

CATEGORIA 3

SISTEMA EMBARCADO DE TERMOVISÃO E RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS SÍNTESE DO TRABALHO

1 - INTRODUÇÃO

A inspeção manual de equipamentos é tradicionalmente efetuada por pessoas treinadas para identificar avarias nos mesmos, entretanto possui desvantagens, como tempo para inspeção, custo relacionado e falhas na identificação. A motivação para a elaboração do projeto de Sistema Embarcado de Termovisão e Reconstrução de Imagens se deu em função destes fatores, que direcionados para a manutenção diária em campo acarretaram maior produtividade na inspeção de ativos da rede de energia – SAE (Sistema Auxiliar de Energia). Este sistema é responsável pelo fornecimento de energia dos sistemas de telecomunicações e sinalização da ferrovia, portanto com grande importância na infraestrutura do sistema ferroviário. Sendo assim, esta aplicação contribui também para criação de um banco de dados resultantes da geração dos históricos de vistorias. Através do conhecimento prévio de sobreaquecimento em ativos no SAE, medidas prévias que impedirão desligamentos não programados causadores de impactos no transporte de carga serão evitados, possibilitando ações na manutenção preventiva sem impactos no transporte.

O crescente aumento da capacidade de processamento dos computadores, tem possibilitado a utilização de técnicas de visão computacional, tornando-a cada vez mais

rápida e barata. Graças a esse advento, diferentes estudos utilizam técnicas na detecção de defeitos em equipamentos. Em Nikolic et al. (2013), um drone equipado com duas câmeras é utilizado para realizar a reconstrução tridimensional de uma instalação industrial. Em Varadharajan et al. (2014) é utilizado um sistema de processamento de imagem para a detecção de defeitos em ruas asfaltadas baseado em informações de cor e textura. Já em Karakose et al. (2017), é colocada uma câmera na parte superior de um trem, e as imagens obtidas são processadas e verificam a distância entre os trilhos.

Este tipo de atividade requer a verificação de gradientes térmicos, que por não serem visíveis a olho nu, faz necessária a utilização de uma câmera térmica. Neste sentido, este tipo de inspeção pode ser executado de forma manual, na qual o operador manuseia um equipamento com imagens 2D e faz as análises pertinentes. A inovação do sistema apresentado se dá, portanto, na aplicação de um dispositivo embarcado que executa de forma automática a inspeção, realizando a segregação de pontos quentes definida pelo usuário, permitindo maior produtividade na rotina incluindo a disponibilização em pós processamento da reconstrução das imagens em 3D caso julgue necessário.

Pode-se listar alguns estudos que utilizaram imagens térmicas com o objetivo de inspeção de equipamentos. Em Larrauri et al. (2013), foi utilizado um drone para a detecção de pontos com má condutividade e hotspots. Em Taheri-Garavand et al. (2015), imagens térmicas foram utilizadas para classificar, através de redes neurais artificiais, diferentes defeitos em um radiador. Em Chen et al. (2017), foi desenvolvido um método para a integrar as informações da imagem visual e térmica, com o objetivo de inspecionar equipamentos elétricos utilizando robôs.

Este trabalho é organizado em 4 seções além da introdução. A Seção II apresenta um resumo teórico dos tópicos principais do equipamento. A Seção III descreve o sistema e seu funcionamento. Na Seção IV são mostrados os resultados obtidos em campo na fase de validação e finalmente na Seção V são apresentadas as conclusões e recomendações.

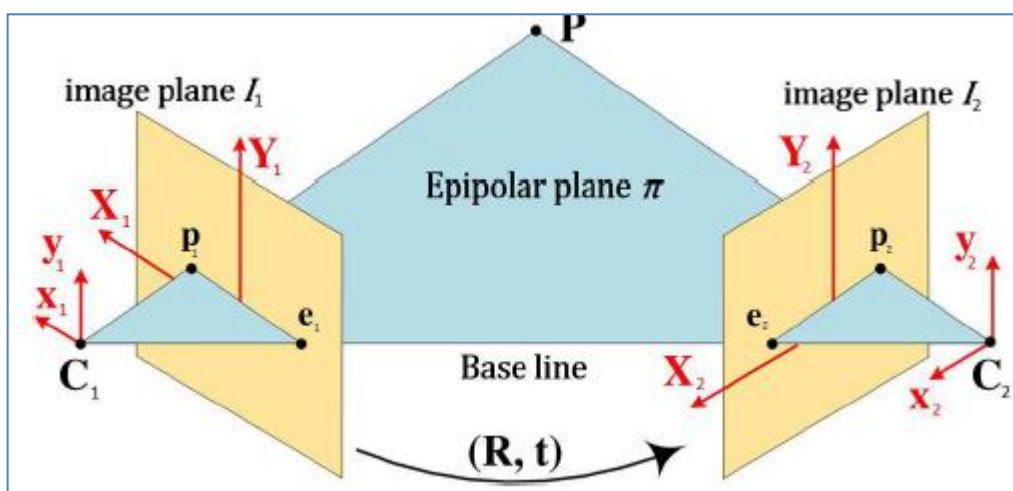
2 – DIAGNÓSTICO

2.1 - RESUMO TEÓRICO

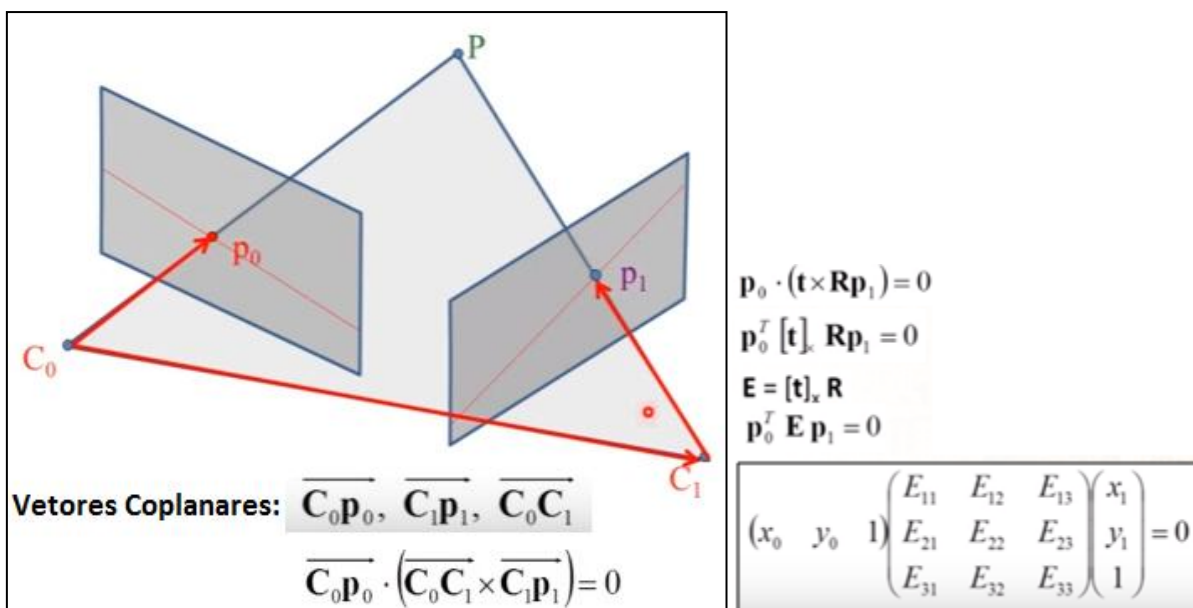
Para possibilitar leitura de imagens visuais e térmicas, sua recomposição posterior e a segregação por temperatura definida pelo operador é necessário conhecer 5 etapas para embasamento teórico conforme listados nos itens dessa seção:

2.1.1 - Calibração das câmeras

Como base fundamental para o entendimento dos tópicos apresentados é necessário o entendimento dos princípios da reconstrução de imagens através da geometria epipolar. A partir de duas imagens de uma mesma cena é possível obter correspondências entre pontos de um mesmo objeto em cada uma das mesmas com diversas técnicas [13]. A câmera, ao adquirir duas imagens de um objeto, está sujeita a um deslocamento (Translação) e uma alteração em seu ângulo de visão (Rotação), logo para conhecermos a relação entre essas imagens no mundo devemos conhecer as matrizes de Translação (t) e Rotação (R), conforme figura abaixo.



Onde C_1 e C_2 são câmeras nos instantes 1 e 2, P o ponto observado, e p_1 e p_2 são as projeções do ponto P no plano de imagem das câmeras 1 e 2, respectivamente. Logo, através do produto vetorial abaixo é possível conhecer a relação entre estes pontos:



Portanto como demonstrado acima, através das matrizes t e R é possível demonstrar a relação dos pontos $p_0=(x_0 \ y_0 \ 1)$ e $p_1=(x_1 \ y_1 \ 1)$. Sendo assim, através do prolongamento dos vetores para P é conhecida a profundidade do ponto observado.

Diante do conceito básico apresentado iniciaremos os passos para que possamos na prática construir uma imagem em 3D através de imagens 2D de câmeras distintas. Iniciaremos com o conceito de calibração conforme segue abaixo.

A calibração de uma câmera consiste em encontrar os parâmetros necessários para o mapeamento preciso de pontos no espaço tridimensional. Existem dois tipos: os parâmetros intrínsecos, que incorporam as características da lente da câmera, e os parâmetros extrínsecos, que incorporam a posição da câmera em relação a uma referência.

Sendo $\mathbf{X} = [X \ Y \ 1]^T$ um ponto no espaço 3D e $\mathbf{x} = [x \ y \ 1]^T$ um ponto no plano imagem, o mapeamento, utilizando o modelo *pinhole*, pode ser escrito pela Equação 1.

$$\alpha \mathbf{x} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}]\mathbf{X} \quad (1)$$

Sendo:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Onde \mathbf{K} é a matriz dos parâmetros intrínsecos da câmera, f_x e f_y correspondem às distâncias focais, x_0 e y_0 representam o ponto principal, s corresponde à inclinação entre os eixos no plano imagem e α é uma escala arbitrária. Portanto, calibrar a câmera é o processo de encontrar os valores de \mathbf{K} e \mathbf{R} , e do vetor \mathbf{t} . Para realizar esse processo é utilizado um tabuleiro de xadrez com tamanho dos quadrados conhecidos.

A calibração da câmera térmica apresenta desafios maiores em relação à câmera visual, pois ao ser apontada para um tabuleiro de xadrez convencional, não obtém imagens com contraste suficiente de temperatura. Hilsenstein (2005) propôs um tabuleiro construído utilizando-se de uma placa de circuito impresso (PCI) constituída de dois materiais

diferentes, conseqüentemente, possuindo emissividades diferentes. Como apresentado em Prakash et al. (2006), utilizou-se de uma lâmpada halógena direcionada ao tabuleiro, de forma a aquecer mais os quadrados pretos do que os brancos. Em Vidas et al. (2012), construiu-se um tabuleiro de papelão com alguns quadrados vazados e foi inserida uma fonte de calor atrás desse tabuleiro. Em Kim et al. (2015), foi construída uma matriz de linhas construídas em uma PCI que podem ser aquecidas para realizar a calibração. Neste trabalho, porém, optou-se por simplicidade pela utilização de uma lâmpada incandescente direcionada a um tabuleiro de xadrez de forma a manter o calor por mais tempo (Figura 1), possibilitando a calibração.



Figura 1 – Dispositivo para calibração térmica

Nas figuras 2 e 3 são mostradas as imagens de calibração obtidas para a câmera visual e térmica, respectivamente.



Figura 2 – Calibração Visual

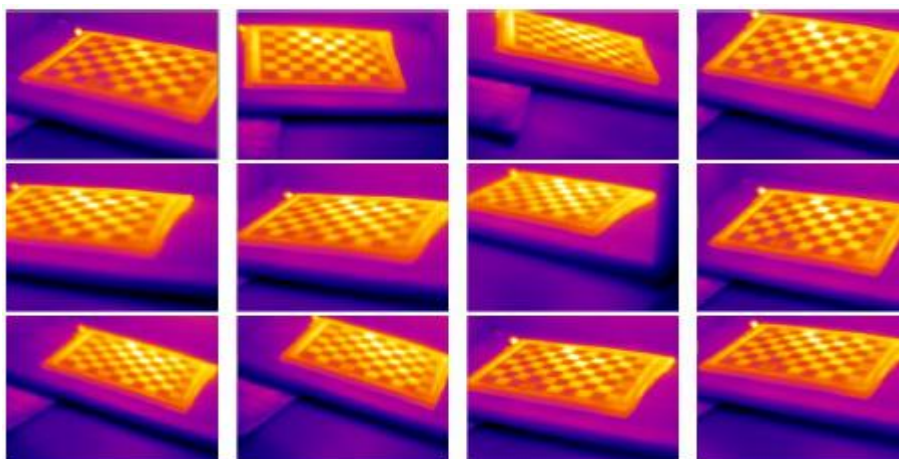


Figura 3 – Calibração Térmica

2.1.2 - Aquisição das imagens

As câmeras utilizadas para aquisição das imagens são os modelos Basler acA1920-40uc (visual) e FLIR A65 (térmica). O software utilizado para realizar a aquisição das imagens foi o LabVIEW. Para a obtenção da sincronia entre as câmeras visuais e térmicas foi implementado um trigger por software de forma a obter uma sincronia entre as imagens capturadas.

2.1.3 - Construção do modelo tridimensional visual

De forma a gerar o modelo tridimensional visual, foi utilizada a técnica *Structure from Motion* (SfM) com auxílio do software VisualSfM (Wu, 2013), que gera a nuvem de pontos esparsa do objeto.

Para gerar a nuvem de pontos densa foi utilizada a ferramenta PMVS/CMVS (Furukawa and Ponce, 2010; Furukawa et al., 2010).

2.1.4 - Posição relativa entre as câmeras

O VisualSFM oferece como saída a nuvem de pontos tridimensionais e a posição relativa da câmera visual para cada imagem obtida. De forma a obter o modelo tridimensional térmico, é necessário calcular as matrizes de posição relativa da câmera térmica em cada instante. Para tal, o seguinte procedimento foi adotado:

- 1) Escolhe-se um par de imagens, visual e térmica, adquiridas simultaneamente;
- 2) Nesse par de imagens, escolhe-se um conjunto de pontos ($n > 4$) na imagem visual que correspondam a pontos da imagem térmica (figura 4);
- 3) Procura-se, na nuvem de pontos, um ponto cujo erro de projeção no ponto escolhido na imagem visual seja o menor possível. Esse ponto tridimensional corresponderá tanto ao ponto da imagem visual quanto ao ponto da imagem térmica.
- 4) Encontra-se a matriz de rotação ($R_{\text{térmica}}$) e o vetor translação ($t_{\text{térmica}}$) através do algoritmo solvePnP (Gao et al., 2003);
- 5) Calcula-se as matrizes de rotação e translação relativa das imagens visual e térmica.



Figura 4 – Pontos correspondentes entre visual e térmica

2.1.5 - Modelo tridimensional térmico

Para gerar o modelo tridimensional térmico é necessário reprojeter todos os pontos da nuvem de pontos visual obtida pelo VisualSFM nas imagens térmicas. Isso é feito através da

Equação 1, a matriz de calibração térmica e o vetor $t_{\text{térmica}}$ são obtidos de acordo com o apresentado nos tópicos anteriores.

Um ponto no espaço pode possuir pontos projetados em diversas imagens térmicas, conseqüentemente pode possuir diferentes valores para a intensidade de temperatura.

Para resolução deste problema, duas alternativas foram analisadas para a decisão de qual valor de intensidade de temperatura será associado ao ponto no espaço:

- 1) Usar a média das intensidades projetadas;
- 2) Usar o valor máximo das intensidades projetadas.

Abaixo (Figura 5) são apresentados os resultados do modelo:

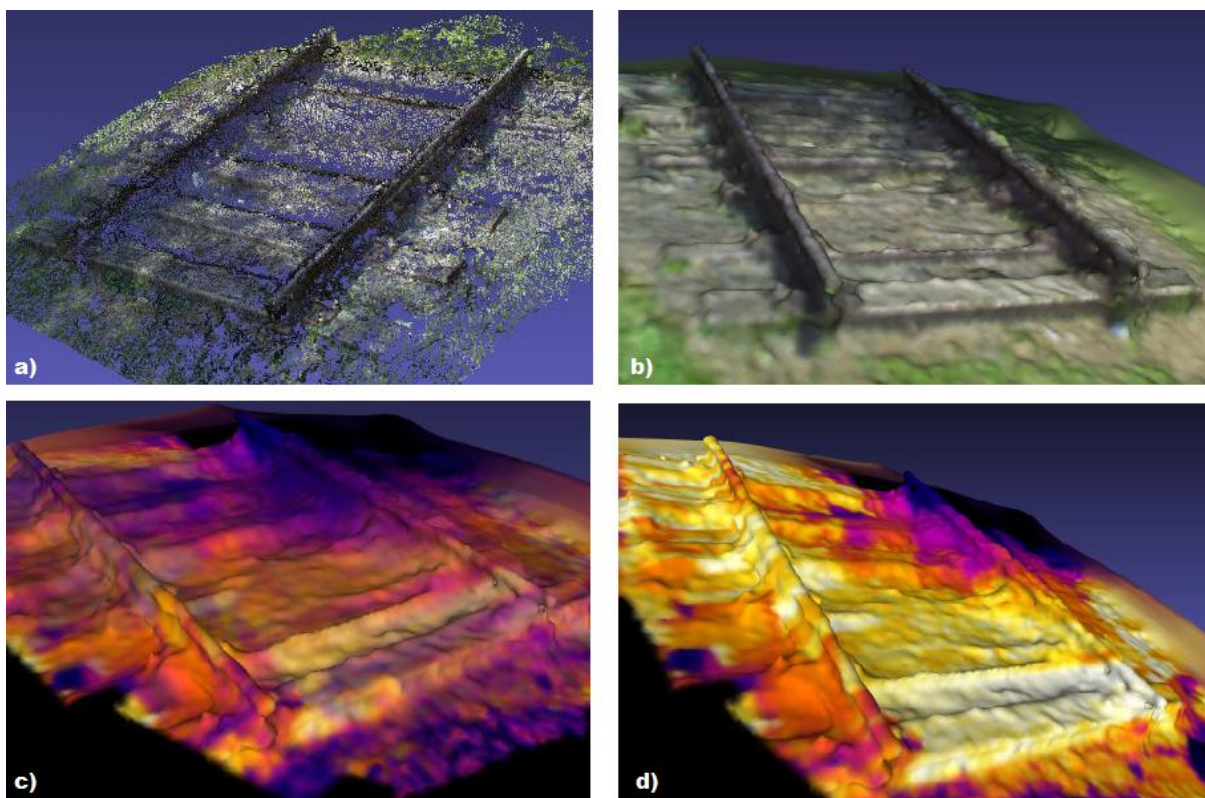


Figura 5 - a) Nuvem de pontos visual obtida no Visual SFM. b) Nuvem de pontos renderizada no MeshLab. c) Nuvem de pontos térmica obtida com valores médios. d) Nuvem de pontos térmica obtida com valores máximos.

2.2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.2.1 – Composição do sistema de câmeras - Robô

A lista resumida de itens do robô, Figura 6, está a seguir:

- Motores AX-18A e MX-64T com adaptador TTL-USB.
- Controladora Pixhawk e módulo GPS.
- Câmeras RGB da fabricante Allied Vision, modelo MAKKO.
- Câmera térmica FLIR da série AX5.
- HUBs USB para comunicação de controle de motores e Ethernet TP-Link para as câmeras.
- Placa de distribuição de potência em 12 Volts para motores e circuito de sincronismo das câmeras.
- Coolers de 12V para refrigeração.

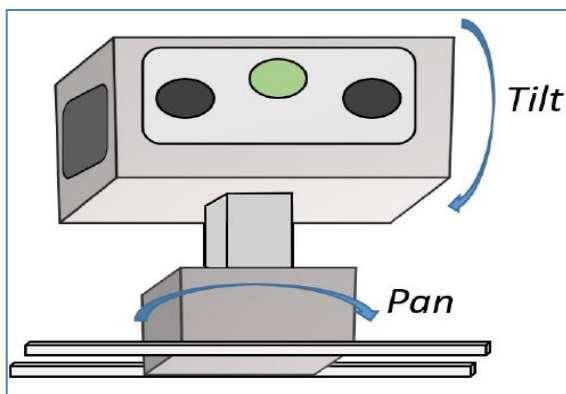


Figura 6 - Robô

A placa controladora com módulo GPS encontra-se à esquerda (Figura 7), e todo o software responsável pela localização e controle de orientação, assim como sensores, são lidos nesse local. As leituras do sensor de GPS são feitas e enviadas ao computador externo em uma taxa de 30 Hertz. Na Figura 7 (centro e direita) é possível ver as câmeras visuais nos extremos e a térmica ao centro. A taxa de captura da câmera visual é de 20 Hertz com

resolução reduzida para 800x600, e para a câmera térmica a resolução em largura e altura é de 640x512, porém o campo de visão corresponde a cerca de um quarto do visto pelas câmeras visuais, localizado ao centro da cena observada. Sua taxa de aquisição gira em torno de 13 Hz.

Na figura 8 é mostrada a instalação do robô no veículo rodoferroviário durante testes em campo.



Figura 7 – Interior do Robô



Figura 8 – Instalação do Robô no veículo rodoferroviário

2.2.2 - Inversores

Dispositivo responsável pela alimentação das câmeras, sistema de alvo - robô (Inversor 1) e computador (Inversor 2) sendo dividido em 2 unidades (figura 9):



Figura 9 – Inversores

2.2.3 - Fonte de Retificadora

A Fonte Retificadora faz a conversão do suprimento de energia de Corrente Alternada para Corrente Contínua para os níveis de 12 V e 48V (Figura 10):

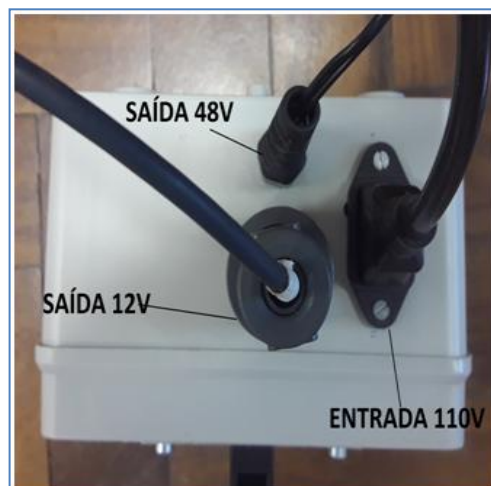


Figura 10 – Fonte Retificadora

2.2.4 - Computador com software embarcado

O computador externo ao qual o robô se conecta executa o sistema operacional Linux na versão 16.04 Xenial Xerus, utiliza sistema ROS Kinetic, recebe um cabo USB e outro Ethernet para dados em geral.



Figura 11 – PC AlienWare para operação do sistema

2.2.5 - Cabos para conexões

Os cabos mostrados na figura 12 são responsáveis pelas comunicações e alimentação dos dispositivos (figura 13), a blindagem foi feita para evitar problemas de interferência eletromagnética, detectados após testes em campo provenientes de antenas de rádio dos veículos rodoferroviários.



Figura 12 – Cabos blindados para interconexões

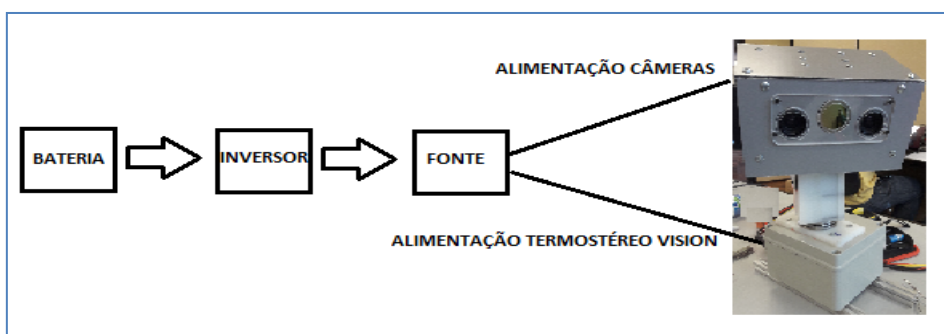


Figura 13 – Sistemas a serem conectados

2.3 – Funcionamento

2.3.1 – Operações no software

O sistema tem a opção de controle do conjunto de câmeras de formas manual ou automática (Figura 14). Quando em manual, o operador assume o comando e a gravação é feita do ponto ou trecho que ele desejar. Se alterado para automático, o conjunto de câmeras obedecerão uma missão previamente definida e carregada no *software*, acompanhando o ponto de acordo com o raio definido de alcance.

Durante a inspeção existe o erro das coordenadas de GPS medidas para o ponto alvo e pelo veículo em movimento, devido a imprecisões dos aparelhos de medição, o que faria o conjunto de câmeras não centralizar o alvo. Porém, sendo a área de visualização definida com um raio no qual possa visualizar o entorno do possível alvo, a inspeção terá sucesso, pois o equipamento aparecerá na imagem mesmo não estando centralizado (Figura 15). Caso o raio seja inferior à distância do dispositivo a ser inspecionado, as câmeras não efetuarão a inspeção, do contrário, estas acompanharão o dispositivo enquanto a sua distância em relação ao mesmo permanecer menor ou igual ao raio definido. Cada ponto definido em missão poderá ser configurado separadamente, com raios e alturas em relação ao solo (Figura 16).

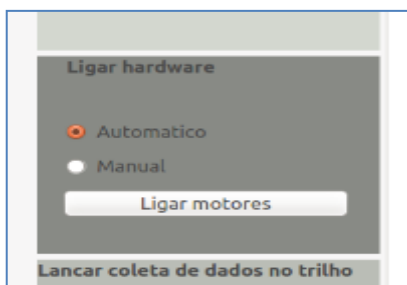


Figura 14 – Configuração Automático/Manual

Para elaboração da missão, os pontos de interesse (pontos a serem inspecionados) deverão ser aquisitados em campo, normalmente através de aplicativos de celulares, e posteriormente baixados no formato “.kml” para o *software* do Termovisor.

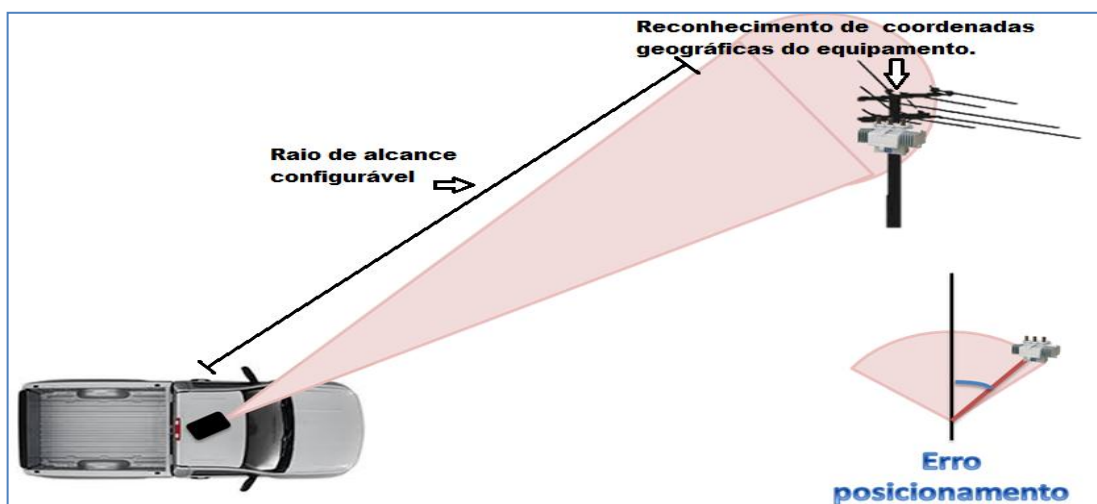


Figura 15 – Raio de alcance – erro de posicionamento



Figura 16 – Missão e configuração dos pontos

Para que os ativos inspecionados possam ser separados em casos de temperatura acima do normal, a qual deverá ser definida pelo operador (Figura 17) para que na missão automática o Termovisor possa encaminhar a gravação a uma pasta com denominação “Quente”, onde

o arquivo separado é gravado com o as coordenadas geográficas no título, para facilitar a identificação após a inspeção.

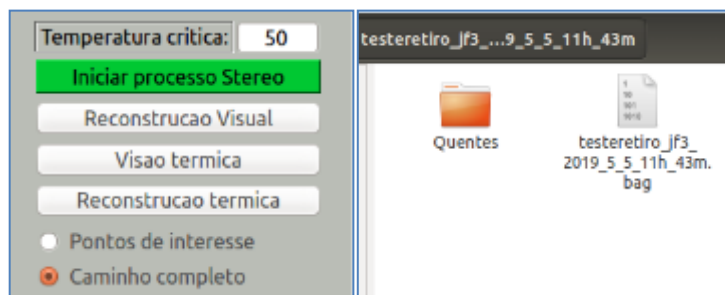


Figura 17 – Seleção da temperatura de inspeção e separação em pasta de ativos com temperatura acima da selecionada.

O sistema permite a visualização instantânea das imagens em 3D, tanto visual quanto térmica. A imagem térmica instantânea também poderá ser visualizada em 2D com a escala de temperaturas para acompanhamento do operador, como mostra a Figura 18a, mas não interfere na atuação do sistema. O mesmo é aplicável no caso da imagem visual, vide Figura 18b.

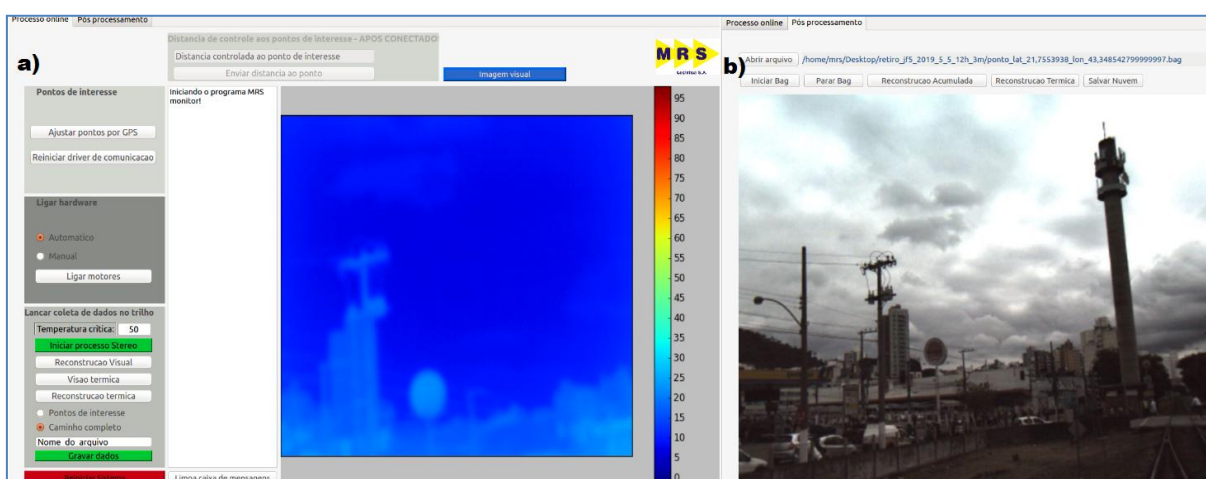


Figura 18 – Visualizações 2D – Térmica e Visual

Durante a missão, ou no pós-processamento, é possível fazer a visualização da nuvem de pontos instantânea gerada na inspeção, como mostrado na Figura 19.

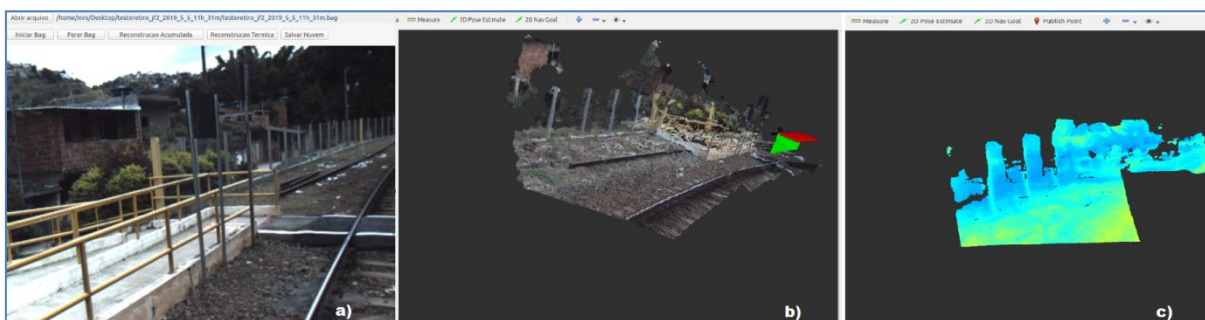


Figura 19 – a) Imagem original b) Nuvem Visual c) Nuvem Térmica

2.3.2 – Pós-processamento

O sistema realiza o pós-processamento das imagens adquiridas caso o operador queira visualizar detalhes das imagens separadas. O pós-processamento é feito na aba indicada (Figura 20a), na qual os arquivos poderão ser abertos e a nuvem de pontos recuperada (visual e térmica). No Meshlab é possível abri-las com uso de filtros e efetuar medidas caso necessário (Figura 20b e 20c).

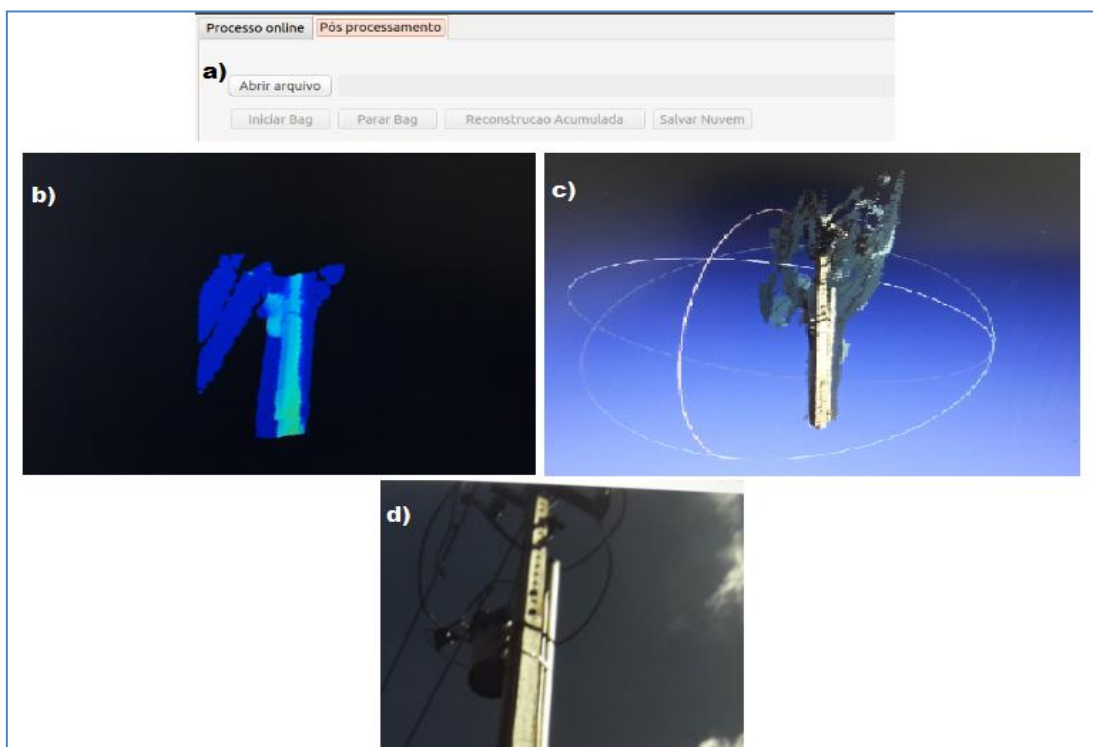


Figura 20 – a) Aba Pós processamento b) Reconstrução Térmica c) Reconstrução Visual d) Imagem Original

A Figura 21 mostra um resumo do funcionamento dos algoritmos de processamento *online* e *offline*:

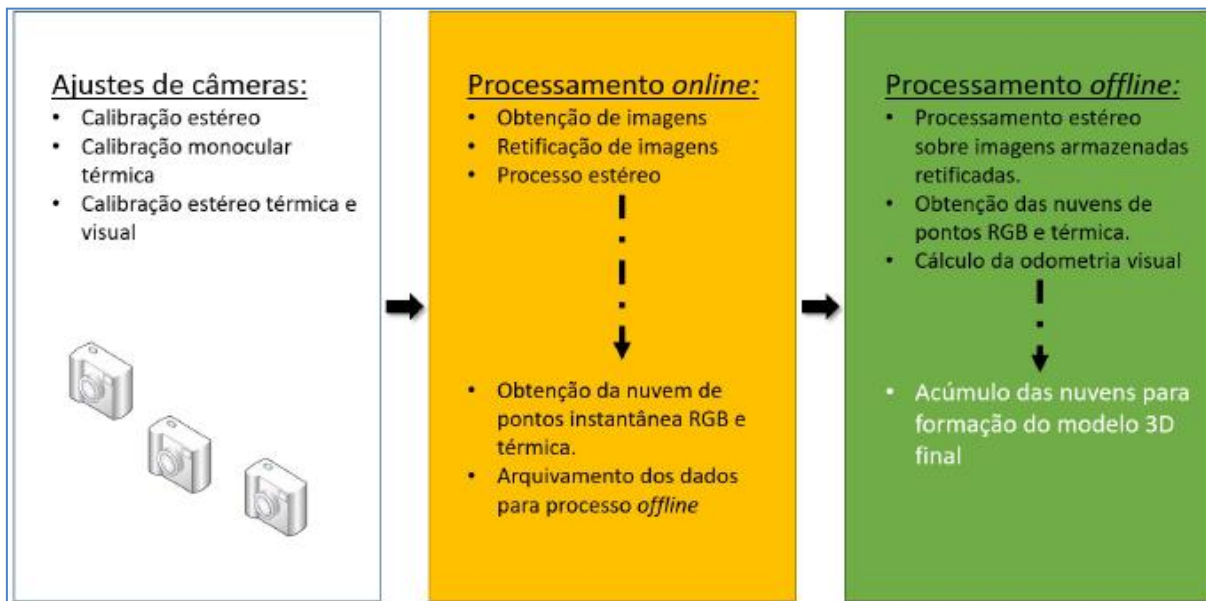


Figura 21 – Resumo do algoritmo de processamento

3 - RESULTADOS

Os testes em campo iniciaram no início de outubro de 2017 até meados de 2019. Neste período muitos ajustes e melhorias foram efetuados tanto do *software* quanto no *hardware*, por exemplo, a adequação de motores, alterações na case das câmeras (diminuição de peso), blindagem nos cabos que sofreram interferência eletromagnética das antenas dos veículos rodoferroviários, alterações nas rotinas de processamento, etc. Durante este período foi constatada a aplicação dentro do esperado, o equipamento será incluído no plano de manutenção e conduzido para inspeções na rede da cremaleira, possibilitando a introdução de inspeções automáticas e apresentando ganhos consideráveis, pois em apenas uma viagem os pontos podem ser identificados e registrados para análises refinadas, incrementando a produtividade na manutenção e evitando gastos de horas com contratações específicas para esta inspeção.

4 - CONCLUSÕES

O artigo procurou dar ênfase aos aspectos práticos de aplicação do equipamento, fazendo algumas referências teóricas para embasamento, por se tratar de inovação. Melhorias e adequações irão surgir à medida que necessidades e utilizações constantes em campo acontecerem. De forma geral, a automação de um processo onde antes era necessária a contratação de mão de obra específica, com viagens longas e demoradas para análise de ativos, abriu caminho para a praticidade da automação embarcada, contribuindo para ganhos internos financeiros e tempo de execução. Novas possibilidades de aplicações estão sendo estudadas à medida que esta solução é apresentada a outras áreas internas da empresa, que vislumbram outras maneiras de utilização térmica ou mesmo de análise de imagens visual, reconstrução em ambiente 3D e exportação para AutoCad, com a finalidade de geração de projetos e/ou medidas reais após a aquisição de imagens em campo.

É imperioso afirmar que a partir das validações em campo provavelmente ainda ocorrerão ideias para este e novos equipamentos, a serem desenvolvidos com aplicação de tecnologias 4G, sendo portanto um caminho sem volta para empresas que querem alcançar a precisão técnica, seja ela em análise de diagnósticos, banco de dados ou novas maneiras de pensamentos e aplicações nesses novos tempos.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Nikolic, J., Burri, M., Rehder, J., Leutenegger, S., Huerzeler, C. and Siegwart, R. (2013). A uav system for inspection of industrial facilities, Aerospace Conference, 2013 IEEE, IEEE, pp. 1-8.
- [2] Varadharajan, S., Jose, S., Sharma, K., Wander, L. and Mertz, C. (2014). Vision for road inspection, Applications of Computer Vision (WACV), 2014 IEEE Winter Conference on, IEEE, pp. 115-122.
- [3] Karakose, M., Yaman, O., Baygin, M., Murat, K. and Akin, E. (2017). A new computer vision based method for rail track detection and fault diagnosis in railways, International

Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research 6(1): 22-17.

[4] Larrauri, J. I., Sorrosal, G. and Gonz_alez, M. (2013). Automatic system for overhead power line inspection using an unmanned aerial vehicle | relifo project, Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on, IEEE, pp. 244-252.

[5] Taheri-Garavand, A., Ahmadi, H., Omid, M., Mohtasebi, S. S., Mollazade, K., Smith, A. J. R. and Carlomagno, G. M. (2015). An intelligent approach for cooling radiator fault diagnosis based on infrared thermal image processing technique, Applied Thermal Engineering 87: 434-443.

[6] Chen, Y., Dai, J., Mao, X., Liu, Y. and Jiang, X. (2017). Image registration between visible and infrared images for electrical equipment inspection robots based on quadrilateral features, 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), pp. 126-130.

[7] Hilsenstein, V. (2005). Surface reconstruction of water waves using thermographic stereo imaging, Image and Vision Computing New Zealand, Vol. 2.

[8] Prakash, S., Lee, P. Y., Caelli, T. and Raupach, T. (2006). Robust thermal camera calibration and 3d mapping of object surface temperatures, SPIE Proceedings: ThermoSense XXVIII 6205: 62050J.

[9] Vidas, S., Lakemond, R., Denman, S., Fookes, C., Sridharan, S. and Wark, T. (2012). A maskbased approach for the geometric calibration of thermal-infrared cameras, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 61(6): 1625-1635.

[10] Kim, N., Choi, Y., Hwang, S., Park, K., Yoon, J. S. and Kweon, I. S. (2015). Geometrical calibration of multispectral calibration, Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2015 12th International Conference on, IEEE, pp. 384-385.

[11] Gao, X.-S., Hou, X.-R., Tang, J. and Cheng, H.-F. (2003). Complete solution classi_cation for the perspective-three-point problem, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 25(8): 930-943.

[12] Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M. and Szeliski, R. (2010). Towards internet-scale multiview stereo, CVPR.

[13] Xinghua Chai, Fuqiang Zhou, and Xin Chen. Epipolar constraint of single-camera mirror binocular stereo vision systems. Optical Engineering, 56(8):084103, 2017.