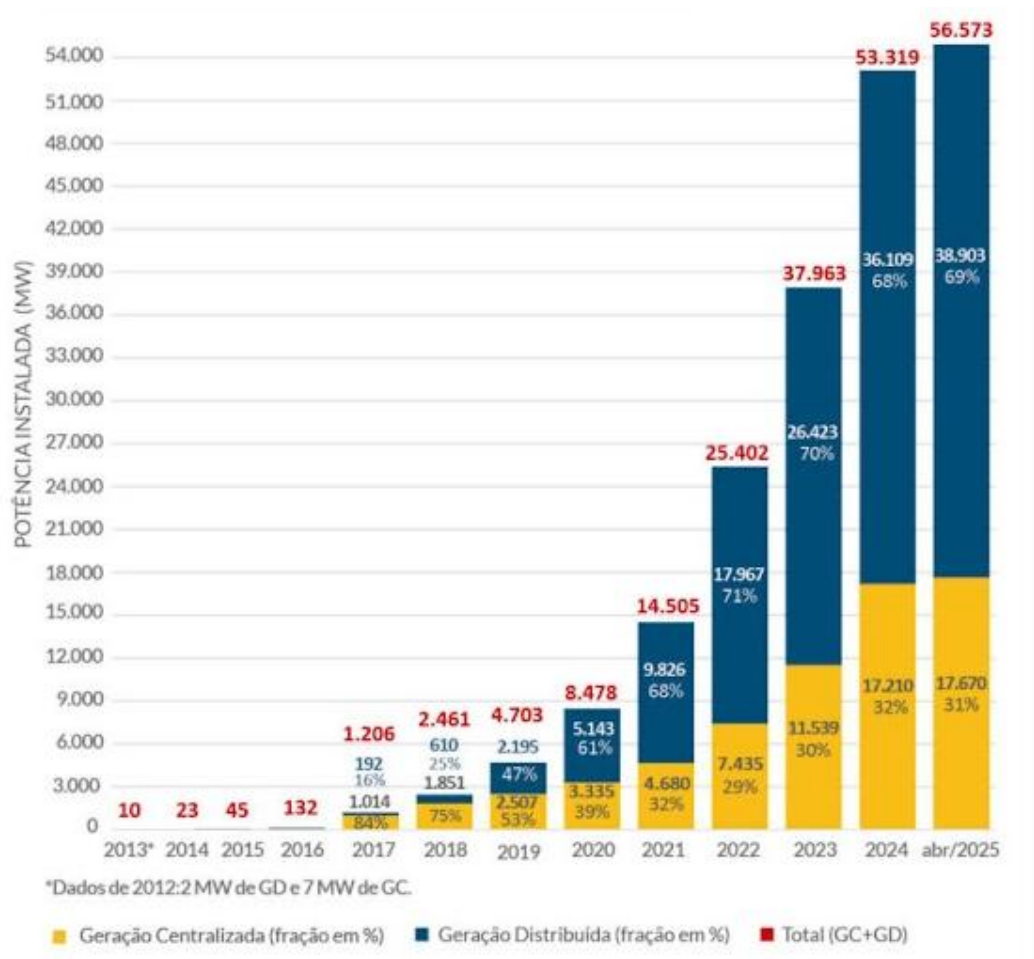
| | |
|---|----|
| 2.3.11 Considerações para Seleção | 34 |
| 2.3.12 Infraestrutura de Suporte: Postes, Quadros De Comando, Comunicação e Alimentação | 35 |
| 2.3.13 Sistemas de Alerta e Dissuasão (Sirenes)..... | 37 |
| 2.4 Padrões e Regulamentos Técnicos Aplicáveis..... | 38 |
| 3 METODOLOGIA | 40 |
| 3.1 Abordagem Metodológica | 40 |
| 3.2 Fontes de Dados Utilizadas | 40 |
| 3.3 Procedimentos de Análise..... | 41 |
| 3.3.1 Análise de Conteúdo | 41 |
| 3.3.2 Síntese e Sistematização | 41 |
| 3.3.3 Análise Comparativa Qualitativa | 41 |
| 3.3.4 Análise Comparativa Quantitativa (Custos)..... | 41 |
| 3.3.5 Elaboração de Diretrizes e Recomendações | 42 |
| 4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO DE PERÍMETRO E AVALIAÇÃO ECONÔMICA | 43 |
| 4.1 Avaliação Comparativa Técnico-Operacional e Econômica (com Foco em Custos Brasileiros)..... | 43 |
| 4.2 A Abordagem em Camadas e a Integração de Sistemas | 46 |
| 4.3 Adequação da Tecnologia aos Cenários de Minigeração | 47 |
| 5 ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE SEGURANÇA CFTV EM USINA DE MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA | 50 |
| 5.1 Contexto e Objetivos do Estudo de Caso | 50 |
| 5.2 Arquitetura e Componentes do Sistema Implementado | 50 |
| 5.2.1 Infraestrutura de Barreira Física..... | 51 |
| 5.2.2 Sistema de Videomonitoramento (CFTV)..... | 51 |
| 5.3 Descrição Detalhada da Implementação | 54 |
| 5.3.1 Layout Geral do Sistema..... | 55 |

| | |
|--|----|
| 5.3.2 Infraestrutura de Comunicação..... | 57 |
| 5.3.3 Infraestrutura de Alimentação | 57 |
| 5.3.4 Central de Monitoramento | 57 |
| 5.3.5 Software e Configurações | 57 |
| 5.4 Processo de Instalação | 58 |
| 5.5 Resultados, Desempenho e Discussão..... | 58 |
| 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS..... | 60 |
| 6.1 Limitações do Estudo | 60 |
| 6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros | 61 |
| REFERÊNCIAS | 63 |

1 INTRODUÇÃO

O Brasil detém um elevado potencial para a geração de energia solar. Entretanto, enfrenta desafios significativos no setor de minigeração distribuída, notadamente a carência de infraestrutura, o custo elevado dos equipamentos e as barreiras regulatórias. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica tornou-se parte essencial dessa transição energética, consolidando-se como a segunda maior fonte na matriz elétrica nacional e superando a marca significativa de 56 GW de capacidade instalada ativa como mostra a Figura 1 (Aneel/Absolar, 2025). Essa rápida expansão, impulsionada por políticas de incentivo, avanços tecnológicos que reduziram custos e uma crescente consciência ambiental, posiciona o Brasil em destaque no cenário global.

Figura 1 - Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil



Fonte: adaptado, Aneel/Absolar, 2025

Contudo, o rápido crescimento da geração distribuída introduz desafios complexos relacionados à supervisão, operação e, fundamentalmente, à proteção dos ativos físicos. Nesse cenário, as plantas de minigeração distribuída – legalmente definidas pela Lei nº 14.300/2022

como centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectadas diretamente à rede de distribuição local – assumem um papel proeminente (Brasil, 2022). Essas instalações são essenciais para democratizar o acesso à energia limpa, permitindo que empresas, indústrias e propriedades rurais gerem sua própria eletricidade, reduzam custos operacionais e contribuam para a estabilidade da rede elétrica. Sua dispersão geográfica, muitas vezes em locais remotos ou de difícil acesso, as torna particularmente vulneráveis a riscos.

A exposição a riscos de segurança significativos, como furto de equipamentos valiosos (painéis solares, inversores, cabos de cobre) e atos de vandalismo, representa uma ameaça constante à estabilidade financeira e à operação contínua desses empreendimentos, impactando diretamente o retorno sobre o investimento e os custos de seguro. A figura 2 exemplifica alguns dos principais riscos à segurança para usinas fotovoltaicas. Nesse âmbito, a implementação de um sistema robusto de segurança de perímetro, incluindo barreiras físicas eficazes como a cerca, não deve ser encarada como um custo adicional, mas como um investimento estratégico na mitigação de riscos e na proteção do capital investido. O presente trabalho, por meio de um estudo de caso prático em uma usina real, a UFV Cristalina, busca ilustrar a aplicação e a eficácia de um sistema de segurança em camadas, que integra desde a barreira física inicial até tecnologias avançadas de videomonitoramento e resposta.

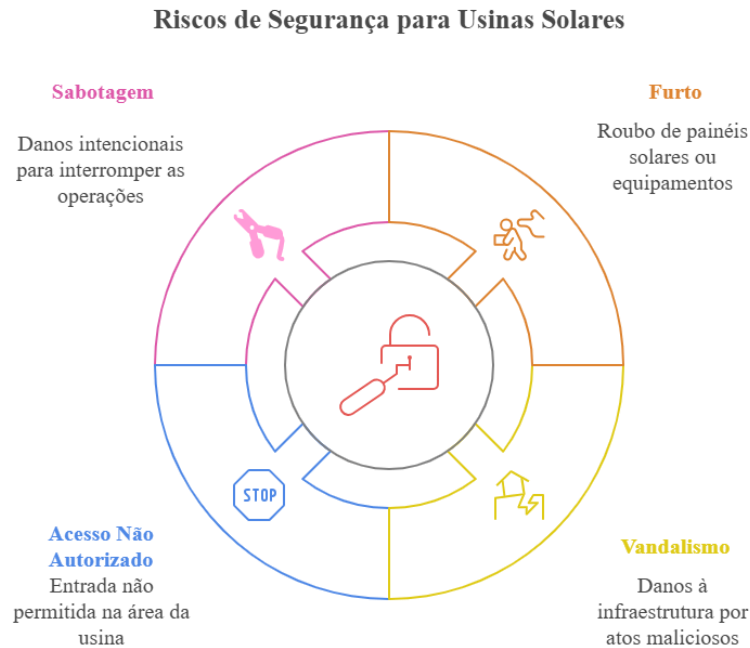
O problema de pesquisa que norteia este trabalho justifica-se, portanto, pela crescente importância das fontes de energia renováveis, especialmente das usinas de minigeração fotovoltaica, na matriz energética brasileira, demandando medidas de proteção adequadas para assegurar sua sustentabilidade, eficiência e viabilidade econômica.

1.1 Formulação do Problema e Justificativa

A necessidade urgente de proteger as usinas de minigeração contra ameaças físicas e operacionais levanta a seguinte questão central de pesquisa: Qual o projeto de sistema para proteção do perímetro de segurança que oferece a melhor relação custo-benefício e adequação técnico-operacional para diferentes tamanhos e cenários de usinas fotovoltaicas de minigeração no Brasil?

A relevância deste trabalho reside na identificação de uma lacuna crítica na literatura técnico-científica, tanto nacional quanto internacional. Embora existam estudos sólidos sobre segurança e monitoramento para grandes usinas centrais de geração, o segmento específico da minigeração distribuída carece de análises comparativas e aprofundadas que abordem, de forma sistemática, a ampla gama de tecnologias de monitoramento perimetral atualmente em uso.

Figura 2 - Riscos de segurança para usinas fotovoltaicas



Fonte: autor.

Este estudo preenche essa lacuna ao apresentar uma análise crítica e fundamentada das opções tecnológicas, validada por um estudo de caso real, a UFV Cristalina, que exemplifica a implementação de um sistema de segurança perimetral robusto e eficaz para uma planta de minigeração. Seu objetivo é fornecer subsídios práticos e diretrizes claras para orientar engenheiros, projetistas, investidores e gestores de usinas na desafiadora tarefa de selecionar e implantar sistemas de segurança perimetral que sejam não apenas eficazes na mitigação de riscos, mas também financeiramente viáveis e alinhados às boas práticas de engenharia e às normas técnicas vigentes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Identificar, descrever e analisar criticamente soluções tecnológicas para o monitoramento e a segurança patrimonial do perímetro de plantas de minigeração fotovoltaica, comparando sua eficiência, aplicabilidade técnico-operacional e viabilidade econômica em diferentes cenários.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Mapear e caracterizar os principais riscos e desafios específicos à segurança de perímetro enfrentados por plantas de minigeração fotovoltaica no contexto brasileiro;
2. Realizar uma revisão abrangente da literatura sobre as principais tecnologias de monitoramento de perímetro disponíveis no mercado
3. Investigar as possibilidades e os desafios da integração dessas tecnologias de segurança com sistemas de supervisão e controle (SCADA) e plataformas de Internet das Coisas (IoT);
4. Desenvolver análise comparativa detalhada da relação custo-benefício de diferentes sistemas e configurações de segurança de perímetro, considerando CAPEX, OPEX e o potencial retorno sobre o investimento em cenários típicos de minigeração;
5. Propor um conjunto de diretrizes e recomendações práticas para auxiliar na seleção, projeto e implementação de sistemas eficazes de monitoramento e segurança de perímetro, adequados a diferentes portes, orçamentos e contextos de plantas de minigeração.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em **seis capítulos**, organizados de forma a conduzir o leitor desde a contextualização do problema até as conclusões e recomendações finais, incluindo um estudo de caso prático.

O Capítulo 1, esta Introdução, apresenta o panorama da energia solar e da minigeração no Brasil, contextualiza a problemática da segurança perimetral, define formalmente o problema de pesquisa, justifica a relevância do estudo e detalha os objetivos geral e específicos que norteiam a investigação. Neste capítulo, já se introduz a relevância do estudo de caso da UFV Cristalina como um exemplo prático que será explorado ao longo do trabalho.

O Capítulo 2, intitulado Revisão de Literatura, aprofunda os conceitos fundamentais sobre usinas fotovoltaicas, com foco nas características da minigeração. Em seguida, descreve detalhadamente as diversas tecnologias de monitoramento perimetral abordadas no estudo, explorando seus princípios de funcionamento, vantagens e limitações. Por fim, discute as principais normas técnicas (ABNT, IEC) e regulamentações (ANEEL, NR-10) pertinentes ao tema, e aborda as topologias de comunicação. Será dada especial atenção às tecnologias

empregadas no estudo de caso, como cercas, CFTV, NVR, sirenes e seus componentes, contextualizando-as no cenário mais amplo.

O Capítulo 3, Metodologia, expõe os procedimentos metodológicos empregados para a realização da pesquisa, detalhando a abordagem quali-quantitativa, as fontes de dados utilizadas (pesquisa bibliográfica e documental) e os critérios adotados para a análise comparativa das tecnologias.

O Capítulo 4, Análise Comparativa das Tecnologias e Avaliação Econômica, dedica-se à análise crítica e comparativa das soluções de monitoramento perimetral sob a ótica técnico-operacional e econômica. Discute a integração de sistemas, a abordagem em camadas, a adequação das tecnologias a diferentes contextos de minigeração e a avaliação de custo-benefício e TCO.

O Capítulo 5, Estudo de Caso: Implementação de Sistema de Segurança na UFV Cristalina, apresenta a aplicação prática dos conceitos e tecnologias discutidos, detalhando o projeto de segurança implementado na usina. Este capítulo foca na arquitetura, nos métodos de segurança e na integração dos equipamentos, como a cerca perimetral, o sistema de CFTV com câmeras PTZ e NVR, o acesso remoto e a integração de sirenes, sem repetir as descrições detalhadas dos equipamentos já apresentadas no Capítulo 2.

Finalmente, o Capítulo 6, Conclusões e Recomendações, sintetiza os principais achados do estudo, responde à questão de pesquisa, aponta as limitações da investigação e apresenta um conjunto de recomendações práticas para o setor. Sugere, ainda, temas relevantes para trabalhos futuros nesta área de pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Plantas Fotovoltaicas: Conceitos Fundamentais e o Contexto da Minigeração

A conversão direta da luz solar em eletricidade, fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico, constitui a base tecnológica que impulsiona a expansão da energia solar em escala global. As usinas fotovoltaicas (UFVs) são compostas, essencialmente, por painéis solares – módulos que agregam células semicondutoras (majoritariamente de silício) responsáveis por transformar a radiação solar em corrente elétrica contínua (CC). Além dos módulos, componentes cruciais incluem os inversores, que convertem a CC em corrente alternada (CA) compatível com a rede elétrica ou com as cargas a serem alimentadas, as estruturas de montagem, o cabeamento específico e os dispositivos de proteção. A geração fotovoltaica pode ser classificada conforme sua conexão à rede: sistemas isolados ou conectados à rede.

No Brasil, o arcabouço regulatório da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), notadamente a Resolução Normativa (REN) nº 482/2012 e suas atualizações (como a REN 687/2015), estabeleceu as diretrizes para a Geração Distribuída (GD). Esse marco permitiu aos consumidores instalar sistemas de geração de pequeno porte em suas unidades e compensar a energia injetada na rede com o seu próprio consumo, através do sistema de compensação de energia elétrica. A Lei nº 14.300/2022, o Marco Legal da Geração Distribuída, consolidou e aprimorou essas regras, definindo as categorias de microgeração (até 75 kW) e minigeração distribuída (acima de 75 kW e até 5 MW para fontes não despacháveis, como a solar) (Brasil, 2022).

As usinas de minigeração, foco deste trabalho, representam um segmento vital, pois aliam uma capacidade de geração relevante à flexibilidade de conexão em redes de distribuição de média tensão. Frequentemente adotadas por empresas, indústrias, estabelecimentos rurais ou consórcios, visam à redução de custos com energia e à promoção da sustentabilidade. Contudo, conforme apontado na introdução, a dispersão geográfica e a localização muitas vezes remota dessas instalações intensificam os desafios associados à segurança física e à supervisão operacional (Fernandes, 2023).

2.2 A Importância Estratégica do Monitoramento de Perímetro em Plantas de Minigeração

O monitoramento em usinas fotovoltaicas abrange múltiplas dimensões, desde o acompanhamento do desempenho energético (medição de irradiância, temperatura, produção CC/CA, eficiência de inversores) até a supervisão da integridade estrutural e, crucialmente, a

segurança patrimonial. Enquanto a monitorização do desempenho visa validar o retorno do investimento e identificar falhas operacionais (e.g., sombreamento, sujidade nos painéis, defeitos em inversores), o monitoramento de perímetro constitui a linha de defesa contra ameaças externas.

Furtos e atos de vandalismo são ocorrências comuns em plantas de minigeração, visando especialmente componentes de cobre e cabos, que possuem valor no mercado ilegal (Canal Solar, 2025). Tais incidentes geram não apenas custos diretos (reposição de equipamentos, reparos), mas também indiretos (perda de receita por paralisação da produção, aumento de preços de seguro). Nesse sentido, a implementação de um sistema robusto de segurança de perímetro não deve ser encarada como um custo adicional, mas como um investimento estratégico na mitigação de riscos e na proteção do capital investido. Adicionalmente, a vigilância de perímetro, especialmente quando integrada a sistemas de câmeras, pode auxiliar na detecção de outros eventos adversos, como a entrada não autorizada de animais que possam causar danos aos equipamentos. A capacidade de detecção precoce e de resposta rápida é, portanto, fundamental para minimizar prejuízos e assegurar a continuidade operacional (MARTINS, 2019).

2.3 Tecnologias de Monitoramento de Segurança do Perímetro: Uma Visão Detalhada

O mercado disponibiliza um portfólio diversificado de tecnologias para segurança de perímetro, passíveis de emprego isolado ou, de forma mais eficaz, em configurações integradas. Apresentam-se, a seguir, as principais tecnologias pertinentes ao contexto das plantas de minigeração fotovoltaica com foco naquelas que se mostraram mais viáveis e eficazes para o segmento de até 5MW, como exemplificado no estudo de caso da UFV Cristalina.

2.3.1 Barreiras Físicas Passivas (Cercas)

As barreiras físicas passivas, como as cercas, constituem a primeira linha de defesa em sistemas de segurança perimetral, um exemplo desta barreira se encontra na Figura 3. Sua função principal é dissuadir potenciais intrusos e retardar tentativas de acesso não autorizado, estabelecendo uma delimitação física clara da propriedade. Diferentes tipos de cercas, como alambrados, cercas de arame farpado ou concertina, são empregados, variando em nível de robustez e custo. Embora não possuam capacidade de detecção intrínseca, são elementos cruciais para a contenção e servem como plataforma para a instalação de tecnologias de detecção ativas, como sensores de cerca (PIDS) ou câmeras de videomonitoramento. A escolha

do tipo de cerca depende da análise de risco, do orçamento e das condições locais, visando maximizar a eficácia como barreira inicial.

Figura 3 - Cerca perimetral de uma UFV



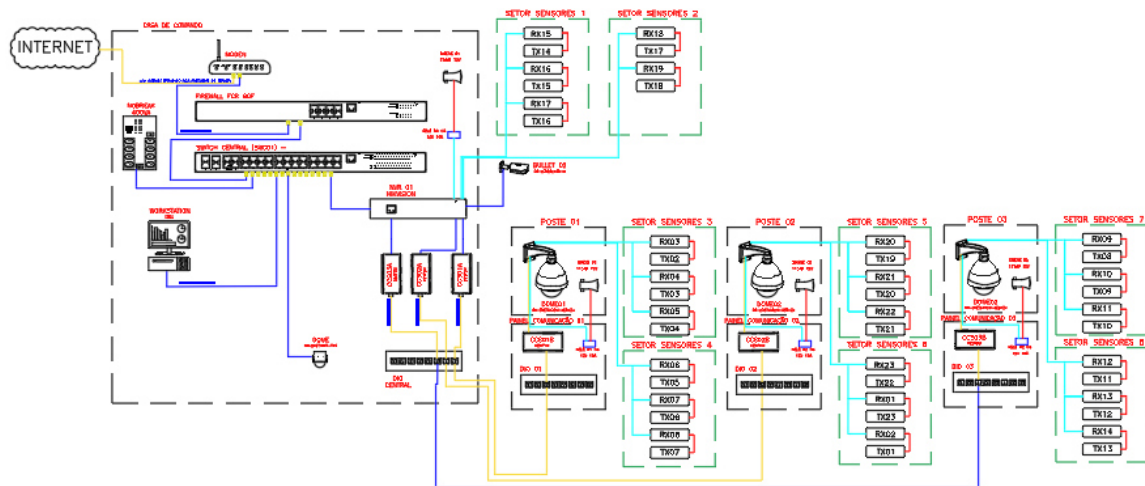
Fonte: LAGOTELA

2.3.2 Sistemas de Controle de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)

Originários do ambiente de controle de processos industriais, os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) consistem em arquiteturas de software e hardware projetadas para monitorar e controlar equipamentos e processos remotamente. Em usinas solares, são comumente utilizados para coletar dados de sensores ambientais e elétricos, verificar o status de inversores e outros equipamentos, manter históricos de dados, e gerar alarmes operacionais. Sua aplicação na segurança de perímetro envolve a integração de dispositivos de segurança, como sensores de intrusão ou câmeras à plataforma SCADA, permitindo aos operadores visualizar informações de segurança e operacionais de forma unificada em uma Interface Homem-Máquina, normalmente uma Workstation. A partir dessa interface, podem ser disparadas respostas automáticas pré-configuradas (e.g., direcionar uma câmera PTZ para a zona de alarme) ou manuais (Dias, 2024). Embora robustos e confiáveis, o custo elevado de licença, por exemplo, e a complexidade inerente limitam sua adoção como solução primária de segurança em plantas de menor porte, sendo mais viável quando a

plataforma SCADA já é utilizada para fins operacionais. Um diagrama de bloco de comunicação SCADA é mostrado na Figura 4, nele é possível ver as ligações de comunicação entre os equipamentos.

Figura 4 - Exemplo de diagrama do SCADA de uma UFV

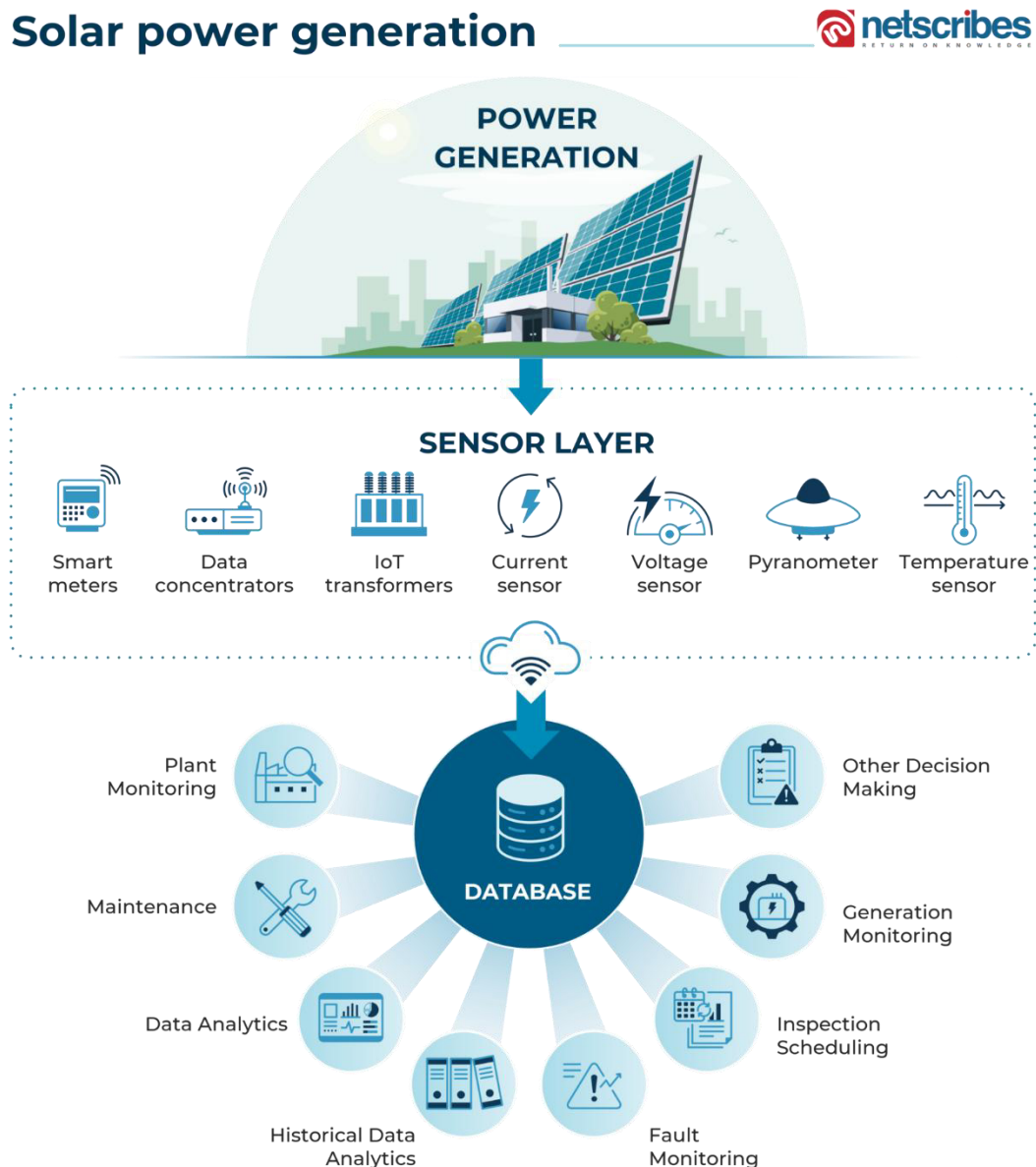


Fonte: ALVES, Lucas.

2.3.3 IoT (Internet das Coisas)

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à interconexão de objetos físicos ("coisas") equipados com sensores, software e tecnologias de comunicação, permitindo-lhes coletar e trocar dados através da internet. No âmbito da segurança de perímetro, a IoT se manifesta no uso de sensores de baixo custo (e.g., PIR para detecção de movimento, sensores magnéticos de abertura, sensores de vibração) conectados a microcontroladores com capacidade de comunicação sem fio (Wi-Fi, LoRaWAN, NB-IoT, 4G/5G). Os dados coletados são transmitidos para plataformas em nuvem, onde podem ser visualizados, analisados e utilizados para gerar notificações (via aplicativos móveis, e-mail, SMS). A principal vantagem reside no baixo custo inicial (CAPEX) e na flexibilidade, possibilitando o monitoramento pontual e segmentado (MARTINS, 2019). Os desafios incluem a segurança das comunicações (criptografia, autenticação), o gerenciamento energético dos dispositivos (vida útil de baterias, especialmente em locais sem alimentação constante) e a garantia de conectividade confiável em áreas remotas (Gupta; Quamara, 2020).

Figura 5 - Esquema de IOT de uma UFV



Fonte: Lyra M2M

2.3.4 Videomonitoramento (CFTV - Circuito Fechado de Televisão)

O CFTV continua sendo uma das ferramentas mais importantes para a segurança patrimonial. A evolução das câmeras analógicas para as câmeras IP trouxe maior resolução (HD, Full HD, 4K), flexibilidade de instalação e recursos inteligentes embarcados. Câmeras PTZ permitem cobrir grandes áreas com um único dispositivo, sendo controladas remotamente ou automaticamente em resposta a alarmes. A alimentação autônoma com pequenos painéis solares e baterias, combinada com transmissão via redes móveis (4G/5G) ou links de rádio, viabiliza a instalação em locais sem infraestrutura prévia (ANDI, 2021). O armazenamento das imagens

pode ser local, no próprio NVR, ou em nuvem. A eficácia depende da qualidade das câmeras, do posicionamento estratégico, da iluminação (ou uso de Infravermelho) e, cada vez mais, da capacidade de análise de vídeo inteligente (IA) para detectar eventos relevantes e reduzir falsos alarmes (RÜTHER, R., 2021). No estudo de caso da UFV Cristalina, o CFTV é o pilar do sistema de detecção e verificação, com câmeras IP e PTZ estrategicamente posicionadas e integradas a um NVR local com acesso remoto. Na Figura 19, a imagem do esquema de CFTV da UFV Cristalina, mostrando as áreas de alcance de visão das câmeras perimetrais em vermelho, e das câmeras PTZ em azul.

2.3.4.1 Câmeras Infravermelho (IR) para Vigilância Perimetral Noturna

Uma tecnologia crucial para a vigilância em tempo integral em perímetros de usinas é a capacidade de visão noturna, frequentemente implementada através de câmeras com iluminadores infravermelhos (IR) integrados. Essas câmeras possuem sensores de imagem sensíveis à luz IR (invisível ao olho humano) e diodos emissores de luz (LEDs) IR que iluminam a cena durante a noite ou em condições de baixa luminosidade. O sensor capta a luz IR refletida pelos objetos, formando uma imagem monocromática (preto e branco) nítida, mesmo na escuridão total.

A eficácia das câmeras IR depende de fatores como a potência e o alcance dos LEDs IR (especificados em metros, ex: 30m, 50m, 80m), o ângulo de cobertura da iluminação IR (que deve ser compatível com o ângulo de visão da lente) e a sensibilidade do sensor (medida em Lux). Tecnologias como *Smart IR* ajustam automaticamente a intensidade dos LEDs para evitar a superexposição de objetos próximos, garantindo uma iluminação mais uniforme da cena. A escolha de câmeras IR adequadas, com alcance compatível com a distância entre os postes de instalação e a área a ser monitorada, é fundamental para garantir a detecção eficaz de intrusos durante o período noturno no perímetro da usina.

2.3.5 Sensores de Barreira (Infravermelho e Micro-ondas)

Os sensores de barreira criam uma linha de detecção invisível no perímetro, operando com base na interrupção de um feixe entre um transmissor e um receptor. Os Sensores Infravermelho Ativo (IVA), por exemplo, disparam um alarme quando seus feixes de luz infravermelha são interrompidos. Apesar de serem de baixo custo, são vulneráveis a falsos alarmes provocados por condições climáticas adversas (neblina, chuva intensa), vegetação, pequenos animais e até mesmo luz solar direta (AXIS COMMUNICATIONS, 2023). Para mitigar essas ocorrências, modelos mais avançados utilizam múltiplos feixes (duplo,

quádruplo) e lógica inteligente embarcada, embora a instalação cuidadosa e o alinhamento preciso permaneçam cruciais.

Já os Sensores de Micro-ondas estabelecem um campo volumétrico de detecção entre transmissor e receptor. Apresentam maior robustez frente a condições climáticas como neblina ou chuva, contudo, são suscetíveis a acionamentos por objetos metálicos em movimento ou grandes volumes de água. A busca por maior confiabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de sensores de dupla tecnologia (ex: combinação de infravermelho e micro-ondas), que visam reduzir significativamente a FAR (HIKVISION, 2022). Adicionalmente, a integração dessas tecnologias com sistemas de segurança complementares, como câmeras PTZ gerenciadas por um software SCADA, permite que, ao ser disparado um alarme, a câmera direcione automaticamente seu foco à zona de detecção. Isso possibilita a verificação visual da intrusão ou a confirmação de um falso alarme, elevando a eficácia do sistema de segurança.

2.3.6 Sistemas de Detecção de Intrusão Perimetral (PIDS - Perimeter Intrusion Detection Systems)

Esta categoria engloba tecnologias mais sofisticadas, geralmente aplicadas em instalações de maior risco ou com perímetros extensos. Incluem:

- **Cabos Sensores de Fibra Óptica:** Detectam vibrações, pressão ou tensão no cabo instalado ao longo de uma cerca ou enterrado. Oferecem alta precisão na localização da intrusão e são imunes a Interferências Eletromagnéticas (EMI) e condições climáticas, resultando em FAR muito baixa. A figura 6 exemplifica a instalação de um sensor como este em uma cerca perimetral. O custo inicial (CAPEX) é elevado (ZILLES, R. et al, 2022).

Figura 6 - Sistema de detecção por fibra óptica instalado ao longo de uma cerca perimetral



Fonte: Silvio de Sá, Mobilitex

- Cabos Sensores Enterrados (Sísmicos/Pressão): Detectam vibrações no solo causadas por passos ou escavação. São discretos (invisíveis), mas a instalação é complexa e a calibração sensível às condições do solo e a fontes de ruído ambiental (tráfego, animais pesados), podendo gerar FAR elevada se não ajustados corretamente (VILLALVA, M. G., 2022).
- Cercas Sensorizadas: Integram sensores (microfônicos, de tensão) diretamente na estrutura da cerca para detectar tentativas de corte, escalada ou levantamento.

2.3.7 Tecnologias Avançadas: LiDAR, Radar e Drones

- LiDAR (*Light Detection and Ranging*): Utiliza pulsos de laser para criar um mapa 3D do ambiente, detectando objetos e seus movimentos com alta precisão. Permite definir zonas de intrusão virtuais complexas e classificar objetos (pessoa, veículo, animal), resultando em FAR extremamente baixa. O custo ainda é elevado para aplicações em larga escala na minigeração (DAHUA TECHNOLOGY, 2023)
- Radar: Emprega ondas de rádio para detectar movimento, distância e velocidade de alvos em grandes áreas, mesmo em condições climáticas adversas (chuva, neblina). É eficaz para rastrear múltiplos alvos simultaneamente. Assim como o LiDAR, o custo é um fator limitante para a maioria das usinas de minigeração (BOSCH SECURITY SYSTEMS, 2022).

Figura 7 - Drone sobrevoando uma UFV como parte do sistema de segurança



Fonte: Revista Segurança eletrônica

- Drones (VANTs – Veículos Aéreos Não Tripulados): São empregados em patrulhas programadas ou respostas rápidas a alarmes, oferecendo vigilância aérea por meio de câmeras visuais ou térmicas, um exemplo de sobrevoo é mostrado na Figura 7. Sistemas autônomos, como o "*drone-in-a-box*", minimizam a dependência de operadores humanos, embora apresentem elevado custo inicial. Além disso, seu uso enfrenta desafios como restrições regulatórias, limitações na autonomia de voo, sensibilidade a condições climáticas adversas e altos custos operacionais (OPEX), incluindo manutenção e seguros (ABNT, 2023).

2.3.8 Inteligência Artificial (IA) e Análise de Vídeo

A IA está revolucionando o videomonitoramento. Algoritmos de aprendizado profundo (*deep learning*) permitem que sistemas de análise de vídeo (embarcados nas câmeras ou em VMS/servidores) vão muito além da simples detecção de movimento. Eles podem:

- Classificar objetos: Distinguir entre pessoas, veículos, animais, sombras, etc.
- Detectar comportamentos específicos: Intrusão em zona proibida, remoção de objeto, aglomeração, detecção de não uso de EPIs.
- Reduzir drasticamente falsos alarmes: Ignorar eventos irrelevantes (chuva, vento, pequenos animais).

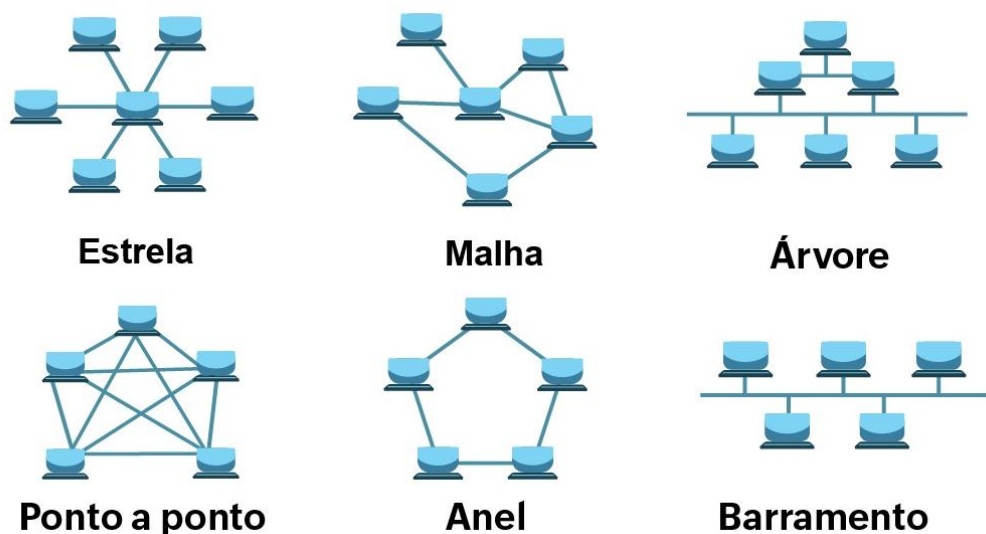
Melhorar a busca forense: Localizar eventos específicos em horas de gravação rapidamente.

O investimento em IA robusta é cada vez mais justificado pela economia gerada na operação do sistema de segurança (menor OPEX). A aplicação da IA na UFV Cristalina, por exemplo, permite que as câmeras detectem e classifiquem aproximações de animais e pessoas, otimizando a resposta e minimizando a necessidade de intervenção humana constante.

2.3.9 Topologias de Comunicação para Sistemas de Segurança

A infraestrutura de comunicação constitui um elemento fundamental em sistemas de segurança perimetral para usinas fotovoltaicas, influenciando diretamente a confiabilidade, escalabilidade e custo total da solução. A escolha da topologia de rede adequada deve considerar as características específicas de cada instalação, como extensão da área, requisitos de redundância e orçamento disponível. As principais topologias de rede relevantes para este contexto são esquematizadas na Figura 8.

Figura 8 - Topologias de comunicação existentes no mercado



Fonte: ManageEngine Blog, adaptado pelo autor

2.3.9.1 Topologia em Estrela

Na topologia em estrela, todos os dispositivos periféricos (câmeras, sensores) conectam-se diretamente a um ponto central, como um Switch ou um NVR. Esta configuração é adequada para usinas de pequeno porte ou setores específicos dentro de instalações maiores.

Em termos de vantagens, esta topologia de rede destaca-se pela simplicidade de implementação e pela facilidade na identificação de problemas, visto que a falha em um único dispositivo não compromete a operação dos demais nós da rede. No entanto, suas limitações são notáveis, incluindo uma alta dependência do nó central, que representa um ponto único de falha crítico, e um maior consumo de cabeamento em instalações de grande extensão. Adicionalmente, observa-se restrições de distância quando se emprega cabeamento metálico.

2.3.9.2 Topologia em Malha

Na topologia em malha, cada dispositivo é conectado a todos os outros dispositivos na rede, ou a um subconjunto significativo deles. Isso cria múltiplos caminhos para os dados, oferecendo alta redundância e tolerância a falhas. Se um caminho falhar, os dados podem ser roteados por outro. No entanto, é a topologia mais complexa e cara de implementar devido à grande quantidade de cabeamento e portas de rede necessárias. É mais comum em redes sem fio ou em redes críticas onde a disponibilidade é primordial.

2.3.9.3 Topologia em *Árvore*

A topologia em árvore é uma combinação das topologias em estrela e barramento. Possui um cabo principal (barramento) do qual se ramificam múltiplos segmentos em estrela. É uma topologia hierárquica que permite a expansão da rede e a segmentação do tráfego. A falha de um segmento em estrela afeta apenas os dispositivos conectados a ele, mas a falha do cabo principal afeta toda a rede.

2.3.9.4 Topologia *Ponto a Ponto*

A topologia ponto a ponto conecta diretamente dois dispositivos. É a forma mais simples de topologia e é usada para links dedicados entre dois pontos, como a conexão de uma câmera IP diretamente a um NVR ou a um Switch, ou um link de rádio entre duas torres. Oferece alta largura de banda e segurança para a conexão específica, mas não é escalável para múltiplos dispositivos sem a adição de outros elementos de rede.

2.3.9.5 Topologia em *Anel*

Na topologia em anel, cada dispositivo conecta-se a dois outros, formando um circuito fechado. Esta configuração é particularmente relevante para usinas de médio e grande porte, especialmente quando implementada com fibra óptica.

Esta configuração de rede apresenta como vantagens intrínsecas a redundância inerente, que oferece múltiplos caminhos para o tráfego de dados, e uma maior resiliência a falhas, elevando a robustez do sistema. Além disso, demonstra eficiência na utilização de cabeamento para abranger grandes perímetros geográficos. Contudo, suas limitações residem na complexidade de implementação e na exigência de switches gerenciáveis que suportem protocolos de redundância, como o RSTP (*Rapid Spanning Tree Protocol*), para garantir a estabilidade operacional.

2.3.9.6 Topologia em *Barramento*

Na topologia em barramento, todos os dispositivos são conectados a um único cabo principal, que atua como um *backbone*. É uma topologia simples e econômica para redes pequenas, mas a falha no cabo principal pode derrubar toda a rede. Além disso, a detecção de falhas é mais difícil e a performance degrada com o aumento do número de dispositivos.

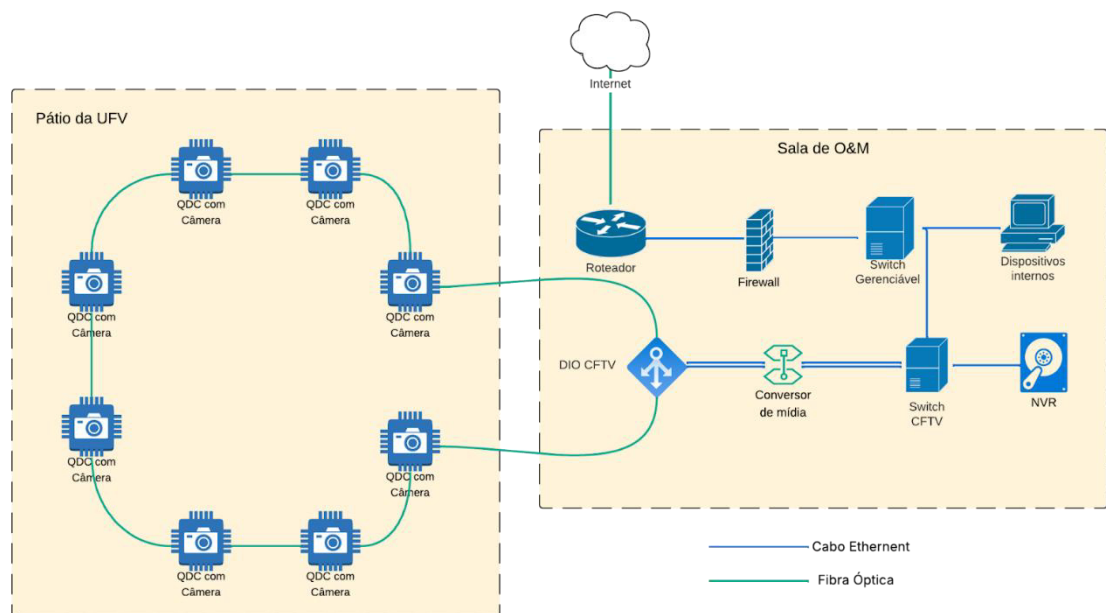
2.3.9.7 Topologia *Híbrida*

Já no âmbito prático dos sistemas de segurança em usinas fotovoltaicas, a adoção de topologias híbridas é predominante, integrando características de diversas abordagens de rede.

Um arranjo típico envolve a utilização de uma conexão principal em forma de anel de fibra óptica que circunda o perímetro da usina. A partir de pontos estratégicos ao longo desse anel, topologias em estrela locais são implementadas, utilizando switches e conversores de mídia para a conexão dos dispositivos.

Essa metodologia oferece flexibilidade para se adequar a variados requisitos de segurança, ao mesmo tempo em que otimiza custos e desempenho. Sua adaptabilidade a restrições físicas do local a torna a escolha mais frequente em projetos de médio e grande porte, permitindo um equilíbrio eficaz entre as exigências técnicas, orçamentárias e operacionais.

Figura 9 - Esquema de Topologia de comunicação do CFTV da UFV Cristalina



Fonte: autor

2.3.10 Meios Físicos de Comunicação

Escolher o meio físico de comunicação é tão crucial quanto a topologia de rede empregada em um sistema.

A fibra óptica (F.O.) destaca-se como um dos meios mais utilizados devido à sua imunidade a interferências eletromagnéticas, particularmente relevante em ambientes como usinas fotovoltaicas, onde inversores geram ruídos significativos. Adicionalmente, oferece suporte a longas distâncias (atingindo vários quilômetros) e alta largura de banda, sendo, portanto, a opção preferencial para o *backbone* principal em usinas de médio e grande porte, especialmente em topologias em anel. Em contraste, o cabeamento metálico, que inclui cabos de par trançado (UTP/FTP), apresenta limitações de distância (tipicamente até 100m para

Ethernet) e suscetibilidade a interferências, tornando-o mais adequado para conexões internas e locais em topologias em estrela. Por fim, a comunicação sem fio, englobando tecnologias como Wi-Fi, redes celulares (4G/5G) e LPWAN, é empregada em áreas onde a instalação de cabeamento é inviável ou como uma camada de redundância.

Em síntese, para instalações fechadas e equipamentos próximos, o cabo metálico (preferencialmente com blindagem para atenuação de EMI) é comumente utilizado. Contudo, para a comunicação com equipamentos externos e distantes, a fibra óptica é a escolha predominante para o transporte de dados a longas distâncias, requerendo a utilização de conversores de meios físicos nas respectivas instalações.

2.3.11 Considerações para Seleção

A escolha da topologia mais adequada deve considerar:

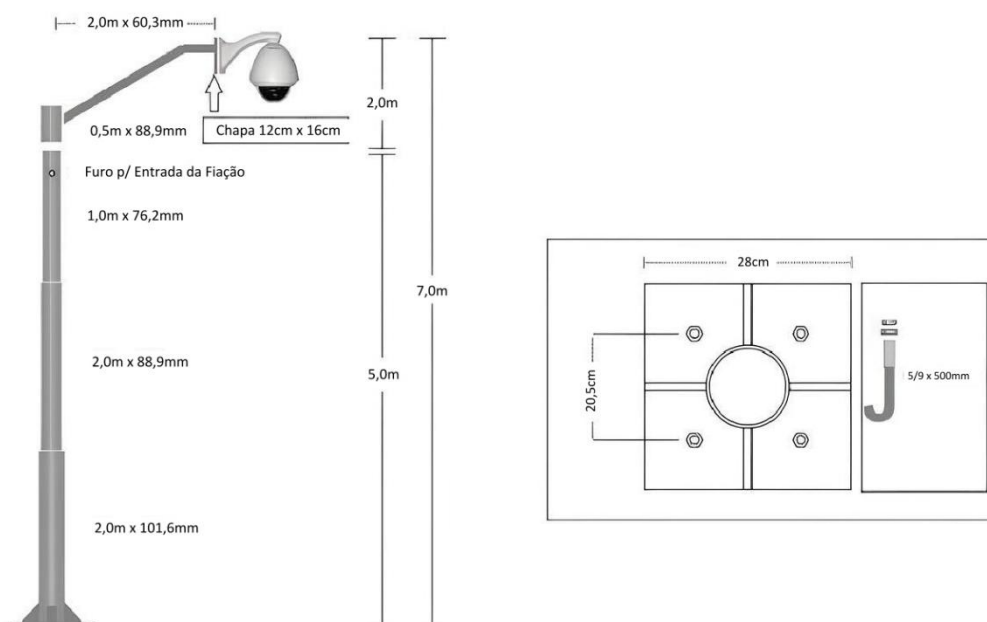
- Criticidade da segurança: Quanto mais crítica, maior a necessidade de redundância.
- Extensão da área: Usinas maiores geralmente beneficiam-se de topologias em anel ou híbridas.
- Requisitos de largura de banda: Determinados principalmente pela quantidade e resolução das câmeras.
- Planos de expansão futura: Capacidade de acomodar crescimento sem redesenho completo.

A implementação de VLANs para segmentação lógica da rede e QoS para priorização do tráfego crítico são práticas recomendadas que complementam a topologia física escolhida, garantindo maior segurança e desempenho do sistema como um todo.

2.3.12 Infraestrutura de Suporte: Postes, Quadros De Comando, Comunicação e Alimentação

A implementação eficaz de um sistema de segurança perimetral, especialmente baseado em CFTV, depende criticamente de uma infraestrutura de suporte bem projetada. Em usinas de mineração, é comum a utilização de postes metálicos estrategicamente posicionados ao longo do perímetro para a instalação das câmeras e outros sensores. Esses postes, geralmente chumbados ou engastados em bases de concreto para garantir estabilidade, precisam ter altura adequada para fornecer o campo de visão desejado e minimizar o risco de vandalismo. A Figura 10 exemplifica um poste comercial ao lado de sua base.

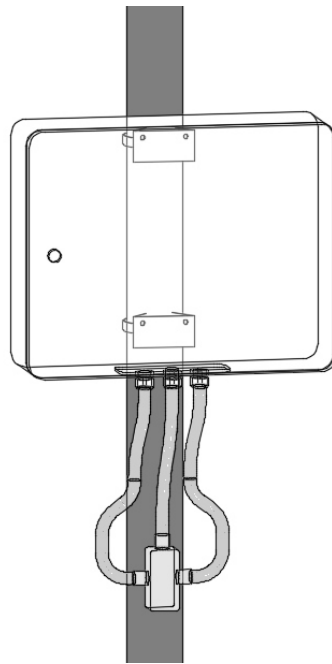
Figura 10 - À esquerda, exemplo de poste comercial para CFTV, à direita, base de um poste de CFTV com seu chumbador



Fonte: FIXFER, 2025. adaptado pelo autor.

Associado a cada poste (ou a grupos de postes), frequentemente se instala um Quadro de Comando como mostra a Figura 11. Este quadro serve para abrigar e proteger a engrenagem eletrônica essencial para o funcionamento e a interação dos equipamentos de segurança colocados nela. No interior, um QDC usual para uma câmera IP de limite pode ter muitas misturas de equipamentos diferentes que tentam criar essa imagem como um link entre a câmera montada no poste e o principal sistema de informações da planta solar. As principais partes de um QDC são divididas em três grupos principais, mostrando seus principais papéis no quadro.

Figura 11 - Desenho técnico de um DQC instalado em poste



Fonte: autor

2.3.12.1 Conectividade e distribuição de sinal

Esta coleção inclui as ferramentas básicas necessárias para conectar e manter contato com câmeras IP e a estação de monitoramento central. Seu objetivo é garantir a captura, o arranjo e a transformação dos sinais de dados em uma rede unificada e operacional. As principais peças são a caixa terminadora de fibra óptica (CTO) ou o Distribuidor Interno Óptico (DIO), servindo como pontos finais da rede, recebendo os cabos de fibra óptica. O conversor de fibra óptica para Ethernet transforma o sinal de luz de longa distância em um sinal elétrico Ethernet regular, permitindo a ligação direta às câmeras IP.

2.3.12.2 Fonte de energia

A equipe responsável pela eletricidade inclui todas as peças que garantem a provisão e a disseminação eficiente da energia para o funcionamento contínuo dos gadgets no QDC. A fonte de energia e o transmissor de energia Ethernet mostram esse papel, permitindo que dados e eletricidade sejam enviados ao mesmo tempo para gravadores e conversores de vídeo. A segurança em circuitos elétricos é mantida por interruptores de fusíveis, que impedem os danos da corrente excessiva. Também estão destacados os conectores de energia ou terminais, que aumentam uma configuração limpa e segura no sistema elétrico.

2.3.12.3 Proteção de equipamentos:

Este grupo é crucial para proteger os equipamentos eletrônicos delicados de incidentes elétricos nocivos, como surtos de energia e ataques de raios. Os DPSs são as principais partes desta categoria, feitas para manusear e espalhar picos de tensão repentina de eventos climáticos ou flutuações de energia. É comum empregar DPS direcionados a alimentos (CC ou CA) e transferência de dados (POE), garantindo uma defesa forte e abrangente para equipamentos QDC.

A comunicação de dados entre os postes/QDCs e a sala de controle central (onde ficam o rack CFTV e, possivelmente, o rack SCADA) em perímetros extensos é predominantemente realizada via cabos de fibra óptica. A fibra óptica oferece vantagens cruciais sobre o cabo de cobre para longas distâncias: imunidade a interferências eletromagnéticas, maior largura de banda, menor atenuação do sinal e maior segurança. Uma topologia comum em usinas é a conexão em série formando anéis ou circuitos de informação. Nesse arranjo, o cabo de fibra óptica sai da sala de controle, passa sequencialmente por cada QDC ao longo de um trecho do perímetro, e retorna à sala de controle, formando um circuito fechado (ou semi-anel). Um segundo circuito pode cobrir a outra metade do perímetro. Essa topologia em anel, quando implementada com protocolos de rede adequados (como RSTP - *Rapid Spanning Tree Protocol* em switches gerenciáveis), pode oferecer redundância: em caso de rompimento da fibra em um ponto, a comunicação pode ser mantida pelo caminho alternativo do anel.

Paralelamente aos circuitos de fibra óptica, seguem os circuitos de alimentação elétrica (sistemas auxiliares) que fornecem energia aos QDCs e, conseqüentemente, às câmeras e demais equipamentos. Esses circuitos devem ser dimensionados corretamente, considerando a queda de tensão ao longo das distâncias, e protegidos adequadamente na origem (quadro geral de baixa tensão - QGBT) e nos pontos de consumo (QDCs).

2.3.13 Sistemas de Alerta e Dissuasão (Sirenes)

Além das barreiras físicas e dos sistemas de detecção, a capacidade de resposta imediata é crucial para a eficácia da segurança perimetral. As sirenes, embora simples em sua concepção, desempenham um papel vital na dissuasão de intrusos e no alerta de equipes de segurança. Integradas ao sistema de CFTV ou PIDS, podem ser acionadas automaticamente em caso de detecção de intrusão, emitindo um som de alta intensidade que visa afugentar o invasor e chamar a atenção para o evento. Sua principal vantagem reside no baixo custo e na capacidade de proporcionar resposta imediata no local do evento. No entanto, sua eficácia é maximizada

quando combinadas com sistemas de verificação visual para evitar alarmes desnecessários. No estudo de caso da UFV Cristalina, a integração de sirenes nos postes de CFTV é um componente estratégico para o alerta e a dissuasão de invasores, complementando as capacidades de detecção e monitoramento, a figura 12 mostra a sirene usada no projeto da UFV do estudo de caso.

Figura 12 - Sirene SIR 3000, escolhida para o projeto da UFV Cristalina



Fonte: Intelbras

2.4 Padrões e Regulamentos Técnicos Aplicáveis

A implementação e operação de sistemas de segurança em plantas fotovoltaicas devem observar um conjunto de normas técnicas e regulamentos:

- **ABNT NBR 16690:** Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos – Requisitos de projeto.
- **ABNT NBR IEC 62446-1:** Sistemas fotovoltaicos (FV) – Requisitos para ensaios, documentação e manutenção – Parte 1: Documentação, ensaios de comissionamento e inspeção.
- **Normas de Segurança Eletrônica:** Conjunto de normas ABNT NB R IEC aplicáveis a sistemas de alarme (e.g., série 60839), cabeamento estruturado, entre outras.
- **NR-10:** Norma Regulamentadora de Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade.
- **Regulamentação da ANATEL:** Normas para homologação e uso de equipamentos que utilizam espectro radioelétrico (rádio, 4G/5G, Wi-Fi, etc.).

- **Regulamentação de Drones (ANAC/DECEA/ANATEL):** Conjunto de regras para operação de VANTs.
- **Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD - Lei nº 13.709/2018):** Incide sobre o tratamento de dados pessoais, incluindo imagens capturadas por sistemas de videomonitoramento.

A compreensão e a correta aplicação dessas normativas são cruciais para garantir a segurança das instalações, a conformidade legal e a qualidade dos sistemas implementados.

3 METODOLOGIA

3.1 Abordagem Metodológica

Para alcançar os objetivos propostos e responder à questão de pesquisa, este trabalho adotou uma abordagem metodológica de natureza mista, predominantemente qualitativa, mas incorporando elementos quantitativos na análise comparativa de custos. A complexidade da questão central, – avaliar e comparar criticamente opções tecnológicas em um cenário específico, – demanda uma investigação aprofundada das características, vantagens e desvantagens de cada tecnologia, o que caracteriza a pesquisa qualitativa (Marconi; Lakatos, 2017). A inclusão de dados de custo e a análise do Custo Total de Propriedade (TCO) conferem a dimensão quantitativa, essencial para a avaliação da relação custo-benefício.

A estratégia principal de coleta de dados envolveu pesquisa bibliográfica e documental, complementada por uma análise de mercado para o levantamento de informações sobre preços praticados no Brasil. Conforme Gil (2008), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, como livros e artigos científicos, sendo fundamental para construir o embasamento teórico sobre as tecnologias e os conceitos abordados.

3.2 Fontes de Dados Utilizadas

As fontes de informação consultadas foram categorizadas da seguinte forma:

- **Fontes Bibliográficas:** Livros-texto e manuais técnicos sobre energia solar fotovoltaica, sistemas eletrônicos de segurança, redes de comunicação e inteligência artificial; artigos científicos indexados em bases de dados relevantes (Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, Google Scholar) e publicados em periódicos revisados por pares e anais de congressos nacionais e internacionais; dissertações e teses acadêmicas relacionadas ao tema.
- **Fontes Documentais:** Normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da *International Electrotechnical Commission* (IEC); resoluções normativas e documentos técnicos da ANEEL; legislação brasileira pertinente (e.g., Lei nº 14.300/2022, LGPD); manuais técnicos e folhas de dados (*datasheets*) de equipamentos de segurança (câmeras, sensores, NVRs, etc.) de fabricantes com atuação no mercado brasileiro; relatórios e publicações de associações setoriais, como a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) e a Associação Brasileira das Empresas de Sistemas Eletrônicos de Segurança (ABESE).

- **Fontes de Mercado (Custos):** Pesquisa de preços em distribuidores e varejistas de equipamentos de segurança eletrônica no Brasil (plataformas online como Mercado Livre, Amazon Brasil, lojas especializadas); consulta a artigos, estudos de caso e publicações de empresas instaladoras e integradoras de sistemas de segurança.

É importante ressaltar que os valores de custo obtidos de fontes de mercado possuem caráter referencial e estão sujeitos a variações significativas, influenciadas por fatores como marca, especificações técnicas detalhadas, volume de compra, taxas de câmbio e condições comerciais específicas. Não obstante, essas informações foram essenciais para prover uma base quantitativa à análise comparativa de custo-benefício.

3.3 Procedimentos de Análise

A análise dos dados coletados foi conduzida mediante as seguintes etapas:

3.3.1 Análise de Conteúdo

Leitura crítica e sistemática do material bibliográfico e documental, seguida de fichamento, para extrair informações pertinentes sobre princípios de funcionamento, características técnicas, vantagens, desvantagens e aplicações de cada tecnologia de monitoramento, bem como sobre os riscos e desafios inerentes à segurança da minigeração (Bardin, 2011).

3.3.2 Síntese e Sistematização

Organização lógica e estruturada das informações coletadas, agrupando-as por tecnologia e por critérios de análise predefinidos (e.g., capacidade de detecção, alcance, resiliência a falsos alarmes, capacidade de integração, custos).

3.3.3 Análise Comparativa Qualitativa

Confronto sistemático das características das diferentes tecnologias, identificando os pontos fortes e fracos de cada uma em relação aos requisitos de segurança específicos das plantas de minigeração.

3.3.4 Análise Comparativa Quantitativa (Custos)

Levantamento, tabulação e comparação de dados de CAPEX (Custo de Aquisição) e OPEX (Custo Operacional) obtidos das fontes de mercado, contextualizando-os para a realidade brasileira e utilizando-os como subsídio para a discussão sobre TCO e ROI.

3.3.5 Elaboração de Diretrizes e Recomendações

Com base nas análises qualitativa e quantitativa, definição de cenários-tipo para plantas de minigeração (considerando porte, nível de risco, orçamento) e proposição de configurações de segurança recomendadas para cada cenário, culminando na formulação de um conjunto de recomendações práticas.

A integração das abordagens qualitativa e quantitativa permitiu uma avaliação mais completa e robusta das tecnologias, visando responder de forma abrangente à questão de pesquisa e atingir os objetivos propostos neste trabalho.

4 ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO DE PERÍMETRO E AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A seleção de um sistema de segurança de perímetro eficaz para plantas de minigeração fotovoltaica transcende a mera listagem de tecnologias disponíveis, exigindo uma análise comparativa criteriosa que pondere eficácia, custos e aplicabilidade ao contexto específico. Conforme detalhado no Capítulo 2, o espectro de soluções é vasto, abrangendo desde métodos consolidados até tecnologias emergentes. Este capítulo aprofunda essa comparação, incorporando estimativas de custos baseadas no mercado brasileiro e focando nos aspectos cruciais para a tomada de decisão no âmbito da minigeração. A análise será constantemente referenciada ao sistema implementado na UFV Cristalina, que representa uma solução viável e eficaz para plantas de até 5MW.

4.1 AVALIAÇÃO COMPARATIVA, TÉCNICO-OPERACIONAL E ECONÔMICA

A análise comparativa deve abranger múltiplos vetores técnicos e operacionais, incluindo: capacidade e precisão de detecção, resiliência a alarmes falsos e alarmes incômodos, operabilidade sob diferentes condições climáticas e de iluminação, alcance, complexidade de instalação e manutenção, capacidade de integração com outros sistemas e, fundamentalmente, os custos associados tanto o CAPEX quanto os custos operacionais OPEX.

A viabilidade econômica é um fator determinante, uma vez que a análise técnica das soluções de segurança é insuficiente. A avaliação deve transcender o custo inicial de aquisição, abrangendo o TCO ao longo do ciclo de vida útil estimado para o sistema (usualmente entre 10 a 15 anos). O TCO engloba:

- CAPEX: Custo de aquisição de hardware (câmeras, sensores, gravadores, servidores, etc.), software (licenças de VMS e SCADA, módulos de IA), infraestrutura física (postes, cabeamento, energia) e serviços de instalação, configuração e comissionamento.
- OPEX: Custos operacionais recorrentes, incluindo consumo de energia elétrica, manutenção (preventiva e corretiva), substituição periódica de componentes com vida útil limitada (baterias, discos rígidos), custos de comunicação (link de internet, planos de dados móveis), renovação de licenças de software (anuais ou mensais), custos com serviços de monitoramento humano (se aplicável) e treinamento de pessoal.

Quantificar o Retorno sobre o Investimento em segurança é inerentemente complexo, pois envolve a mensuração de eventos evitados (furtos, vandalismo) e seus custos associados (reposição, perda de receita, aumento de seguros). No entanto, uma análise de TCO robusta permite comparar o custo real de diferentes soluções ao longo do tempo, evitando decisões baseadas apenas no preço inicial que podem se revelar mais onerosas a longo prazo devido a altos custos operacionais ou baixa eficácia.

É crucial notar que a tecnologia com o menor CAPEX nem sempre resulta no menor TCO. Sistemas com elevada taxa de alarmes falsos (como barreiras IVA simples sem verificação) podem gerar um OPEX proibitivo devido à necessidade de investigação constante de eventos irrelevantes, consumindo tempo de operadores ou gerando custos com deslocamento de equipes de resposta. O investimento em IA, embora aumente o CAPEX, possui o potencial de reduzir significativamente o OPEX relacionado ao monitoramento e tratamento de alarmes, otimizando a alocação de recursos humanos e financeiros.

Para facilitar a visualização e comparação, apresenta-se a Tabela 1 com as principais características das tecnologias discutidas, focando em sua aplicabilidade para minigeração e utilizando faixas de custo referenciais para o mercado brasileiro.

Tabela 1 - Tabela comparativo de tecnologias de segurança de perímetro para minigeração

| Tecnologia | Princípio de Detecção | Faixa de Custo CAPEX (Referencial BR) | Vantagem Principal (Contexto Minigeração) | Desvantagem Principal (Contexto Minigeração) | Adequação Geral (Minigeração) |
|------------------------------------|------------------------------|--|---|---|--|
| Barreiras Físicas (Cercas) | Dissuasão / Contenção | Baixo (R\$ 70 - R\$ 150 / metro linear) | Primeira linha de defesa, baixo custo inicial, base para outras tecnologias | Não detecta intrusão por si só, pode ser transposta | Essencial (base para outras tecnologias) |
| Barreiras IVA | Interrupção de feixe IR | Baixo (R\$ 100 - R\$ 500 / par) | Custo inicial muito baixo | Alta taxa de FAR em ambiente externo | Baixa (isolada); Média (integrada com CFTV/IA) |
| Detectores Micro-ondas | Interrupção de micro-ondas | Médio (R\$ 500 - R\$ 1.500 / par) | Maior resiliência climática que IVA | Sensível a grandes objetos metálicos/água; Custo | Média a Alta (integrada) |
| PIDS - Microfônico/Eletrom. | Vibração/Corte na cerca | Médio: (R\$ 50 - R\$ 150 / metro) | Detecção direta na barreira | Requer cerca em bom estado; | Média a Alta |

| Tecnologia | Princípio de Detecção | Faixa de Custo CAPEX (Referencial BR) | Vantagem Principal (Contexto Minigeração) | Desvantagem Principal (Contexto Minigeração) | Adequação Geral (Minigeração) |
|-------------------------------------|-------------------------------|--|--|---|---------------------------------------|
| | | | física; Custo moderado | sensível a vento/ruído | |
| PIDS - Fibra Óptica | Vibração/Tensão na fibra | Alto (> R\$ 300 / metro) | Alta precisão de localização; imune a EMI | Custo elevado; Instalação especializada | Alta (alto risco/orçamento) |
| Sensores Enterrados/Sísmicos | Vibração no solo | Muito Alto | Detecção discreta; Baixo FAR | Custo e complexidade de instalação muito elevados | Baixa (exceto cenários específicos) |
| CFTV IP (Visível) | Análise de imagem visual | Médio (R\$ 400 - R\$ 2.000 / câmera) | Verificação visual; Registro de eventos | Dependente de iluminação; FAR sem IA | Essencial (integrada com IA) |
| CFTV IP (Térmica) | Detecção de calor (IR) | Alto (> R\$ 5.000 / câmera) | Detecção 24/7 independente de luz; Baixo FAR | Custo elevado; Menor detalhe para identificação | Alta (alto risco/orçamento) |
| RADAR | Detecção por ondas de rádio | Muito Alto | Grande alcance; Resiliência climática | Custo elevado; Baixa capacidade de classificação | Média (perímetros extensos) |
| Drones (VANTs) | Vigilância aérea (visual/IR) | Alto (> R\$ 15.000 / unidade) | Flexibilidade; Verificação rápida de alarmes | Custo; Autonomia; Regulamentação; Operação | Média (complementar) |
| IoT (Sensores Diversos) | Vários (PIR, magnético, etc.) | Baixo (R\$ 50 - R\$ 200 / sensor) | Baixo custo inicial; Flexibilidade pontual | Conectividade; Gestão de energia; Segurança | Baixa (isolada); Média (complementar) |
| SCADA (Integrado) | Integração de sistemas | Depende da plataforma existente | Visão unificada (Operação + Segurança) | Custo e complexidade de integração | Média (se SCADA já existir) |
| Sirenes | Alerta Sono/Dissuasão | Baixo (R\$ 90 - R\$ 300/unidade) | Baixo custo; alerta imediato no local; Dissuasão | Não detecta intrusão; pode gerar incômodo se acionada indevidamente | Complementar (resposta) |

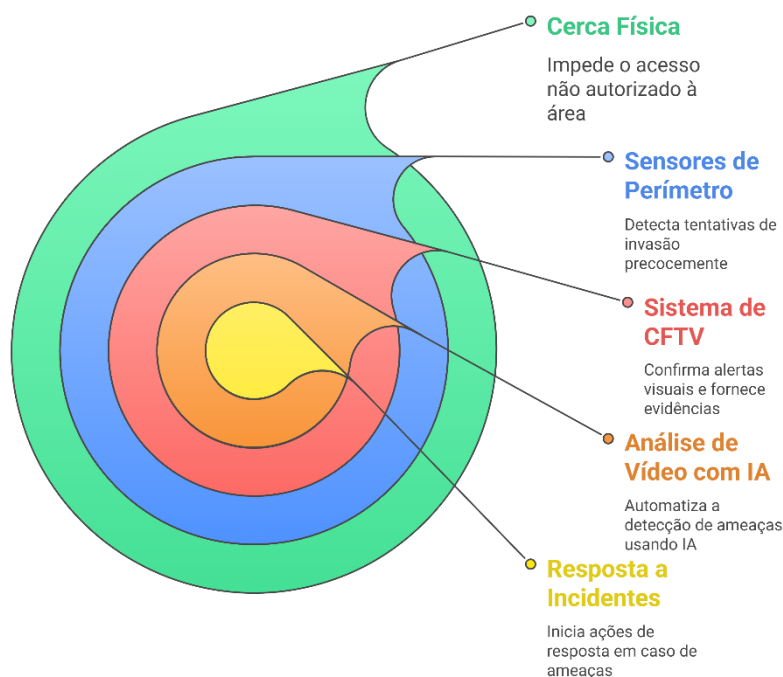
Nota: Os custos são apenas referenciais e podem variar significativamente. A adequação depende da análise de risco e do projeto específico.

4.2 A Abordagem em Camadas e a Integração de Sistemas

Nenhuma tecnologia isolada constitui uma solução completa e infalível. A segurança de perímetro eficaz em plantas de minigeração tipicamente demanda uma abordagem em camadas. Essa estratégia consiste em combinar diferentes tecnologias de forma complementar, visando maximizar a probabilidade de detecção de intrusões reais, ao mesmo tempo em que se minimiza a taxa de alarmes falsos.

Uma configuração comum e potencialmente custo-efetiva para diversas plantas de minigeração pode envolver as camadas apresentadas no diagrama de anéis concêntricos da Figura 13:

Figura 13 - Diagrama de camadas da integração de sistemas.



Fonte: autor

1. **Camada Física:** Uma cerca de perímetro robusta e adequada às normas constitui a primeira barreira física dissuasora.
2. **Camada de Detecção Primária:** Sensores de cerca (PIDS) ou barreiras lineares (IVA/Micro-ondas), selecionados conforme o orçamento, o tipo de cerca e a tolerância a alarmes falsos.

3. **Camada de Verificação/Avaliação:** Um sistema CFTV com câmeras estrategicamente posicionadas (fixas e/ou PTZ) para cobrir o perímetro e áreas internas críticas (inversores, subestação, almoxarifado).
4. **Camada de Inteligência:** Software de análise de vídeo com IA para filtrar alarmes da camada de detecção, classificar ameaças (humano vs. animal vs. veículo), e automatizar tarefas de monitoramento.
5. **Camada de Resposta:** Procedimentos operacionais claros para tratamento de alarmes, comunicação eficaz com uma central de monitoramento externa (se contratada) e definição de protocolos de resposta local (acionamento de equipe de segurança, autoridades policiais, acionamento de sirenes).

A integração funcional entre essas camadas é um fator multiplicador de eficácia. Por exemplo, um alarme gerado por um sensor PIDS pode automaticamente comandar uma câmera PTZ para apontar para a zona de detecção, iniciar a gravação em alta resolução e acionar a análise de IA sobre as imagens capturadas para confirmar ou descartar a ameaça em segundos. Plataformas *Video Management System* (VMS) modernas frequentemente oferecem módulos para integrar diferentes tipos de sensores e gerenciar os eventos de forma centralizada.

4.3 Adequação da Tecnologia aos Cenários de Minigeração

A seleção da combinação tecnológica ótima é contingente a fatores específicos de cada projeto:

- **Extensão do Perímetro:** Perímetros mais longos favorecem economicamente tecnologias lineares (barreiras, PIDS) em detrimento de uma cobertura completa apenas com câmeras ou radar.
- **Nível de Risco e Valor dos Ativos:** Plantas de maior porte ou localizadas em áreas com histórico de criminalidade justificam investimentos mais elevados em tecnologias sofisticadas (câmeras térmicas, IA avançada, PIDS de maior precisão).
- **Orçamento Disponível (CAPEX e OPEX):** Restrições orçamentárias podem impor a adoção de soluções mais simples inicialmente, prevendo-se upgrades futuros.
- **Condições Ambientais e Geográficas:** Fatores como clima (chuva, neblina, vento), tipo e densidade da vegetação, e topografia do terreno influenciam diretamente a performance e a escolha dos sensores.
- **Infraestrutura Existente:** A disponibilidade de energia elétrica e rede de dados ao longo do perímetro impacta os custos de instalação.

- Requisitos de Monitoramento Remoto: A necessidade de acesso e controle do sistema à distância define requisitos de conectividade.

Com base nos fatores analisados, é possível delinear cenários-tipo como os apresentados na Tabela 2. Contudo, é importante notar que diversas tecnologias pesquisadas no escopo deste trabalho não foram incluídas na referida tabela. Isso se deve ao fato de que, embora este estudo explore uma gama de soluções disponíveis no mercado, ele foca principalmente em sugerir aplicações para usinas de minigeração.

Essa limitação de porte naturalmente impõe restrições orçamentárias e influencia a percepção do valor total dos ativos a serem protegidos. As recomendações aqui propostas visam, acima de tudo, garantir a viabilidade do empreendimento, evitando que o CAPEX se torne excessivo. Conclui-se, portanto, que tecnologias avançadas, como LIDAR e VANTs, são mais adequadas e economicamente coerentes para usinas de maior porte. Por outro lado, algumas soluções como PID, Sensores Sísmicos, e Barreiras IVA podem se tornar redundantes ou menos eficientes quando empregadas em conjunto com tecnologias mais robustas e consolidadas no mercado, como o CFTV.

Como já mencionado, este trabalho se propõe a ser uma fonte de pesquisa para o projetista. Entretanto, cabe a este profissional, com base em seu conhecimento dos recursos disponíveis e das especificidades do empreendimento, propor a solução técnica mais apropriada para cada caso.

Tabela 2 - Tabela de soluções recomendadas para diferentes cenários de porte de usinas

| Cenário | Porte da Planta | Risco Percebido | Orçamento | Solução Recomendada |
|-----------|--------------------------------|-----------------|---------------|--|
| Cenário 1 | Pequeno Porte (< 500 kW) | Baixo | Limitado | <ul style="list-style-type: none"> • CFTV IP com boa cobertura do perímetro e áreas críticas • NVR local • Análise de vídeo básica (detecção de movimento aprimorada, cruzamento de linha virtual) • Acesso remoto via 4G ou internet banda larga |
| Cenário 2 | Médio Porte (500 kW - 2 MW) | Moderado | Intermediário | <ul style="list-style-type: none"> • Cerca de perímetro + PIDS (microfônico ou eletromecânico) ou barreiras de micro-ondas • CFTV com câmeras perimetrais IR • Câmeras PTZ para verificação de alarmes e cobertura total do pátio da UFV • NVR com maior capacidade ou VMS básico com armazenamento em nuvem |
| Cenário 3 | Grande Porte (2 MW - 5 MW) | Alto | Elevado | <ul style="list-style-type: none"> • Cerca de perímetro + PIDS de alta precisão (fibra óptica) • CFTV com câmeras visuais e térmicas com IA embarcada • Drones para patrulhamento e verificação de alarmes • Integração com VMS avançado e integração com SCADA • Central de monitoramento profissional em tempo integral |

5 ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE SEGURANÇA CFTV EM USINA DE MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

5.1 Contexto e Objetivos do Estudo de Caso

A UFV Cristalina, localizada no Ceará, possui uma potência instalada de 6.200 kWp, e 5 MW. Ocupa uma área de 13.29 ha com um perímetro de cerca de 1.491 km. O terreno situa-se a uma altitude média de 748 metros acima do nível do mar, apresentando uma topografia plana levemente ondulada, com 5% de declividade, o que favorece a ocupação e não influencia significativamente na distribuição das chuvas ou nas variações climáticas. Apresenta solo do tipo latossolo vermelho escuro com texturas argilosa e areno-argilosa, com uma vegetação de cerrado e matas residuais.

A decisão pela implementação de um sistema de segurança robusto foi motivada pelos desafios inerentes à sua localização remota e pela necessidade de proteger um investimento significativo em módulos fotovoltaicos, inversores, transformadores e cabos de cobre. Nesse contexto, a construção de uma cerca perimetral robusta foi a primeira e fundamental camada de defesa patrimonial adotada, servindo como medida dissuasória inicial e barreira física contra acessos não autorizados, sobre a qual todo o sistema de segurança eletrônica foi edificado.

O projeto de segurança para a UFV Cristalina foi concebido com os seguintes objetivos, alinhados aos objetivos gerais de segurança perimetral discutidos no Capítulo 1:

- **Dissuasão:** Criar uma presença visível de segurança para desencorajar potenciais intrusos e atos de vandalismo, utilizando a cerca perimetral como primeira barreira física e as sirenes como elemento de alerta sonoro imediato.
- **Deteção Perimetral:** Identificar acessos não autorizados ao perímetro da usina de forma precoce e confiável, 24 horas por dia, 7 dias por semana, com o auxílio das câmeras CFTV e sua capacidade de análise inteligente.
- **Monitoramento e Verificação:** Garantir a capacidade de vigilância eficaz, inclusive noturna, e permitir a verificação remota de alarmes para otimizar a resposta.
- **Confiabilidade Operacional:** Assegurar a operação contínua e estável do sistema, com alta disponibilidade da comunicação e dos equipamentos.

5.2 Arquitetura e Componentes do Sistema Implementado

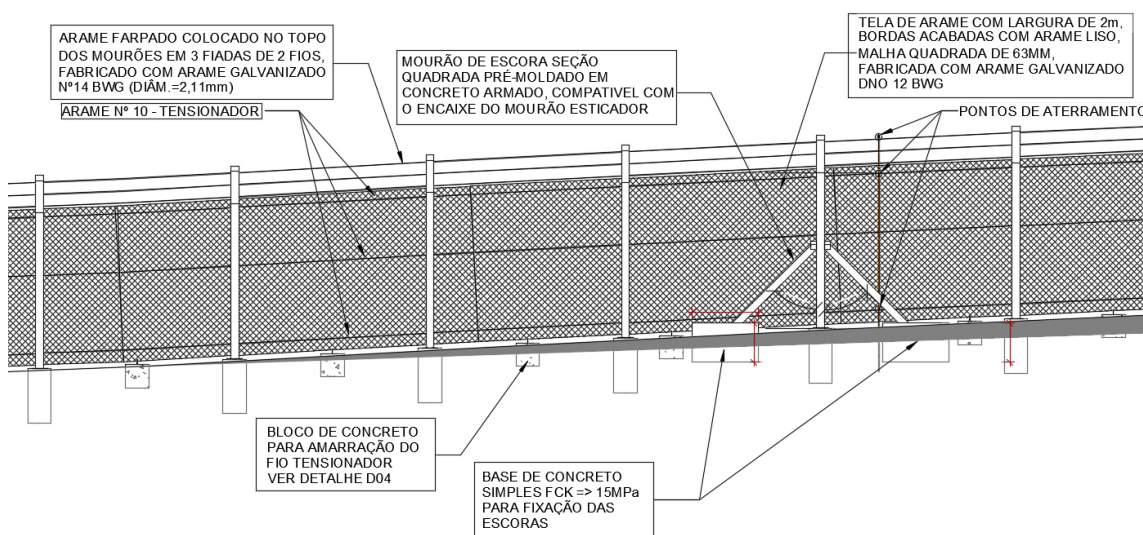
A arquitetura selecionada para a UFV Cristalina é baseada em uma abordagem de segurança em camadas, conforme a metodologia apresentada no Capítulo 3, e é centrada em

um sistema de CFTV IP robusto. Os principais componentes e sua integração são descritos a seguir:

5.2.1 Infraestrutura de Barreira Física

A primeira camada de defesa patrimonial da UFV Cristalina é composta por uma cerca perimetral robusta, projetada para dissuadir e dificultar acessos não autorizados. Esta cerca é construída com mourões de concreto, tela de arame nº10, topo com arame farpado, malha quadrada de 63mm de arame galvanizado, bases de bloco de concreto simples FCK = 15MPa para fixação das escoras, e pontos de aterramento. Sua função é primariamente passiva, mas essencial como barreira física e suporte para outros elementos do sistema. A Figura 14 mostra o detalhamento do projeto da cerca da UFV Cristalina.

Figura 14 - Desenho técnico do detalhamento da cerca perimetral



Fonte: autor

5.2.2 Sistema de Videomonitoramento (CFTV)

O sistema de CFTV é o pilar da detecção e verificação na UFV Cristalina. Ele é composto por:

- Câmeras IP: Foram utilizadas 14 câmeras VIP 94120 ULTRA IA FT da Intelbras, que contam com recursos de IA para melhor precisão na identificação de invasões e para vigilância do patrimônio da usina. Esse modelo de câmera, mostrado na figura 15, tem 4MP e 120 metros de alcance de IR para cobrir uma grande área do perímetro. Possui recursos de ia para reconhecimento de rostos e placas de carro, contagem de pessoas,

ultrapassagem de perímetro virtual para detecção de invasão e detecção de movimentos rápidos.

Figura 15 - Câmera VIP 94120 ULTRA IA FT



Fonte: Intelbras

- Câmeras PTZ: O modelo das câmeras PTZ utilizadas na segurança perimetral da UFV Cristalina é o VIP 7445 SD IA FT da Intelbras, e a figura 16 é uma imagem desse modelo. A PTZ escolhida conta com recursos de Zoom óptico de 45 vezes, tem 4 megapixels, alcance de IR de 250 metros radiais, função de patrulha de áreas, detecção de faces, detecção de cruzamento de linha virtual de pessoas, veículos e veículos não motorizados, garantindo o rastreamento dos objetos dentro da área da UFV.

Figura 16 - Câmera VIP 7445 SD IA FT



Fonte: Intelbras

- NVR: o modelo escolhido para a segurança da usina foi o NVR Intelbras NVD 3332, com capacidade para 32 canais de câmeras e 24 TB de HDDs, é responsável pela gravação e gerenciamento das imagens. Este NVR, conforme descrito na Seção 2.3.4, é local, mas com capacidade de acesso remoto, possui comunicação direta com o Switch Geral da UFV e é uma ponte de comunicação deste com o sistema completo de CFTV.
- Postes: os postes usados para a instalação das câmeras são metálicos galvanizados, de 7 metros de altura, com fixação robusta a partir de chumbadores instalados em bases de concreto. As sirenes foram integradas a esses postes, permitindo o acionamento sonoro em caso de detecção de intrusão, conforme explorado na Seção 2.3.12. A figura 17 mostra a instalação de um poste como este para vigilância perimetral.

Figura 17 - Instalação de um poste de CFTV com câmera e Sirene



Fonte: SolarTop

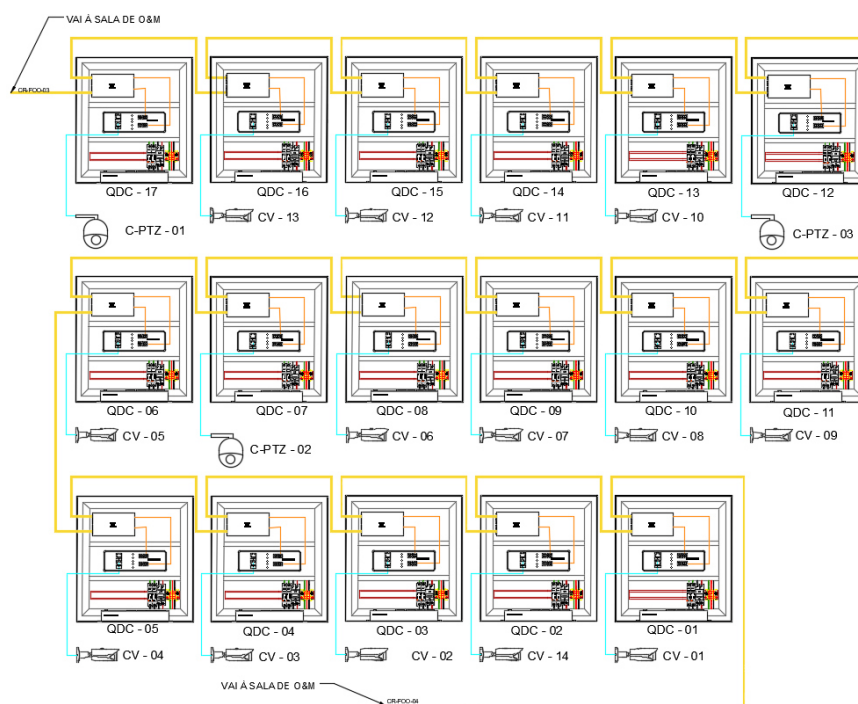
- QDCs (Quadros de Comando): QDCs herméticos em cada poste abrigam os equipamentos eletrônicos essenciais para o funcionamento do sistema, como DIOS, conversores de mídia, DPS. A Figura 18 mostra o diagrama de ligação dos equipamentos internos aos QDCs da UFV.
- Switches e Conversores de Mídia: A rede de comunicação utiliza switches gerenciáveis e conversores de mídia para interligar as câmeras ao NVR, garantindo a transmissão de dados via fibra óptica, conforme as topologias e meios físicos mostrados na Figura 9 e na Figura 19.

[illegible]

5.3 Descrição Detalhada da Implementação

A implementação do sistema de segurança na UFV Cristalina envolveu a instalação física e a configuração lógica dos componentes.

Figura 19 - Diagrama unifilar da rede de fibra óptica implementada, mostrando a interligação entre os QDCs



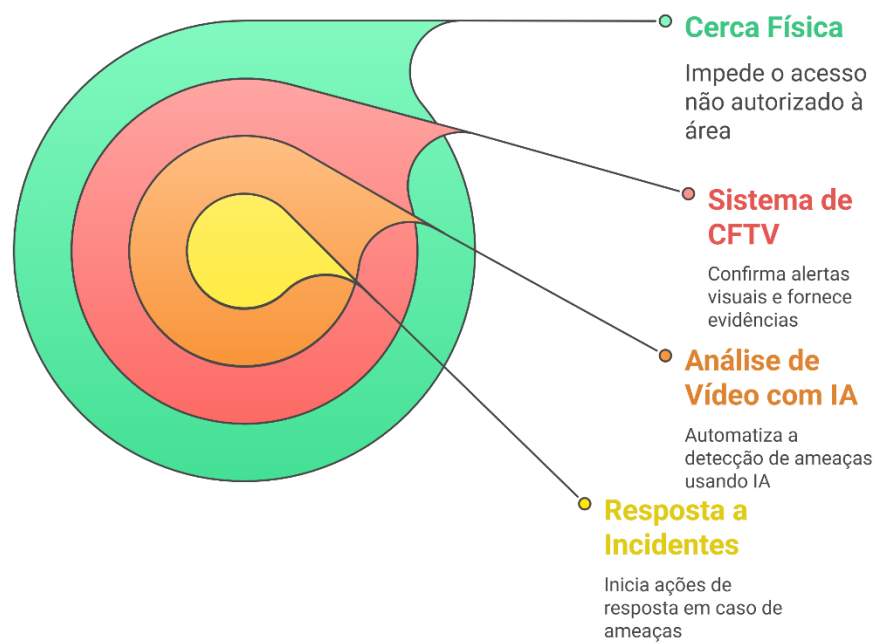
Fonte: autor

5.3.1 Layout Geral do Sistema

O perímetro da usina foi coberto por 17 postes metálicos, estrategicamente posicionados a uma distância média de 115 metros entre si, para os postes que dão suporte a câmeras IP, e espalhados de forma a cobrir a maior área possível, para os postes que suportam as câmeras PTZ, se baseando no alcance e nas áreas de cobertura inerentes a cada tipo de câmera. O posicionamento das câmeras foi escolhido de forma a cobrir o 100% do perímetro da usina, sem deixar pontos cegos que possam ser explorados por terceiros. A Figura 21 mostra a planta baixa da usina, o posicionamento das câmeras e as suas áreas de cobertura. Em vermelho, as áreas de vigilância das câmeras IP, e em azul, as áreas de vigilância das câmeras PTZ. A Figura 22 contém uma representação parecida, mas focando em mostrar a cobertura do alcance das câmeras que visa cobrir todo o perímetro da usina.

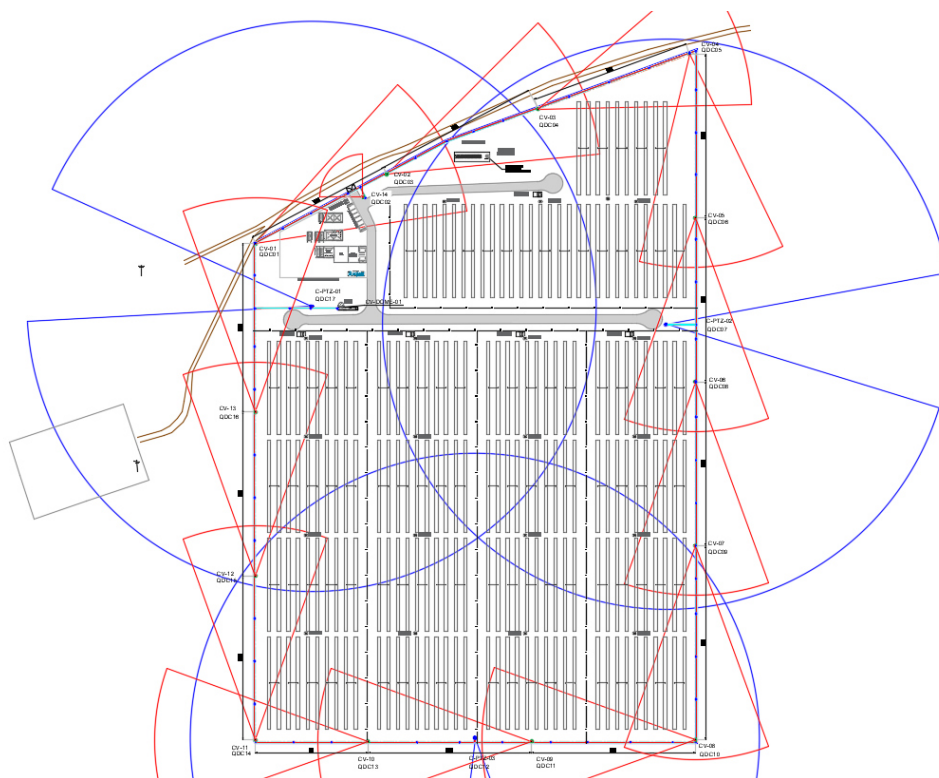
Em termos de arquitetura de camadas na integração da segurança, como após a camada física não foi colocada uma camada de detecção isolada do sistema de CFTV, sendo este responsável pela detecção e análise das imagens – capacidade que lhe é dada pela sua integração com IA na análise de vídeo. Portanto, adaptando o diagrama de camadas da figura 13 para caso do estudo da UFV Cristalina, temos a figura 20 como resultado.

Figura 20 - Diagrama de camadas da integração dos sistemas de segurança da UFV Cristalina



Fonte: autor

Figura 21 - Planta baixa da usina com layout do sistema de segurança, mostrando posição dos postes, câmeras e traçado da fibra óptica



Fonte: autor

5.3.2 Infraestrutura de Comunicação

Foi lançado um cabo de fibra óptica do tipo Monomodo com 4 fibras, seguindo uma topologia em série (*cascata/daisy-chain*), conectando os QDCs. A conexão entre os QDCs e a central foi realizada utilizando fibras por trecho, conectadas aos conversores de mídia. Na central, as fibras chegam a um Switch Gerenciável Hikvision com portas PoE e SFP. A Figura 19 demonstra os finais de linha dos cabos e suas conexões com os equipamentos.

5.3.3 Infraestrutura de Alimentação

Os QDCs são alimentados por um circuito CA dedicado, originado no TP Auxiliar do Skid 4, passando por um Quadro de Serviços Auxiliares e chegando ao sistema de CFTV através de um Quadro Estabilizado de Cargas Essenciais. O cabeamento de alimentação acompanha o traçado da fibra óptica em eletrodutos.

5.3.4 Central de Monitoramento

Um rack dedicado foi instalado na Casa de Operação & Manutenção (O&M), contendo: o NVR Intelbras NVD 3332, o switch central HIKIVISION 18 PORTAS 1518P, um monitor de vídeo e um nobreak para garantir autonomia em caso de falha de energia.

5.3.5 Software e Configurações

O sistema utiliza o software proprietário da Intelbras, que gerencia a visualização ao vivo, a reprodução das gravações e a integração dos eventos. As câmeras foram configuradas para gravação contínua 24 horas por dia, com marcação de eventos inteligentes por detecção de humanos e veículos, otimizando a busca por ocorrências relevantes. A rede IP foi configurada com endereçamento Estático para as câmeras e NVR, garantindo estabilidade e facilidade de gerenciamento.

O sistema de CFTV foi integrado ao sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) Elipse E3 Server 5.000. Essa integração permite que os alarmes e eventos gerados pelas câmeras, especialmente os relacionados à detecção inteligente de intrusão, sejam enviados diretamente para a plataforma Elipse E3. Isso proporciona à equipe de operação e segurança uma visão centralizada dos eventos, possibilitando uma resposta mais rápida e coordenada a qualquer incidente detectado no perímetro da usina. O sistema compartilha a infraestrutura de energia crítica com outros sistemas da usina, indicando sua importância operacional.

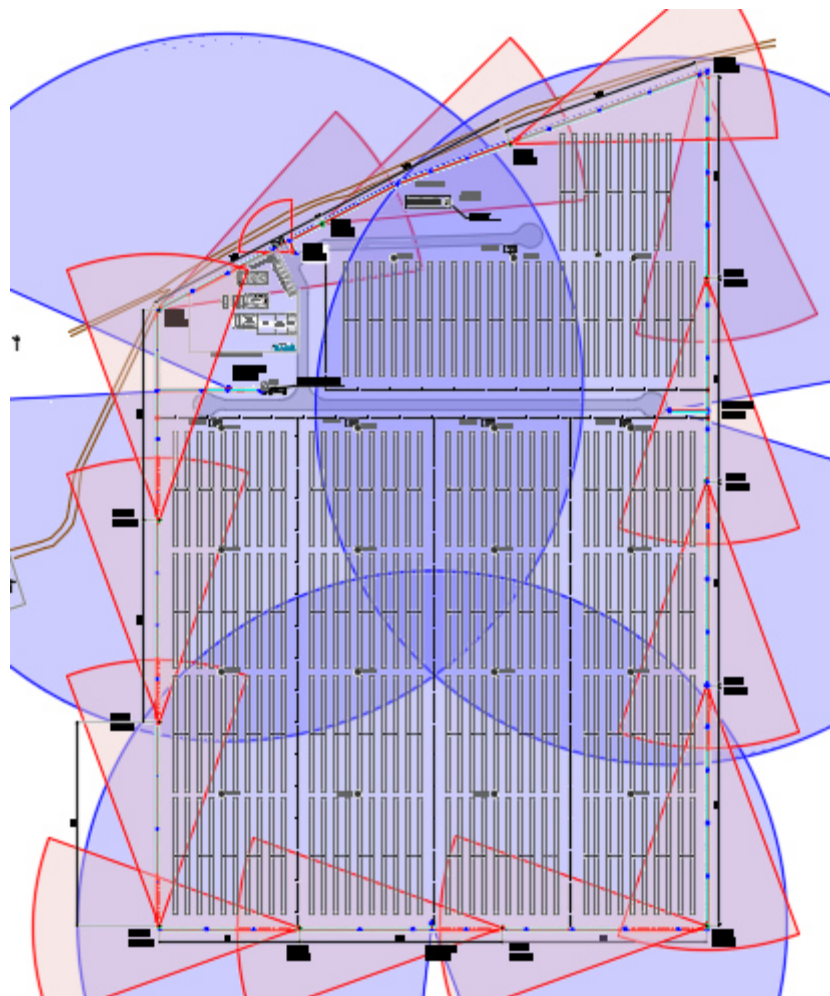
5.4 Processo de Instalação

A instalação física apresentou desafios como a necessidade de perfuração em solo e o cuidado no lançamento da fibra em trechos de perímetro extenso. As etapas principais envolveram a construção das bases dos postes, instalação dos postes, lançamento dos eletrodutos e cabos (fibra e energia), montagem e instalação dos QDCs, fusão das fibras ópticas, instalação das câmeras e configuração final do sistema. O processo total levou aproximadamente 6 dias.

5.5 Resultados, Desempenho e Discussão

Desde a sua entrada em operação em 06/05/2024, o sistema de segurança CFTV da Usina Solar UFV Cristalina tem apresentado um desempenho ótimo. Até o momento, não foi registrado nenhum caso de invasão ou acesso não autorizado ao perímetro da usina, indicando que a cerca perimetral, como barreira física e medida dissuasória inicial, tem funcionado eficazmente em seu papel de primeira camada de defesa. As câmeras, por sua vez, têm demonstrado a capacidade esperada de detectar aproximações de animais e pessoas, conforme configurado, permitindo o monitoramento proativo e a verificação de eventos relevantes, sem a ocorrência de alarmes falsos relacionados a intrusões. O acionamento das sirenes, integrado ao sistema de detecção, tem contribuído para a dissuasão imediata e o alerta local, reforçando a resposta em tempo real. Este resultado preliminar reforça a importância da abordagem em camadas, onde a robustez da barreira física complementa a inteligência do sistema de videomonitoramento e as capacidades de resposta ativa.

Figura 22 – Planta baixa da usina com layout do sistema de segurança, com ênfase na cobertura de alcance das câmeras de segurança.



Fonte: autor

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo central deste estudo foi detectar, detalhar e examinar profundamente as alternativas tecnológicas para o acompanhamento e a proteção dos bens nas áreas adjacentes às unidades de minigeração de energia solar no país, avaliando sua eficácia, aplicação técnica e operacional, bem como sua sustentabilidade financeira em variadas situações. A questão norteadora – "Qual modelo de sistema de segurança perimetral apresenta o melhor equilíbrio entre despesas e benefícios, e se adapta adequadamente em termos técnicos e operacionais a diferentes dimensões e contextos de usinas fotovoltaicas de minigeração no Brasil?" – foi investigada através de uma metodologia híbrida, que integrou a pesquisa em livros e documentos com a análise quantitativa de custos.

A revisão da literatura expôs a grande diversidade de tecnologias acessíveis, desde as proteções físicas estáticas até os sistemas mais modernos, baseados em Inteligência Artificial e drones. Tornou-se claro que, mesmo com cada tecnologia exibindo seus próprios benefícios e desvantagens, a resposta ideal raramente se encontra em uma única abordagem isolada. Ao invés disso, a segurança ao redor eficiente em unidades de minigeração solar pede uma estratégia dividida em níveis, na qual diferentes tecnologias se unem para ampliar a probabilidade de detecção e minimizar a quantidade de alarmes falsos e incômodos.

A análise comparativa técnico-operacional e econômica, sintetizada na Tabela 1, revelou um panorama e cheio de aspectos. Tecnologias com baixo CAPEX, como as proteções físicas e os sensores de barreira infravermelho ativo (IVA), podem ser sedutoras a princípio. No entanto, a crítica reside no fato de que, isoladamente, o emprego de apenas essas técnicas pode não ser suficiente para impedir uma tentativa de roubo ou invasão. Concluiu-se no decorrer do trabalho que constituir o sistema de segurança utilizando de várias camadas, como as de barreira simples, de vigilância, de análise e de dissuasão. Em caso de invasão confirmada, o responsável presente na usina deve tomar a decisão de acionar as forças de segurança necessárias, para frustrar qualquer tentativa contra o patrimônio da UFV.

6.1 Limitações do Estudo

Apesar dos resultados e contribuições, este estudo possui algumas limitações inerentes que devem ser consideradas:

As estimativas de preços apresentadas na Tabela 1 servem como um guia inicial, sendo resultados de levantamentos pontuais. É fundamental reconhecer a volatilidade do setor de segurança eletrônica, onde os valores podem flutuar significativamente devido a fatores como

fornecedores, volume de compra, termos de negociação e variações cambiais. Para uma avaliação financeira precisa de um projeto específico, é indispensável a obtenção de orçamentos formais e atualizados.

Adicionalmente, o dinamismo tecnológico no campo da segurança eletrônica e da inteligência artificial (IA) é notável. A constante emergência de novas tecnologias e o aprimoramento das existentes alteram continuamente o cenário, demandando uma atualização de conhecimento contínua. As análises aqui apresentadas possuem um caráter generalista, mas cada usina de minigeração possui características intrínsecas – como topografia, vegetação, entorno e infraestrutura preexistente – que influenciam diretamente a seleção e o desempenho das tecnologias de segurança. Portanto, a customização do projeto é sempre essencial.

A discussão sobre inteligência artificial focou nas funcionalidades gerais e benefícios, e uma análise mais aprofundada sobre algoritmos específicos, plataformas e os requisitos de hardware/software para IA transcende o escopo deste trabalho. Por fim, os resultados do estudo de caso são preliminares, baseados em um período de operação limitado. Uma avaliação de desempenho mais robusta exigiria a coleta de dados de longo prazo e o emprego de métricas mais detalhadas, como FAR (*False Alarm Rate*), NAR (*Nuisance Alarm Rate*) e POD (*Probability of Detection*).

6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Com base nas limitações identificadas e nos achados deste estudo, os seguintes temas se apresentam como promissores para futuras investigações:

O desenvolvimento de modelos mais detalhados de Custo Total de Propriedade (TCO) é fundamental. Esses modelos deveriam permitir a simulação de diferentes configurações de segurança em variados cenários de minigeração, incorporando dados de mercado mais específicos e diversas variáveis operacionais para um cálculo mais preciso.

Um estudo aprofundado sobre o desempenho de modelos de Inteligência Artificial (IA) aplicados ao monitoramento por vídeo perimetral em áreas fotovoltaicas é outro ponto relevante. Tal pesquisa poderia mensurar a eficiência desses modelos na redução de alarmes falsos e na discriminação de ameaças reais.

A influência de elementos ambientais no desempenho dos sensores merece ser investigada com mais afinco. É crucial apurar o impacto de condições climáticas extremas (como chuvas intensas, névoa densa, ventos fortes e poeira) no desempenho de diferentes tipos

de sensores de barreira e câmeras, buscando sugerir métodos eficazes de atenuação desses efeitos

A viabilidade técnica, econômica e legal do uso de drones autônomos para vigilância e resposta a alarmes em grandes usinas solares constitui um campo de pesquisa promissor. Isso inclui a avaliação do progresso na autonomia de voo e na evolução das normativas regulatórias.

Por fim, a criação de sistemas de apoio à decisão seria de grande valia. Desenvolver ferramentas ou plataformas que auxiliem engenheiros e projetistas na seleção da configuração de segurança perimetral mais otimizada, integrando dados de custo, desempenho e as características específicas do local, representaria um avanço significativo para o setor.

Este estudo enriquece o conhecimento técnico ao apresentar uma análise detalhada e comparativa das tecnologias de segurança ao redor de usinas solares no Brasil, mostrando a importância de usar várias camadas e analisar o custo total. Espera-se que as orientações e exemplos criados ajudem na decisão de como instalar sistemas eficientes e baratos, protegendo um setor essencial para a energia do país.

REFERÊNCIAS

ABINEE (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA). **Relatório Setorial: Segurança em Instalações Fotovoltaicas**. São Paulo: ABINEE, 2023.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **Guia de Aplicação das Normas de Segurança para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABSOLAR (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA). **Relatório Anual de Segurança em Usinas Fotovoltaicas**. São Paulo: ABSOLAR, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Informe Técnico: Geração Distribuída Fotovoltaica**. Brasília, DF: ANEEL, 2024. Disponível em: [https://www.absolar.org.br/noticia/https-www-estadao-com-br-economia-energia-solar-bate-recorde-em-2024-nprei/]. Acesso em: 9 jun. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 956/2021** (Compilada com alterações até a REN 1.059/2023). Estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília, DF: ANEEL, 2021.

ALLAN CALDAS. **Quanto custa o metro do cabo de fibra óptica?** Allan Caldas Redes e Telecomunicações, 15 dez. 2021. Disponível em: https://allancaldas.com.br/quanto-custa-o-metro-do-cabo-de-fibra-optica/. Acesso em: 4 jun. 2025.

ALVES, Lucas. **"Comissionamento a quente - UFV 5 MVA"**. LinkedIn. Disponível em: https://www.linkedin.com/pulse/copy-comissionamento-quente-ufv-5-mva-lucas-alves-lci9f/. Acesso em: 9 de junho de 2025.

AMAZON DO BRASIL. **Sensores de Barreira Infravermelho**. São Paulo: Amazon, 2025. Disponível em: [https://www.amazon.com.br/s?k=Sensores+de+Barreira+infravermelho&dc&__mk_pt_BR=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91]. Acesso em: 4 jun. 2025.

ANDI, et al;. **Analysis of Solar Panel Design as a Power Source For CCTV at PT**. Link NET, TBK. Jurnal Scientia, v. 13, n. 04, p. 2031-2039, 22 Dec. 2024.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14565**: Cabeamento estruturado para edifícios comerciais e data centers. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16278**: Sistemas de segurança contra intrusão — Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16690**: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 62852**: Conectores para sistemas fotovoltaicos de corrente contínua - Requisitos de segurança e ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AXIS COMMUNICATIONS. **Guia de Soluções de Videomonitoramento para Usinas Solares**. São Paulo: Axis Communications Brasil, 2023.

BOSCH SECURITY SYSTEMS. **Manual Técnico: Sistemas de Detecção Perimetral**. Campinas: Bosch Security Systems Brasil, 2022.

BRASIL. **Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018**. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília, DF: Presidência da República, 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/113709.htm. Acesso em: 4 jun. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída [...]. Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 4 jun. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Norma Regulamentadora nº 10 (NR-10)** - Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Brasília, DF: MTP, 2022. Disponível em: [<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao->

social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-10.pdf]. Acesso em: 4 jun. 2025.

CANAL SOLAR. **Quais os furtos em usinas solares mais comuns e como prevenir**. Canal Solar, 8 maio 2025. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/cobre-inversores-furtos-usinas-solares-como-prevenir/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

DAHUA TECHNOLOGY. **Catálogo de Produtos para Proteção Perimetral**. São Paulo: Dahua Technology Brasil, 2023.

DIAS, A. S. **Projeto de Automação de Subestação**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

FERNANDES, J. E. S, et al; **Desafios regulatórios à promoção da fonte solar fotovoltaica no Brasil**. Revista de Gestão e Secretariado, v. 14, n. 3, p. 3003-3006, 2023.

GIL, ANTONIO CARLOS. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GUPTA, A.; QUAMARA, M. **IoT platform for monitoring and control of PV system**. In: 2020 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SYSTEMS AND APPLICATIONS (ICESA), 2020, Pune. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, 2020. p. 1-5. DOI: 10.1109/ ICESA48346.2020.9374909.

HIKVISION. **Soluções de Segurança para o Setor de Energia**. São Paulo: Hikvision Brasil, 2022.

INTELBRAS. **"Câmera bullet com 120 m de IR"**. Intelbras. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/camera-bullet-com-120-m-de-ir-vip-94120-ultra-ia-ft>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

INTELBRAS. **"Câmera IP speed dome da Linha Future com 4 MP"**. Intelbras. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/camera-ip-speed-dome-da-linha-future-com-4-mp-vip-7445-sd-ia-ft>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

LAGOTELA. **Usina Solar – Janaúba/MG - Lagotela**. Disponível em: <https://lagotela.com.br/obras/usina-solar-janauba-mg/>. Acesso em: 9 junho de 2025.

LYRA M2M. **"O uso da IoT nos sistemas inteligentes de energia solar"**. Disponível em: <https://blog.lyram2m.com.br/o-uso-da-iot-nos-sistemas-inteligentes-de-energia-solar/>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

MANAGE ENGINE BLOG. **"Topologia de rede: porque fazer e como fazer de forma fácil"**. ManageEngine Blog. Disponível em: <https://blogs.manageengine.com/pt-br/2024/03/28/topologia-de-rede-porque-fazer-e-como-fazer-de-forma-facil.html>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

MARCONI; LAKATOS. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARTINS, J. M. **Sistema de monitoramento de dados provenientes da energia fotovoltaica através de uma plataforma IoT de aquisição e controle**. 2019. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.

MERCADO LIVRE. **Sensores de Barreira Infravermelho**. São Paulo: Mercado Livre, 2025. Disponível em: [[https://lista.mercadolivre.com.br/sensores-de-barreira-infravermelho#D\[A:sensores%20de%20barreira%20infravermelho\]](https://lista.mercadolivre.com.br/sensores-de-barreira-infravermelho#D[A:sensores%20de%20barreira%20infravermelho])]. Acesso em: 4 jun. 2025.

NETALARMES. **Sensores de Barreira**. São Paulo: Netalarmes, 2025. Disponível em: [<https://www.netalarmes.com.br/alarme/sensor-de-alarme/sensor-de-barreira>]. Acesso em: 4 jun. 2025.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2022.

PORTAL SOLAR. **Furtos em Usinas Solares: Como Prevenir e Proteger seu Investimento**. Portal Solar, 2023. Disponível em: [<https://canalsolar.com.br/cobre-inversores-furtos-usinas-solares-como-prevenir/>]. Acesso em: 9 jun. 2025.

RBTEC SISTEMAS DE PROTEÇÃO PERIMETRAL. **Sistema Solar de Segurança de Fazenda - Estudo de Caso de Sistema de Segurança de Fazenda Fotovoltaica**. Disponível em: <https://www.rbtec.com/pt/estudos-de-caso/sistema-de-seguranca-de-perimetro-de-usina-solar/>. Acesso em: 04 jun. 2025.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. Florianópolis: LABSOLAR/UFSC, 2021.

SÁ, Silvio. **"Detecção de Intrusão de Perímetro: a primeira linha de defesa"**. Mobilitex. Disponível em: <https://mobilitex.com.br/noticias/deteccao-de-intrusao-de-perimetro/>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

SANTANA, A, J, C. **Segurança Eletrônica em Usinas Fotovoltaicas: Tecnologias e Estratégias para Proteção de Infraestruturas Críticas**. 2025. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

SEGURANÇA ELETRÔNICA. **"Segurança de Parques Solares e Fotovoltaicos: saiba como proteger as instalações de criminosos"**. Revista Segurança Eletrônica. Disponível em: <https://revistasegurancaeletronica.com.br/seguranca-de-parques-solares-e-fotovoltaicos-saiba-como-protoger-as-instalacoes-de-criminosos/>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

SOLAR TOP. "CFTV". Disponível em: <https://www.solartop.com.br/servi%C3%A7os/cftv>. Acesso em: 9 de junho de 2025.

TECINFOSERVICOS. **Quanto custa a instalação de câmeras de segurança?** Tecinfoservicos Blog, 12 jan. 2024. Disponível em: <https://www.tecinfoservicos.com.br/post/quanto-custa-a-instalacao-de-cameras-de-seguranca>. Acesso em: 4 jun. 2025.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2022. ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

ZTT CABLE BRASIL. **Quanto custa o metro de cabo de fibra óptica?** ZTT Cable Brasil Blog, 18 ago. 2023. Disponível em: <https://www.zttcable.com.br/blog/quanto-custa-ometro-de-cabo-de-fibra-optica>. Acesso em: 4 jun. 2025.