

Software Radiométrica: Automação e Verificação da Caracterização Radiométrica de Câmeras Termiais

Rafael Vicente Freires dos Santos^{1*}, Thamís da Silva Salles², Prof. Dr. Ruy Morgado de Castro^{1,3}, Prof. Dr. Alvaro José Damião^{1,3}

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Comando de Preparo (COMPREP), Brasília/DF – Brasil

³Instituto de Estudos Avançados (IEAv/FAB), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo — Este artigo trata sobre o desenvolvimento e a verificação do software Radiométrica, criado para padronizar a caracterização radiométrica a partir das imagens de câmeras termiais. Na verificação empregou-se 447 imagens sintéticas, em nove casos e 83 comparações, contra os valores injetados. Não houve discrepância. Também foram processadas 240 imagens TIFF, 16 bits, de um corpo negro CI Systems SR800-12D, feitas com a câmera Workswell WIRIS Pro, de 20 °C a 80 °C, e reprocessado um conjunto de dados obtidos com a câmera multiespectral Parrot Sequoia, verificando a equivalência dos algoritmos de regressão e de faixa espectral. Verificou-se que o produto radiométrico da WIRIS Pro é feito numa grade de 0,444 °C e a curva obtida, $DN = 41,4380 \cdot T + 4025,60$, corresponde a uma diferença de escala de +3,6 % e viés de +0,64 °C.

Palavras-Chave — radiometria, software, microbolômetro.

I. INTRODUÇÃO

Os microbolômetros não resfriados de óxido de vanádio se consolidaram efetivos em plataformas de imageamento termal devido ao seu custo reduzido, pequeno tamanho e por dispensar a criogenia. Assim, são normalmente empregados em sensoriamento remoto embarcado, inspeção de estruturas e em avaliação energética [1][4]. Medições radiométricas confiáveis precisam de uma caracterização também confiável do sistema de medição, com dados como função de transferência de sinal, não-uniformidade espacial, ruído temporal, estabilidade térmica e detecção de pixels defeituosos [2]. Já existem bancadas comerciais automatizadas para o cumprimento dessa necessidade e a literatura consolida os procedimentos a serem realizados para essa caracterização [6][7]. Contudo, o custo dessas bancadas para projetos internos da FAB, muitas vezes sem verba suficiente para a aquisição dessas bancadas, motiva o desenvolvimento de uma ferramenta própria dessa instituição para o uso em laboratórios que já dispõem das fontes de referência. A contribuição está na redução do custo, possibilidade de adaptação às condições e aos equipamentos locais, integração com os dados necessários e na auditabilidade de cada cálculo.

Assim, este artigo descreve o desenvolvimento do software Radiométrica, uma aplicação desktop que visa automatizar e padronizar a caracterização radiométrica no espectro termal. Esse software foi desenvolvido em Python 3.10+, com interface Tkinter e arquitetura Model-View-Controller (MVC). A ferramenta opera sobre arquivos de imagem como JPG, PNG, TIF e TIFF.

A verificação de funcionamento foi realizada com arquivos TIFF de 16 bits da câmera Workswell WIRIS Pro e integra, sequencialmente, as etapas da caracterização, partindo da importação e finalizando com a criação de um relatório em PDF, onde consta um registro auditável das etapas realizadas. Contudo é válido informar o sistema de imageamento que foi verificado, sendo ele o sistema de medição completo que conta com uma objetiva de 13 mm, o sistema detector, a parte eletrônica de leitura, a conversão analógico-digital, o firmware, as correções internas e demais processos que entregam o arquivo TIFF como produto. Não se pode atribuir os resultados obtidos aqui isoladamente ao microbolômetro e as conclusões obtidas são restritas à câmera e na configuração do ensaio realizado.

É possível separar três etapas desse trabalho. Primeiramente, a verificação do programa empregou imagens sintéticas, de composição de dados conhecidos. Nessa etapa foi possível confrontar o resultado obtido no software com os valores verdadeiros inseridos nas imagens. A segunda etapa foi a verificação da conversão radiométrica entregue pela câmera, que foi obtida comparando o produto com a referência de um corpo negro de área estendida calibrado da CI Systems, modelo SR800-12D, em laboratório. Por fim, o terceiro passo foi o reprocessamento de um conjunto de dados independente, obtido no trabalho de Salles (2026) [3], com a câmera multiespectral Parrot Sequoia. Foram confrontados os parâmetros extraídos pelo software com os dados adquiridos no trabalho citado como forma de testar o software diante de uma implementação distinta e como forma de demonstrar a aplicabilidade do programa a um outro sensor de faixa espectral distinta. Os resultados integram as entregas técnicas incorporadas ao Projeto PITER do Instituto de Estudos Avançados (IEAv/FAB).

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Os Dados e o Modelo de Codificação

A estrutura dos dados de saída de uma câmera termal pode admitir dois modelos e a escolha depende do tipo de dado que o arquivo resultante do sistema armazena. Num sistema cuja leitura do detector é entregue sem processamento, o valor digital (DN, do inglês digital number) corresponde à radiação recebida, integrada na banda espectral e ponderada pela responsividade, onde a relação entre valor digital e temperatura obedece a Lei de Planck. O arquivo TIFF radiométrico da WIRIS Pro não é desse tipo. O próprio manual do fabricante especifica que cada pixel representa uma equivalência na temperatura medida, que pode ser recuperável pela função $T = DN/40 - 100$ [1]. O arquivo da Wiris contém a temperatura em ponto fixo, já submetida às correções internas da câmera, com possibilidade de correções de não

uniformidade, NUC/FFC, aplicadas antes da gravação. O modelo adequado ao dado corresponde à função linear da equação (1) que segue.

$$DN = G \cdot T + O \quad (1)$$

Nessa equação, G é o ganho de codificação, com valor 40 DN/°C, e O é o deslocamento de origem (*offset*), de 4000 DN.

A regressão linear para obter uma reta de DN por temperatura de uma fonte de referência não mostra a linearidade física do microbolômetro, pois a linearização já foi executada pela câmera, e um valor de R² alto só confirma que o arquivo segue a codificação declarada e não que esta é uma propriedade específica do detector. Além disso, o conteúdo metrológico está nos desvios em relação aos valores nominais que quantificam a concordância entre o produto entregue pelo sistema e uma referência rastreável. Assim, pelo mesmo motivo, 1/G não mede sensibilidade, mas o passo de quantização do formato do produto do sistema.

$$DN = A \cdot L(T) + B \quad (2)$$

A equação (2) mostra a hipótese na qual o valor gravado responderia à radiação de banda L(T), obtida por integração da Lei de Planck na faixa entre 7,5 e 13,5 µm. As formulações são mutuamente exclusivas e distinguíveis experimentalmente, pois, diante do modelo de radiação a responsividade $\frac{dDN}{dT}$ cresceria de modo apreciável ao longo da faixa ensaiada, ao passo em que o modelo de codificação prevê uma inclinação constante. O software ajusta ambos aos mesmos pontos obtidos e compara o desvio, permitindo ao operador decidir qual método descreve melhor o dado.

B. Grandezas Medidas e suas Limitações

A dispersão espacial da resposta a uma fonte uniforme é normalmente expressa pela razão entre o desvio padrão espacial e a média dos valores digitais na região de interesse, conforme a equação (3) abaixo.

$$NU\% = (\sigma_{NUC} / \mu) \times 100 \quad (3)$$

Nessa equação, σ é o desvio padrão espacial do valor digital na ROI (região de interesse) e μ é a média. Essa métrica depende do offset embutido na codificação, pois, como a média incorpora o termo constante O, o mesmo padrão físico de não-uniformidade produz percentuais diferentes conforme a temperatura da cena. Por isso, adota-se a dispersão expressa em temperatura, σ/G , que é invariante em relação a esse deslocamento. A métrica percentual é reportada apenas por causa da compatibilidade com a forma usualmente encontrada na literatura. A demonstração quantitativa dessa dependência está descrita na Seção IV. É possível afirmar ainda que a dispersão de um único quadro reúne o padrão fixo e o ruído temporal do pixel, conforme a equação (4) abaixo, de modo que separá-los exige ao menos dois quadros [2][8].

$$\sigma_{1quadro} = \sqrt{(FPN^2 + \sigma_{temporal}^2)} \quad (4)$$

A estabilidade temporal é descrita pela dispersão da média da ROI ao longo de uma sequência de quadros e pela taxa de variação, obtida pela regressão sobre essa mesma série. Essa estabilidade temporal é diferente do ruído equivalente em temperatura (NETD), que se refere ao desvio temporal de cada pixel, onde a média espacial atenua o ruído independente pela raiz do número de pixels, de modo que os dois valores diferem por ordens de grandeza [7]. Adicionalmente, a histerese seria avaliada pela diferença entre o mesmo ponto adquirido durante o aquecimento e adquirido durante o resfriamento. Contudo,

essa diferença só pode ser atribuída à histerese se o instrumento estiver em regime permanente nas duas aquisições.

C. Fontes de Incerteza

A principal fonte de incerteza não coberta por uma calibração estática é a variação da temperatura interna da câmera ao longo do tempo. Patel (2023) [4] demonstrou que ela não cessa mesmo após o período de aclimatização recomendado pelo fabricante e que imagens adquiridas no início de uma sessão apresentam erros sistematicamente maiores. Krupiński et al. [9] mediram, num arranjo microbolométrico, a influência da temperatura do detector sobre os próprios coeficientes de ganho e de offset e propuseram a compensação explícita dessa dependência, cuja variação é quantificada na Seção IV deste artigo.

Para distâncias inferiores a 10 m a transmitância atmosférica satisfaz $\tau_{atm} > 0,99$ [4], tornando a correção atmosférica passível de ser desconsiderada nos ensaios de bancada em laboratório. A incerteza declarada do corpo negro de referência ($\pm 0,5$ °C) é a principal contribuição externa e a estabilização térmica do instrumento é a principal contribuição interna. No escopo deste trabalho não foram realizados estudos completos da incerteza e, assim, as limitações decorrentes disso foram declaradas na Seção IV.C.

III. MATERIAL E MÉTODOS

A. Câmera WIRIS Pro

A câmera Workswell WIRIS Pro é um sistema termovisual baseado em microbolômetro VOx (óxido de vanádio), não resfriado, 640 × 512 pixels, pitch de 17 µm, banda de 7,5 a 13,5 µm, lente objetiva de 13 mm, NETD nominal de 50 mK e exatidão declarada de ± 2 °C ou ± 2 % da leitura, prevalecendo o maior valor [1]. Nesse artigo, foi utilizado o formato TIFF de 16 bits, que contém o produto radiométrico com a temperatura codificada por $T = DN/40 - 100$.

B. Software Radiométrica: Arquitetura e Funcionalidades

O software foi desenvolvido em Python 3.10+ com framework Tkinter e arquitetura MVC. O módulo central (*AppState*) gerencia o fluxo de dados entre as 10 abas, cujas responsabilidades e saídas estão detalhadas na Tabela I.

Os cálculos foram concentrados no módulo “*calculos.py*” como funções puras e separadas da interface para garantir uma auditabilidade independente.

TABELA I. ABAS FUNCIONAIS DO SOFTWARE RADIOMÉTRICA

Aba	Função	Saída / Parâmetros
1	Importação de TIFF	Importação de imagens, datasets e metadados de arquivo.
2	Seleção de ROI	Seleção de coordenadas (x, y, largura, altura) da região de interesse.
3	Estatística Básica	μ , σ , mediana, NU% por dataset.
4	Estabilidade Temporal	σ_t bruto e destendenciado, deriva por OLS.
5	Uniformidade Espacial	Mapa 2D dos DN, NU% global.
6	Visualização 3D	Superfície DN (x,y) interativa.
7	Resposta × Temperatura	Ganho G, Offset O, R ² .
8	Análises Radiométricas	Erro vs. referência, resíduo do ajuste, histerese.
9	Relatório PDF	Documento consolidado rastreável
10	Auditoria	Log cronológico de operações

A detecção de saturação identifica o acúmulo de pixels no valor extremo do histograma e é um critério independente da faixa configurada. Nessa detecção, ao se utilizar um limiar fixo referido ao contêiner de 16 bits, corresponderia a 1456 °C, acima do teto de qualquer faixa disponível. A identificação de pixels defeituosos aplica desvio absoluto mediano sobre o resíduo de uma superfície de segunda ordem ajustada particularmente à ROI determinada, de modo que a cena não mascare o defeito. Além disso, exige persistência ao longo da sequência. É válido informar que os pixels identificados são sinalizados e registrados, sem substituição ou interpolação, de modo que os valores analisados permanecem os entregues pela câmera. O relatório em PDF junta os parâmetros com a identificação do dataset, coordenadas da ROI, condições ambientais e marcação temporal.

C. Verificação com Dados Sintéticos

Num ensaio, o valor verdadeiro depende de uma série de fatores e verificar um programa de medição exige confrontar seus resultados com valores conhecidos. Para isso, então, foi confeccionado um conjunto de imagens sintéticas onde toda grandeza medida pelo programa já é conhecida devido aos próprios dados de construção das imagens sintéticas.

A geração das imagens foi feita em sete camadas. A cena foi definida em temperatura e sobre ela incidem, também em temperatura, o erro de ganho e offset, pixel a pixel, a deriva do instrumento e as sete componentes do modelo tridimensional de ruído, sendo elas fixas por pixel, linha e coluna e temporais por quadro, linha, coluna e pixel. Somente após isso, o resultado é codificado pela fórmula $DN = G \cdot T + O$, quantizado em inteiros e cortado nos limites da faixa de medição.

Os pixels defeituosos são injetados em posições conhecidas. Toda a aleatoriedade provém de um gerador com semente declarada, onde a reexecução, com os mesmos parâmetros, reproduz os mesmos arquivos byte a byte.

Foram gerados nove datasets de imagens sintéticas, totalizando 447 imagens, de 640×512 px, cada um para uma verificação, sendo elas a recuperação de ganho e offset, a discriminação entre os modelos de codificação e de radiância, o ruído temporal, a deriva e o NETD, a estabilização exponencial, a uniformidade espacial e a distinção entre ruído fixo e temporal, a dependência da não-uniformidade em relação à cena, a sensibilidade e detecção de pixels defeituosos, o ceifamento nos limites da faixa e a indexação da região de interesse. Com isso, foram realizadas 83 comparações e todas foram aprovadas. A Tabela II resume os casos que possuem maior relevância.

TABELA II. VERIFICAÇÃO POR DADOS SINTÉTICOS — VALORES INJETADOS E RECUPERADOS

Caso	Grandeza verificada	Injetado	Recuperado
E1b	Ganho de codificação G	40,280 DN/°C	40,272
E1b	Offset O	4021,0 DN	4021,3
E2	Modelo gerador identificado	linear / Planck	correto nos dois
E3a	NETD (ruído por pixel)	200 mK	199,2 mK
E3c	Deriva	0,4000 DN/quadro	0,4005
E4	Constante de estabilização τ	20,0 s	20,5 s
E5a	Ruído fixo (FPN)	0,300 °C	0,300 °C
E5a	Ruído temporal	0,050 °C	0,050 °C

E6	Dispersão espacial em °C	0,3025 °C	0,3025 nas 3 cenas
E7d	Pixels quentes sob gradiente	10	10
E8a	Saturação no teto da faixa	sim	detectado
E9	Média da ROI (indexação)	6400,000 DN	6400,000

A verificação demonstra que o cálculo reproduz os valores que foram previamente injetados.

D. Aplicação com o Corpo Negro da CI Systems

Foi realizado um ensaio laboratorial, onde a fonte de referência foi um corpo negro de área estendida CI Systems, SR800-12D, que possui uma incerteza de temperatura de $\pm 0,5$ °C. A emissividade nominal dele situa-se entre 0,97 e 0,99 conforme a configuração. É válido salientar que o certificado correspondente a este corpo negro não estava disponível à época da redação, e a implicação é discutida na Seção IV.C.

A câmera Wiris, com objetiva de 13 mm, foi posicionada a cerca de 20 cm da superfície emissora, com o campo de visão preenchido pela área de emissão (Fig. 1). O laboratório teve temperatura e umidade relativa monitoradas por termohigrômetro DeltaOhm HD21AB17.



Fig. 1. Montagem do ensaio: câmera WIRIS Pro a cerca de 20 cm da abertura do corpo negro CI Systems SR800-12D.

O protocolo cobriu de 20 °C a 80 °C em degraus de 10 °C, com estabilização de 5 min em cada ponto. O processo seguiu, inicialmente, um aquecimento de 20 a 80 °C, depois um resfriamento para 40 °C com nova aquisição (dataset 40CR) para tentar realizar uma análise de histerese, e, por fim, foi realizado um resfriamento de 40 a 20 °C. Em cada temperatura foram feitas 30 imagens consecutivas, com intervalo médio de 5,70 s, de modo que cada aquisição se estendeu por cerca de 171 s, gerando um total de 8 datasets e 240 imagens. A região de interesse foi determinada como o quadro completo, já que a superfície emissora preencheu totalmente o campo de visão da câmera.

E. Processamento de um Conjunto de Dados Independente

Os dados independentes vêm da dissertação de Salles (2026) [3], que foram adquiridos com uma câmera multiespectral Parrot Sequoia e uma esfera integradora de quatro lâmpadas independentes, em seis configurações de

irradiância. A radiância na banda NIR (770 – 810 nm) foi obtida com espectroradiômetro FieldSpec™. Os mesmos arquivos foram inseridos e processados novamente com o software Radiométrica e os resultados foram comparados com aquele trabalho. É válido salientar que, como a Sequoia opera no visível/NIR e a WIRIS Pro no LWIR, essa verificação não comparou grandezas físicas, mas sim, verificou a equivalência dos algoritmos de regressão com um sensor diferente e numa faixa espectral distinta.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Passo Efetivo do Produto Radiométrico

O arquivo no formato TIFF de 16 bits comporta 65.536 níveis, e a relação $T = DN/40 - 100$ corresponde a um passo de 0,025 °C. Contudo, foi observado que o dado entregue não ocupa esse mesmo passo. Foi verificado que existem apenas 25 valores distintos de DN, espaçados em cerca de 17,8 DN. Com isso, observou-se um passo de 0,444 °C. Nas 240 imagens, de 20 °C a 80 °C nenhum bit acima do bit 12 foi utilizado.

A matriz dos DNs é uniforme em temperatura, não em radiância, a resolução efetivamente entregue, que não pode ser considerada como sensibilidade, é 0,444 °C, correspondente ao passo do sistema e não o passo do formato 16 bits, e o NETD nominal de 50 mK corresponde a 0,11 passo da grade.

B. Curva de Resposta e Erro de Escala

O software conseguiu processar sem falhas os 8 datasets da primeira aplicação e os 7 da segunda, sem saturação silenciosa, erro numérico ou falha de execução. Os parâmetros radiométricos estão consolidados na Tabela III. A curva de calibração ajustada sobre os oito pontos de temperatura, apresentada na Fig. 2 junto aos resíduos, foi dada pela equação (5) que está a seguir.

$$DN = 41,4380 \cdot T + 4025,60 \tag{5}$$

Nessa equação, o R^2 é igual a 0,9990 (Fig. 2). Conforme a Seção II, esse coeficiente confirma que o arquivo segue a codificação declarada e não que esse dado constitui a evidência de linearidade do microbolômetro. O resultado metrológico útil está nos desvios de escala obtidos, $G/40 - 1 = +3,6 \%$, e viés $(O - 4000)/40 = +0,64 \%$.

Ao se aplicar a fórmula de transformação declarada, $T = DN/40 - 100$, a temperatura aparente entregue pela câmera supera a do corpo negro nos oito pontos, com $|\Delta T|$ médio de 2,39 °C, atingindo um máximo de 4,51 °C em 80 °C e RMS de 2,56 °C, acima do limite declarado de $\pm 2 \text{ °C}$ ou $\pm 2 \%$ da leitura. É válido salientar que 80 °C é o limite superior declarado de operação do Corpo Negro utilizado e que as condições declaradas em manual não são idênticas às condições laboratoriais. Tal divergência serve para dar importância à necessidade da caracterização ajustada para as condições nas quais o sistema imageador será empregado. O desvio residual do ajuste é de 0,60 °C RMS. A outra hipótese, de utilização da radiância como base, resulta em um $R^2 = 0,9950$, que é inferior ao do modelo de codificação pela temperatura, sustentando, assim, a escolha realizada na Seção II.

Contudo, essa definição depende da quantidade de imagens promediadas. Ao se utilizar uma única imagem, o desvio residual sobe de 28,7 DNs para 52,0 DNs e a preferência entre os modelos se inverte. Assim, percebeu-se que o teste só é conclusivo sobre a média da sequência. Isso

traz luz, também, sobre a necessidade de avaliar a consequência da promediação das imagens, que está fora do escopo deste artigo.

Outro fator importante, advém da análise do ponto relativo a 40 °C. Esse ponto foi adquirido duas vezes, uma após o aquecimento e outra após o resfriamento, com a intenção de avaliar histerese. Contudo, a diferença observada, e que seria comparada à histerese, depende da quantidade de imagens amostradas. Ao se utilizar somente a primeira imagem de cada dataset, observou-se uma diferença de 28 DN, ou 0,70 °C. Já ao se realizar a análise sobre as 30 imagens de cada dataset, observou-se uma diferença de 1,5 DN, ou 0,04 °C. Como o transiente térmico não se extingue dentro dos 171 s de cada aquisição, nenhuma das estimativas corresponde ao regime permanente. É válido salientar que um único par de pontos não consegue separar a histerese da deriva.

A deriva observada dentro das aquisições indica que o estado térmico do instrumento domina o erro, dependência essa já documentada em arranjos microbolométricos [9] e consistente com Patel (2023) [4].

TABELA III. PARÂMETROS RADIOMÉTRICOS — WIRIS PRO × CI SYSTEMS SR800-12D

Parâmetro	Valor obtido	Referência / Critério
Faixa de temperatura	20 – 80 °C (8 datasets)	—
Ganho G	41,4380 ± 0,53 DN/°C	Regressão OLS, média da sequência.
Offset O	4025,60 ± 27,9 DN	Regressão OLS, média da sequência.
R ² (calibração global)	0,9990	Planck: 0,9950
1/G (inverso do ganho)	0,0241 °C/DN	Passo de quantização, não sensibilidade.
\Delta T vs. referência, médio	2,39 °C	±2 °C ou ±2 % (fabricante).
\Delta T vs. referência, máximo	4,51 °C (em 80 °C)	difere do manual.
RMS \Delta T vs. referência	2,56 °C	Resíduo do ajuste: 0,60 °C
Estabilidade \sigma_t (máx.)	1,72 °C	0,65 a 1,49 °C sem a deriva
Deriva máxima (dataset 70C)	+0,159 °C/quadro	4,6 °C na aquisição
Histerese 40C – 40CR	1,5 DN (aprox. 0,04 °C)	limite superior; sem regime permanente
Dispersão total \sigma (máx.)	2,00 °C	NU% ≤ 1,7 %, por compatibilidade
Imagens processadas	240 TIFF 16 bits	—

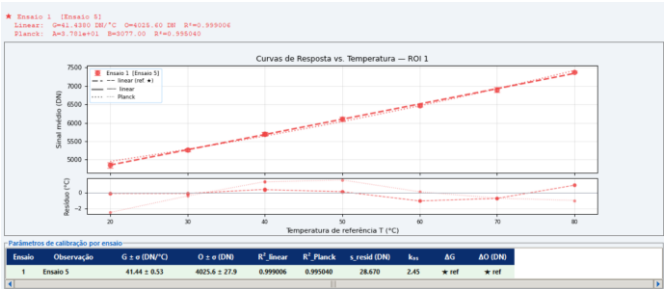


Fig. 2. Curva de resposta ao corpo negro CI Systems SR800-12D, sobre a média dos trinta quadros de cada ponto. Acima com sinal médio na ROI e os dois modelos concorrentes. Abaixo, resíduos de cada modelo, em temperatura. (Elaborado pelo autor)

A repetibilidade da média da região de interesse ao longo dos 171 s de cada aquisição situou-se entre 0,68 e 1,72 °C; removida a tendência linear, cai para 0,65 a 1,49 °C, o que mostra que parte substancial da dispersão bruta é deriva e não ruído. Essa grandeza descreve a estabilidade da média espacial e não deve ser confundida com NETD [7]. A deriva alcança 0,159 °C por quadro, o que ao longo dos trinta quadros corresponde a uma excursão de 4,6 °C considerando o corpo negro estabilizado.

No processamento dos dados independentes, os datasets A e AB foram corretamente identificados como saturados, tal qual o trabalho originário. A regressão realizada sobre os dados não saturados retornou $G = 4871,27 \text{ DN}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ e $O = 4848,10 \text{ DN}$, com $R^2 = 0,999974$, e preservou a ordenação crescente $C > B > CD > BD$ do trabalho originário. Contudo, é válido salientar que a comparação com os valores publicados em [3], extraídos de regiões de interesse definidas em ImageJ, foi realizado sobre regiões de interesse distintas, sendo retangular de 105.561 px no Radiométrica e circular de 48.713 px no ImageJ, dada a própria limitação de ROI retangular pelo Radiométrica. Ciente disso, a diferença média de 1,44 % não constitui comparação estrita entre implementações. A comparação demonstra que o programa reproduz o resultado semelhante ao de uma análise independente, mas não substitui, por si só, a verificação por dados sintéticos da Seção III.

C. Limitações do Ensaio

A correção de não-uniformidade por obturador (NUC) estava desligada durante as aquisições, mas, ainda assim, foram detectadas cinco descontinuidades de aproximadamente 2 °C entre quadros consecutivos, em cinco das oito aquisições. O intervalo entre quadros nessas transições, de 5,68 a 6,92 s, não difere de modo conclusivo da mediana geral de 5,70 s, e a origem dessa variação ainda permanece não identificada, constituindo, assim, uma limitação declarada. Essa limitação tem efeito sobre estimativas de ruído, deriva, uniformidade e histerese.

Adicionalmente, verificou-se que, nos arquivos entregues pela câmera, não há pixel persistentemente anômalo. Contudo, o ensaio não distingue se isso decorre da ausência de defeitos no arranjo ou da substituição executada internamente antes da gravação [8].

É válido informar que a montagem laboratorial não tinha blindagem, anteparos ou controle térmico do entorno da câmera e da abertura do corpo negro. Adicionalmente, a radiação do ambiente, a parcela refletida pela superfície emissora, o preenchimento do campo de visão e a transmissão da objetiva não foram controlados nem quantificados, e não foi realizado um estudo aprofundado de incerteza, de modo que não é possível afirmar quais contribuições aqui mencionadas predominam nos resultados.

Por fim, a emissividade da configuração também não foi confirmada por certificado.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a verificação do software Radiométrica, aplicação desktop em Python voltada à automação da caracterização de sensores. Esse software integra as etapas do processo, desde a importação de imagens até a produção de um relatório PDF auditável.

A verificação por dados sintéticos recuperou os valores injetados em 83 de 83 comparações, envolvendo o ganho de

calibração, o ruído equivalente em temperatura, a constante de estabilização, a separação entre ruído fixo e temporal, e detecção de saturação e pixels defeituosos. Na utilização dele em ensaio laboratorial com a WIRIS Pro e com o corpo negro CI Systems SR800-12D, 240 imagens foram processadas sem falhas. Observou-se um passo de 0,444 °C e desvio de escala de cerca de 3,6 % em relação à codificação nominal. Evidenciou-se ainda que o ganho varia conforme a quantidade de imagens promediadas em cada temperatura e que essa escolha chegou a inverter a análise do modelo de codificação aparente.

Os parâmetros foram entregues como produto técnico ao Projeto PITER do IEAv/FAB. Como trabalhos futuros, planeja-se incorporar os dados do termo-higrômetro, analisar o impacto da promediação dos dados e avaliar qual o período de estabilidade que pode ser considerado no sistema. Recomenda-se, também, como contribuição importante ao projeto PITER, avaliar a resposta espacial por MTF via método *slanted-edge* (ISO 12233) [5] da câmera Wiris Pro, como forma complementar de análise dos dados radiométricos obtidos.

AGRADECIMENTOS

Ao Projeto PITER do IEAv/FAB pelo suporte e pela disponibilidade na utilização da câmera WIRIS Pro.

REFERÊNCIAS

- [1] Workswell s.r.o., WIRIS Pro — Technical Datasheet. Prague, Czech Republic, 2021.
- [2] EMVA 1288 Working Group, EMVA Standard 1288 — Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras, Release 4.0 Linear. European Machine Vision Association, Jun. 2021.
- [3] T. S. Salles, "Caracterizações Radiométrica e Espacial de um Sensor Eletro-Óptico Multiespectral em Campo," Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais), ITA, São José dos Campos, 2026.
- [4] N. A. Patel, "Application of an Innovative Method (Aerial Infrared Thermography) for the Energetic Evaluation of Existing Buildings," M.Sc. Thesis, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Germany, May 2023.
- [5] ISO 12233:2023, Photography — Electronic still picture imaging — Resolution and spatial frequency responses. Geneva: International Organization for Standardization, 2023.
- [6] G. C. Holst, Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems, 3rd ed. Winter Park, FL: JCD Publishing; Bellingham, WA: SPIE Press, 2008.
- [7] K. Chrzanowski, Testing Thermal Imagers: Practical Guidebook. Warsaw: Military University of Technology, 2010.
- [8] A. E. Mudau, C. J. Willers, D. Griffith, and F. P. J. le Roux, "Non-Uniformity Correction and Bad Pixel Replacement on LWIR and MWIR Images," in Proc. Saudi Int. Electronics, Communications and Photonics Conf. (SIECPC), Riyadh, Saudi Arabia, 2011.
- [9] M. Krupiński, G. Bieszczad, T. Sosnowski, H. Madura, and S. Gogler, "Non-Uniformity Correction in Microbolometer Array with Temperature Influence Compensation," Metrology and Measurement Systems, vol. 21, no. 4, pp. 709–718, Dec. 2014, doi: 10.2478/mms-2014-0050.