Aplicação de Câmeras Termográficas para Monitoramento de Ativos em Subestações Elétricas

João Pedro da Matta Galera da Silva[1], Matheus Fortunato Dário[1], Eduardo Félix Ribeiro Romaneli[1,2], Alceu André Badin [1,3], Winderson Eugenio dos Santos[1], Leonardo Göbel Fernandes[1,3]

[1]Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
(joaosilva.2016@alunos.utfpr.edu.br)
[2]PPGSE - Programa de Pós Graduação em Sistemas de Energia, Curitiba, Brasil
[3]CPGEI - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Resumo: No presente trabalho foi realizada a análise de características dos modelos de câmeras termográficas FLIR T540, A700 e A310PT em relação a sua viabilidade para aplicações relativas à análise termográfica automatizada em subestações elétricas. Foram comparados os parâmetros mais relevantes de cada equipamento avaliado e chegou-se a conclusão que a câmera termográfica A310PT apresenta as características mais adequadas para a aplicação desejada.

Palavras-chave: Câmeras Termográficas; Termografia; Subestações

INTRODUÇÃO

O diagnóstico precoce de falhas tem papel importante na realização da manutenção periódica, assim tal procedimento pode tornar-se significativamente mais simples e conveniente a partir da aplicação de métodos de diagnóstico baseados na análise termográfica (Cao et al, 2008). A inspeção termográfica é uma técnica não invasiva que possibilita a medição da temperatura de superfícies a partir da detecção de radiação infravermelha e a consequente detecção de falhas relativas ao superaquecimento de equipamentos, a partir da análise dos resultados obtidos na utilização de tal procedimento (Monteiro et al, 2013).

Em subestações de energia elétrica, a confiabilidade dos equipamentos instalados é crítica (Pinto et al, 2008). As demandas do mercado energético exigem que os operadores mantenham um bom nível de continuidade no fornecimento de eletricidade (Souza, 2008). Além disso, a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, órgão federal responsável pela regulação do setor elétrico, impõe índices de qualidade e disponibilidade que devem ser seguidos pelas concessionárias, implicando em penalidades financeiras em caso de descumprimento (Tarrago, 2019). Por estas razões, é do interesse dos operadores elétricos a redução de falhas que causem a interrupção do serviço (Tarrago, 2019).

Problemas que causem o aumento da corrente ou da resistência ôhmica de equipamentos das subestações elétricas, como oxidação de contatos ou sobrecargas em circuitos, causam pontos quentes que podem ser detectados pela termografia antes da ocorrência de alguma falha (Monteiro et al, 2013). Assim, o uso de sistemas de monitoramento termográfico tem obtido resultados satisfatórios ao propiciar comodidade para o gerenciamento de subestações. (Wang et al, 2017).

Atualmente, as companhias de eletricidade têm realizado inspeções térmicas de forma manual. Devido a um maior número de subestações do que mão de obra qualificada para a tarefa, esta abordagem tem levado a dificuldades na identificação dos problemas, além de impedimentos em realizar as medições em períodos com condições ambientais mais propícias. (Zhang et al, 2017). Por isso, várias alternativas vêm sendo desenvolvidas para a captura de imagens térmicas de forma automatizada (Guo et al, 2010)

Para além da coleta das imagens em si, torna-se interessante o desenvolvimento de um sistema que seja capaz de analisar os dados e identificar eventuais falhas de forma automática, acionando, assim, equipe técnica competente. Por este motivo, busca-se, neste artigo, comparar três opções de câmeras termográficas disponíveis no mercado, analisando as opções de conectividade e protocolos de comunicação oferecidos por estas; além da possibilidade de desenvolvimento de software de comunicação compatível ou necessidade de algum software proprietário para a coleta e transmissão de dados pela internet.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada pesquisa exploratória com revisão bibliográfica visando comparar modelos de câmeras termográficas disponíveis, utilizando como base trabalhos científicos publicados sobre o tema. A partir da análise de documentação disponibilizada pelo fabricante de diferentes modelos de câmeras, avaliando-se os parâmetros tidos como mais relevantes para a realização de inspeções termográficas automatizadas, foram relacionadas as características mais relevantes de cada câmera estudada. Dessa forma foram estabelecidas a relação comparativa entre os modelos estudados e evidenciadas as vantagens e desvantagens de cada equipamento termográfico.

Foram analisados diferentes modelos de câmeras termográficas da marca FLIR e inicialmente foi adquirida a câmera modelo FLIR T540, pois ela poderia ser empregada para a captura de imagens termográficas preliminares de forma manual, sendo possível realizar testes para avaliar a viabilidade do uso de câmeras manuais semelhantes para aplicações de monitoramento termográfico automatizado. A partir dos resultados dos testes realizados optou-se por avaliar modelos de câmeras próprias para soluções relacionadas à automação industrial, pelo fato destas terem as características desejáveis à aplicação em estudo. Com base na análise realizada das opções fornecidas de câmeras de automação optou-se por avaliar as câmeras dos modelos FLIR A700 e FLIR A310pt.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

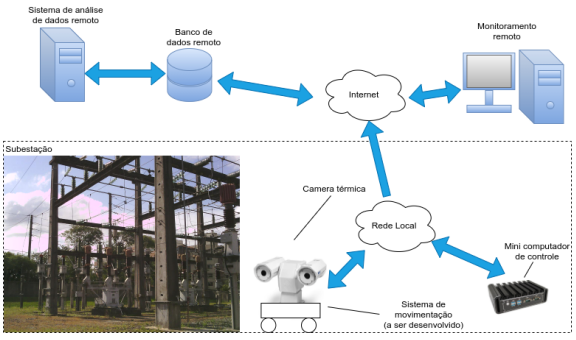


Figura 1. Estrutura básica do sistema que será desenvolvido. Posicionamento dos equipamentos não correspondem aos reais. (autoria própria).

O sistema para o monitoramento da subestação exige o uso de uma câmera que possa operar sem intervenção humana, podendo ser controlada por um script externo, para a realização de capturas de imagens térmicas de diversos equipamentos. A arquitetura do sistema deverá ter uma estrutura básica similar ao que se mostra na Figura 1.

Também de forma automatizada, as imagens, juntamente com metadados termográficos (como emissividade, distância do objeto, faixa de temperatura, entre outros gerados pela câmera) devem ser enviados através de uma conexão de internet até um servidor remoto onde as imagens serão analisadas por um software desenvolvido para este fim.

A) Opções de câmera

Neste contexto, foram analisados os dados disponíveis na bibliografia utilizada, de forma a encontrar o modelo de câmera termográfica que melhor se enquadre aos requisitos do sistema a ser desenvolvido, em relação aos dois equipamentos fixos destinados à automação e ao equipamento manual inicialmente disponível. Deve-se destacar que todas as câmeras avaliadas produzem tanto imagens térmicas quanto imagens RGB.

1) Câmera portátil T540

A FLIR T540 é uma câmera térmica portátil que pesa cerca de 1,3kg. Gera imagens RGB de até 5 Megapixels e térmicas de resolução 464 x 348 pixels. As imagens térmicas possuem três opções de faixa de temperatura: -20°C a 120°C; 0°C a 650°C; ou 300°C a 1500°C (FLIR…,201-?c).

Este modelo de câmera possui grau de proteção IP 54 (FLIR…,201-?c). O grau de proteção IP é uma classificação definida pela Comissão Eletrotécnica Internacional, através da norma IEC 60529, para especificar a resistência contra entrada de objetos sólidos e líquidos em invólucros de equipamentos elétricos e eletrônicos. O IP 54 representa uma proteção contra poeira e projeções de água (IP…, 2013), o que não permite seu uso de forma fixa em ambientes externos.

Realiza captura de imagens para um cartão SD removível. Tais imagens são salvas no formato JPEG (FLIR…,201-?c). O arquivo gerado possui *tags* EXIF (*Exchangeable image file format*) que carregam os metadados termográficos. O EXIF é uma especificação da JEITA (*Japan Electronics and Information Technology Industries Association*) que define como imagens de câmeras digitais são salvas em arquivos, incluindo tanto as imagens em si quanto *tags* com informações da captura (Exif…,2010).

Também a partir da norma EXIF, o arquivo incorpora a imagem RGB, que pode ser extraída com as ferramentas apropriadas, como mostrado nas figuras 2, 3 e 4.

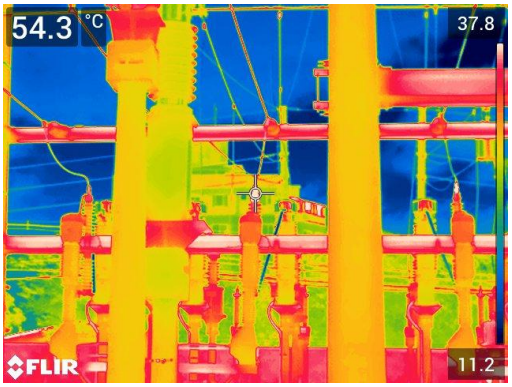


Figura 2: Imagem térmica capturada por uma câmera FLIR T540.

Emissivity	: 0.95
Object Distance	: 1.00 m
Reflected Apparent Temperature	: 20.0 C
Atmospheric Temperature	: 20.0 C
IR Window Temperature	: 20.0 C
IR Window Transmission	: 1.00
Relative Humidity	: 50.0 %
Planck R1	: 11059.272
Planck B	: 1307.1
Planck F	: 1
Atmospheric Trans Alpha 1	: 0.000000
Atmospheric Trans Alpha 2	: 0.000000
Atmospheric Trans Beta 1	: 0.003180
Atmospheric Trans Beta 2	: 0.003180
Atmospheric Trans X	: 0.732000
Camera Temperature Range Max	: 120.0 C
Camera Temperature Range Min	: -20.0 C
Camera Temperature Max Clip	: 130.0 C
Camera Temperature Min Clip	: -40.0 C
Camera Temperature Max Warn	: 120.0 C
Camera Temperature Min Warn	: -20.0 C
Camera Temperature Max Saturated	: 150.0 C
Camera Temperature Min Saturated	: -60.0 C
Camera Model	: FLIR T540

Figura 3: Exemplo de metadados salvos no arquivo gerado pela câmera T540 para a imagem da Figura 2 obtidos pelo software Exiftool



Figura 4: Imagem RGB incorporada no mesmo arquivo gerado pela câmera T540 para a imagem da figura 2 (extraída através do software Exiftool)

Para transferência de dados, a T540 apresenta quatro opções de interface: USB; *Bluetooth*; *Wi-Fi*; e *DisplayPort* (este integrado à porta USB) (Flir…,201-?c). Através da USB, a câmera é identificada como um dispositivo de armazenamento externo pelo computador a ela conectado, permitindo a transferência das imagens salvas. O controle externo e o streaming de vídeo também são possíveis, tanto pelo USB quanto pelas conexões sem fio, mas somente através de softwares proprietários da FLIR (FLIR…,201-?c), de forma que não é possível desenvolver um aplicativo personalizado para comandar a câmera externamente, o que poderia ser utilizado para programar ações automáticas, dificultando, assim, a automatização deste modelo. Já o *DisplayPort* é destinado a conexão de um monitor externo.

2) Câmeras de automação

a) Resumo do modelo A700

A FLIR A700 é uma câmera fixa que pesa cerca de 0,82 kg. Gera imagens térmicas 320x240 ou 640x480 pixels e imagens RGB de 5 megapixels. As opções de faixa de temperatura são iguais às da T540: -20°C a 120°C; 0°C a 650°C; ou 300°C a 1500°C (FLIR…,201-?b). Possui grau de proteção IP 54 ou, com o uso de um acessório próprio fornecido pelo fabricante, IP 66 (FLIR…,201-?b), o que garante uma proteção total à poeira e a jatos de água potentes (IP…,2013), permitindo, assim, seu uso fixo em ambientes externos.

A comunicação é feita através de uma porta ethernet ou, opcionalmente, por Wi-Fi, permitindo a comunicação através de uma rede IP (FLIR…,201-?b). Mais detalhes sobre o funcionamento serão apresentados abaixo.

b) Resumo do modelo A310PT

A FLIR A310PT é uma câmera de automação fixa com *PanTilt*, sistema eletromecânico que permite o rotacionamento da câmera nos planos horizontal e vertical. Pesa cerca de 17,8 kg e produz imagens térmicas de 320x240 pixels. Diferentemente da T540 e A700, a A310PT só possui duas opções de faixa de temperatura de objeto, mas que também estão disponíveis nas duas anteriores: -20°C a 120°C e 0°C e 350°C (FLIR…,201-?a). Com grau de proteção IP 66, pode ser instalada diretamente em espaços abertos. O *PanTilt* permite 360° de rotação horizontal e inclinação vertical de +-45° (FLIR…,201-?a).

Para comunicação, a A310PT apresenta uma saída de vídeo composto analógico, com opções de cores nos padrões PAL e NTSC, e uma porta Ethernet (FLIR…,201-?a), cujo funcionamento será descrito na próxima seção.

c) Obtenção de dados das câmeras A700 e A310PT

Disponível tanto na A700 quanto na A310PT, a conexão Ethernet permite o controle e obtenção de dados através de uma rede IP.

Inicialmente, ao se conectar à rede, é possível acessar uma página web interna da câmera através de um navegador. A página apresenta imagens em

tempo real, permite a definição de leituras e consequente obtenção dos seus valores. Também permite configuração de vários parâmetros do dispositivo.

O acesso pelo navegador, porém, ainda depende de interferência humana. Para o requisito de poder automatizar a operação, a câmera também disponibiliza outros protocolos sobre IP que, em tese, permitem atender isso.

Inicialmente, tem-se o *Real Time Streaming Protocol* (RTSP) (FLIR…,201-?a; FLIR…,201-?b), protocolo aberto que possibilita a obtenção em tempo real da imagem, tanto térmica quanto RGB, utilizando *codecs* como H.264 ou MPEG-4 (RTSP…,201-?).

Durante os testes, foi escrito um pequeno script em Python, com o uso da biblioteca OpenCV, que permitiu a captura de imagens a partir deste *streaming*, como mostrado nas figuras 5 e 6.



Figura 5: Imagem térmica capturada a partir do streaming RTSP de uma câmera modelo A700.

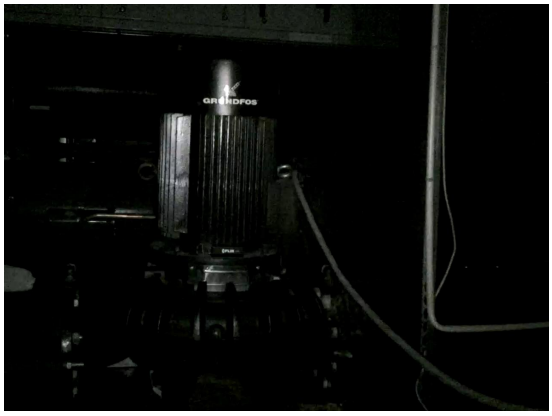


Figura 6: Imagem RGB capturada a partir do streaming RTSP de uma câmera modelo A700.

Diferentemente da imagem gerada pela T540, a imagem recebida a partir do protocolo RTSP não possui metadados, importantes para a realização da análise termográfica. Porém, outros protocolos disponíveis permitem obtê-los.

Através do ModBus, é possível recuperar as leituras de medições previamente definidas. Já através do *Ethernet Industrial Protocol* (EIP) estão disponíveis todos os dados encontrados no ModBus assim como vários outros dados. Aqui são encontradas informações como emissividade, distância do objeto, faixa de temperatura e outros presentes nos requisitos (Ethetnet/IP...,2009).

Além da leitura, o EIP também permite enviar comandos à câmera. Entre eles, é possível definir as medições que serão realizadas. Outra opção é fazer com que a câmera faça a captura da imagem para sua memória interna (Ethetnet/IP...,2009) (opção também disponível na interface Web), assim como é feito na T540. Tal imagem, de modo semelhante a câmera portátil, já inclui os metadados através do padrão EXIF. A obtenção do que está salvo na memória interna pode ser feito pelo navegador ou através do protocolo FTP (*File Transfer Protocol*), conectando-se a um servidor interno da câmera (Ethetnet/IP...,2009), sendo esta uma ação que pode ser automatizada.

A vantagem de utilizar esse último método ao invés do RTSP é a possibilidade de ter um formato comum entre os três modelos de câmera, permitindo uma maior flexibilidade na captura para o software de análise.

d) Controle do *PanTilt* para a A310PT

Na câmera A310PT, especificamente, por possuir comandos *PanTilt*, foi necessário verificar a possibilidade de controlar a movimentação da câmera através de um software externo.

O protocolo *Open Network Video Interface Forum* (ONVIF) é um protocolo de comunicação aberto desenvolvido com a intenção de promover a interoperabilidade de dispositivos de segurança, como câmeras, baseados em IP de diferentes fabricantes em um mesmo sistema (Phan et al, 2015). A câmera A310PT possui compatibilidade com esse protocolo e por meio dele é possível realizar o controle de movimentação do *PanTilt* do equipamento. Como tal protocolo é amplamente utilizado, há formas de interfaceamento de dispositivos no padrão ONVIF utilizando algumas linguagens de programação, como a linguagem Python. Dessa forma seria possível realizar o controle de movimentação do *PanTilt* da câmera A310PT utilizando algoritmos desenvolvidos em linguagens de programação, o que auxiliaria na integração com uma possível a aplicação final.

B) Comparativo das câmeras

Com base na pesquisa realizada sobre os três modelos, foram selecionadas as características importantes para o sistema em desenvolvimento e montada a tabela 1 com o comparativo de tais características.

Tabela 1: Comparação das principais características consideradas na análise.

Característica	T540	A700	A310PT
Resolução IR	464 x 348	320 x 240 ou 640 x 480	320 x 240
Resolução RGB	5 Megapixels	5 Megapixels	Não informada
Faixa de temperatura	-20°C a 120°C; 0°C a 650°C; ou 300°C a 1500°C	-20°C a 120°C; 0°C a 650°C; ou 300°C a 1500°C	-20°C a 120°C; 0°C a 650°C;
Grau de proteção	IP 54	IP 54 / IP 66 com acessório	IP 66
Streaming de vídeo via rede	Apenas com software proprietário	Com software proprietário ou protocolo aberto (RTSP)	Com software proprietário ou protocolo aberto (RTSP)
Captura de fotos	Manualmente (botão físico ou software proprietário)	Manualmente, pela interface web, ou por protocolos abertos (EIP)	Manualmente, pela interface web, ou por protocolos abertos (EIP)
Transferência de imagens capturadas	Por USB ou software proprietário via rede	Via rede com protocolo aberto	Via rede com protocolo aberto
Acesso aos metadados	Por TAGs EXIF na imagem capturada	Por TAGs EXIF na imagem capturada ou EIP via rede	Por TAGs EXIF na imagem capturada ou EIP via rede
Movimentação	Não	Não	*PanTilt* com controle por interface web ou ONVIF

CONCLUSÃO

Considerando as especificações de cada um dos três modelos e os comparando com a necessidade, descartou-se primeiramente o uso da FLIR T540. A dificuldade em desenvolver um software próprio para comandá-la, devido ao uso de protocolos proprietários, foi um ponto importante para esta decisão, somado à falta de proteção para a exposição fixa em ambientes externos.

Entre as câmeras FLIR A700 e A310PT, uma das diferenças analisadas foi a faixa adicional de temperatura presente no modelo A700. Tal faixa, porém, de 300°C a 1500°C, é fora da necessidade do projeto, portanto não foi considerada. Várias das outras características são semelhantes para os dois modelos, principalmente na obtenção de dados e controle. A diferença significativa entre as duas, para a aplicação em que foram analisadas, é a presença do *PanTilt* na câmera A310PT.

Como um dos requisitos é a movimentação, optou-se pela aquisição do modelo A310PT em um primeiro momento, para a realização de testes preliminares em laboratório e em campo. O modelo A700 também foi considerado uma opção que pode ser viável no futuro e é uma boa alternativa em situações onde a câmera seja utilizada de forma fixa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UTFPR pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa e à COPEL - Distribuição pelo apoio e financiamento dos recursos para realização do projeto P&D ANEEL/COPEL Distribuição PD-2866-0528/2020 - DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE AUTOMÁTICA DE IMAGENS TÉRMICAS.

REFERÊNCIAS

Cao, Y.; Gu, X.; Jin, Q.. **Infrared technology in the fault diagnosis of substation equipment**. 2008 China International Conference on Electricity Distribution, 2008.

EtherNet/IP and Modbus TCP Object Models. **Flir Systems**. 15 de Set. de 2009. Disponível em <http://support.flir.com/Answers/A1232/EIP_library.pdf>. Acesso em: 31 de mai. de 2021.

Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.3. **JEITA - Japan Electronics and Information Technology Industries Association**. 2010. Disponível em: <https://home.jeita.or.jp/tsc/std-pdf/CP3451C.pdf>. Acesso em: 31 de mai. de 2021.

Flir A310 PT (Automation). **Teledyne Flir**. 201-?. Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/a310-pt-automation/>. Acesso em: 31 de mai. de 2021

Flir A400/A700. **Teledyne Flir**. 201-?. Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/a400-a700-science-kits/>. Acesso em: 31 de mai. de 2021

Flir T540. **Teledyne Flir**. 201-?. Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/t540/>. Acesso em: 31 de mai. de 2021

Guo, R.; Han, L.; Sun, Y.; Wang, M. **A mobile robot for inspection of substation equipments**. 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, 2010.

IP Ratings. **International Electrotechnical Commision**. 2013. Disponível em: <https://www.iec.ch/ip-ratings>. Acesso em: 23 de jun. de 2021.

Monteiro, B. S.; Fernandes, M. F.; da Silva, A. V.; Leite, L. H. M. **Inspeção em Subestações Utilizando a Termografia**. Revista Científica Semana Acadêmica, Edição 41, Volume 01. 2013.

Phan, C. C.; Nguyen, T. B.; Chung, S.-T. **Design and implementation of ONVIF-based event service for DM 814x camera**. 2015 International Conference on Communications, Management and Telecommunications (ComManTel), 2015.

Pinto, J. K. C.; Masuda, M.; Magrini, L. C.; Jardini, J. A.; Garbelloti, M. V. **Mobile robot for hot spot monitoring in electric power substation**, IEEE, Chicago, IL, USA, 2008.

RTSP - Display and record a video stream (Automation Cameras). **Teledyne Flir.** 201-?. Disponível em: <https://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/1053>. Acesso em: 31 de mai. de 2021.

Souza, F. A. **Detecção de Falhas em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Usando Dispositivos Programáveis**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2008.

Tarrago, R. A. **Confiabilidade de Subestações de Transmissão de Energia Elétrica com Aplicação de Equipamentos de Manobra não Convencionais**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2019.