

5. RESULTADOS

5.1. Calibração do termovisor referenciado ao corpo negro do Laboratório do INMETRO

Dez medições para cada temperatura, na faixa de 25 a 150 °C , foram feitas para se testar a repetitividade, totalizando 14 pontos. O método dos mínimos quadrados foi utilizado para relacionar a temperatura indicada pelo termovisor $T_{\text{Termovisor}}$ com a do padrão $T_{\text{padrão}}$, Eq. (15), o qual tem uma incerteza estimada de $U_{\text{padrão}} = \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$, ou $u_{\text{padrão}} = \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Os resultados são:

$$A = 0,193363 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (44)$$

$$B = 0,988942 \quad (45)$$

$$u_{\text{ajuste}} = 0,041 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (46)$$

A dispersão típica do termovisor, na faixa de calibração, se encontra dentro do intervalo de $0,20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq u_d \leq 0,30 \text{ } ^\circ\text{C}$.

5.2. Medição da emissividade da superfície na PUC-Rio

Usando o dispositivo desenvolvido na PUC-Rio, o termovisor foi utilizado para medir a temperatura da placa colocada em um banho de temperatura controlada por três termopares. A Tabela (19) apresenta os resultados das medições realizadas pelos termopares, com a temperatura média e a incerteza calculadas pelas Eq. (26) e (27). Na Tabela (20) encontramos a média encontrada pelos termopares e a medição obtida pelo termovisor.

Tabela 19: Temperatura da placa medida com termopares tipo T, no dispositivo da PUC-Rio

Temperatura em mV			Temperatura ITS-90 (°C)					Temperatura corrigida (°C)					
T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Média	Dif.Max.	T ₁	T ₂	T ₃	T _p	Dif.Max.	U _p
0,987	0,994	0,991	24,88	25,06	24,98	24,97	0,17	25,01	24,98	24,94	24,98	0,07	0,14
1,358	1,365	1,363	33,92	34,09	34,04	34,02	0,17	34,00	33,94	34,00	33,98	0,06	0,14
1,799	1,806	1,808	44,45	44,62	44,66	44,58	0,21	44,49	44,40	44,56	44,48	0,15	0,14
2,212	2,216	2,222	54,11	54,21	54,35	54,22	0,23	54,11	53,96	54,16	54,08	0,20	0,14
2,631	2,641	2,655	63,73	63,96	64,28	63,99	0,55	63,70	63,69	64,02	63,81	0,32	0,14
3,075	3,076	3,097	73,74	73,76	74,23	73,91	0,49	73,69	73,49	73,93	73,70	0,44	0,14
3,499	3,514	3,545	83,13	83,46	84,14	83,58	1,01	83,06	83,20	83,85	83,37	0,79	0,14
3,952	3,948	3,994	93,01	92,92	93,91	93,28	0,99	92,92	92,67	93,67	93,08	1,00	0,14
3,486	3,490	3,501	82,85	82,94	83,18	82,99	0,33	82,77	82,67	82,88	82,77	0,21	0,14
3,918	3,923	3,943	92,27	92,38	92,81	92,49	0,54	92,18	92,13	92,56	92,29	0,43	0,14
4,331	4,334	4,372	101,15	101,21	102,02	101,46	0,87	101,05	100,97	101,84	101,29	0,87	0,14
4,759	4,768	4,817	110,22	110,41	111,44	110,69	1,22	110,12	110,17	111,35	110,55	1,23	0,14
5,251	5,253	5,307	120,50	120,54	121,66	120,90	1,16	120,40	120,31	121,66	120,79	1,35	0,14
5,257	5,262	5,317	120,62	120,73	121,86	121,07	1,24	120,52	120,50	121,87	120,96	1,38	0,14
5,719	5,717	5,776	130,14	130,10	131,30	130,51	1,21	130,04	129,86	131,35	130,42	1,49	0,14
6,204	6,202	6,244	140,00	139,96	140,81	140,25	0,85	139,91	139,70	140,81	140,14	1,11	0,14

Três (3) medições foram feitas pelo termovisor para cada valor de temperatura da placa. As Eq. (28), (29), (30), (31), (32) e (33) foram utilizadas, com os resultados apresentados na Tabela (20). A incerteza de medição ($U_{\text{efet}} = 2 \cdot u_{\text{efet}}$) da temperatura com o termovisor está na faixa de $1,1 \text{ °C} \leq U_{\text{efet}} \leq 1,4 \text{ °C}$.

Pode-se observar que acima de 70 °C a emissividade permanece aproximadamente constante em torno de $\varepsilon = 0,96$, com incerteza de $U_{\varepsilon} = \pm 0,01$. Desta forma, conseguiu-se medir a emissividade da placa no dispositivo da PUC-Rio. Este valor foi utilizado para medição da temperatura pelo termovisor.

Tabela 20: Emissividade da superfície como função da temperatura, dispositivo da PUC-Rio

PLACA		TERMOVISOR				Emissividade		
T_p °C	u_p °C	INDICADO		CALIBRAÇÃO ($\epsilon=1$)		ϵ	u_ϵ	U_ϵ
		$T_{\text{Termovisor}}$ °C	u_d °C	T_{efet} °C	u_{efet} °C			
24,98	0,07	24,72	0,21	24,64	0,54	0,996	0,007	0,015
33,98	0,07	33,51	0,19	33,33	0,54	0,992	0,007	0,014
44,48	0,07	43,79	0,16	43,50	0,53	0,988	0,007	0,013
54,08	0,07	52,58	0,18	52,20	0,53	0,977	0,006	0,013
63,81	0,07	62,15	0,17	61,65	0,53	0,975	0,006	0,012
73,70	0,07	71,62	0,18	71,02	0,53	0,969	0,006	0,012
83,37	0,07	80,84	0,17	80,14	0,53	0,964	0,006	0,012
93,08	0,07	89,62	0,18	88,83	0,53	0,954	0,006	0,011
101,29	0,07	98,97	0,37	98,07	0,62	0,966	0,007	0,013
110,55	0,07	108,09	0,33	107,08	0,60	0,964	0,006	0,012
120,79	0,07	117,88	0,43	116,77	0,66	0,960	0,007	0,013
130,42	0,07	127,23	0,49	126,01	0,70	0,957	0,007	0,013
140,14	0,07	137,46	0,47	136,14	0,69	0,962	0,006	0,013

5.3. Medição da temperatura com o termovisor

Uma vez conhecida a emissividade da placa e a calibração do termovisor contra um corpo negro do INMETRO, a incerteza de medição de temperatura com o termovisor foi estimada para cada uma das temperaturas da placa, e cada uma das três (3) vezes medidas.

Tabela 21: Incerteza de medição da temperatura com o termovisor. 1º Conjunto de dados.

$T_{\text{termovisor}}$ °C	u_d °C	T_{efet} °C	u_{efet} °C	ε	u_ε	T_p °C	u_p °C	U_p °C
24,75	0,37	24,75	0,37	0,996	0,007	25,08	0,66	1,3
33,49	0,35	33,49	0,35	0,992	0,007	34,14	0,65	1,3
43,64	0,31	43,64	0,31	0,988	0,007	44,62	0,62	1,2
52,34	0,33	52,34	0,33	0,977	0,006	54,22	0,63	1,3
62,02	0,23	62,02	0,23	0,975	0,006	64,18	0,59	1,2
71,50	0,28	71,50	0,28	0,969	0,006	74,19	0,61	1,2
81,04	0,28	81,04	0,28	0,964	0,006	84,27	0,61	1,2
90,03	0,31	90,03	0,31	0,954	0,006	94,30	0,63	1,3
99,14	0,54	99,14	0,54	0,966	0,007	102,37	0,84	1,7
108,14	0,71	108,14	0,71	0,964	0,006	111,61	0,94	1,9
117,86	0,78	117,86	0,78	0,960	0,007	121,89	1,04	2,1
127,31	0,90	127,31	0,90	0,957	0,007	131,73	1,15	2,3
137,63	0,76	137,63	0,76	0,962	0,006	141,65	1,04	2,1

Tabela 22: Incerteza de medição da temperatura com o termovisor. 2º Conjunto de dados.

$T_{\text{termovisor}}$ °C	u_d °C	T_{efet} °C	u_{efet} °C	ε	u_ε	T_p °C	u_p °C	U_p °C
24,88	0,34	24,88	0,34	0,996	0,007	25,21	0,65	1,3
33,49	0,35	33,49	0,35	0,992	0,007	34,14	0,65	1,3
43,86	0,26	43,86	0,26	0,988	0,007	44,84	0,59	1,2
52,93	0,31	52,93	0,31	0,977	0,006	54,82	0,62	1,2
62,22	0,31	62,22	0,31	0,975	0,006	64,38	0,62	1,2
71,65	0,37	71,65	0,37	0,969	0,006	74,34	0,66	1,3
80,78	0,29	80,78	0,29	0,964	0,006	84,01	0,61	1,2
90,23	0,28	90,23	0,28	0,954	0,006	94,50	0,61	1,2
98,89	0,59	98,89	0,59	0,966	0,007	102,12	0,87	1,7
108,06	0,61	108,06	0,61	0,964	0,006	111,53	0,87	1,7
117,89	0,80	117,89	0,80	0,960	0,007	121,92	1,05	2,1
127,07	0,77	127,07	0,77	0,957	0,007	131,49	1,05	2,1
137,65	0,85	137,65	0,85	0,962	0,006	141,67	1,11	2,2

Tabela 23: Incerteza de medição da temperatura com o termovisor. 3º Conjunto de dados.

$T_{\text{termovisor}}$ °C	u_d °C	T_{efet} °C	u_{efet} °C	ε	u_{ε}	T_p °C	u_p °C	U_p °C
24,54	0,38	24,54	0,38	0,996	0,007	24,87	0,67	1,3
33,55	0,29	33,55	0,29	0,992	0,007	34,20	0,62	1,2
43,88	0,25	43,88	0,25	0,988	0,007	44,86	0,59	1,2
52,48	0,29	52,48	0,29	0,977	0,006	54,36	0,61	1,2
62,20	0,34	62,20	0,34	0,975	0,006	64,36	0,64	1,3
71,70	0,25	71,70	0,25	0,969	0,006	74,39	0,60	1,2
80,71	0,29	80,71	0,29	0,964	0,006	83,94	0,61	1,2
88,61	0,32	88,61	0,32	0,954	0,006	92,87	0,63	1,3
98,87	0,58	98,87	0,58	0,966	0,007	102,10	0,86	1,7
108,06	0,61	108,06	0,61	0,964	0,006	111,53	0,87	1,7
117,88	0,67	117,88	0,67	0,960	0,007	121,91	0,95	1,9
127,30	0,86	127,30	0,86	0,957	0,007	131,72	1,12	2,2
137,11	0,85	137,11	0,85	0,962	0,006	141,12	1,11	2,2

Pode-se observar que até aproximadamente 120 °C a incerteza é inferior a $\pm 2,0$ °C , conforme declarado pelo fabricante. A partir deste ponto, a incerteza aumenta gradativamente, porém inferior a 2 %, conforme declarado pelo fabricante.

5.4. Medição independente da emissividade

A Tabela (24) apresenta os resultados da medição independente da emissividade, descritos no item 4.6.

Tabela 24: Medição da emissividade

Grandeza	Símbolo	Unidade	Valor
Potência térmica	q_1	W	6,09
Área da superfície interna	A_1	m ²	0,009698
Área da superfície externa	A_2	m ²	0,024014
Temperatura da superfície interna	T_1	°C	108,49
Temperatura da superfície externa	T_2	°C	47,29
Emissividade	ε		1,06
Potência radiante teórica para $\varepsilon = 0,96$	q_r	W	5,36
Perdas estimadas para $\varepsilon = 0,96$	q_p	W	0,73

Como pode ser observado, o valor da emissividade determinada experimentalmente foi maior do que 1. Como a potência radiante teórica para $\epsilon = 0,96$ é 5,36 W (segundo a formulação descrita anteriormente), concluiu-se que a diferença (0,73 W) para a potência térmica dissipada pela resistência (6,09 W) poderia ser considerada como perdas pelas bases ou incerteza de medição. Desta forma, uma investigação mais detalhada da discrepância deve ser feita para qualificar o medidor.

A literatura mostra que o uso de uma esfera integradora com um espectrofotômetro pode determinar a emissividade espectral e, portanto, a variação da emissividade total como função da temperatura. Este método, entretanto, não foi considerado neste estudo devido ao seu alto custo e indisponibilidade por muitos usuários.

Uma outra forma de medição independente da emissividade é pelo método comparativo, desde que se conheça a emissividade de um padrão medida por outro método independente. A PUC-Rio possui um forno em que a energia necessária para manter constante a temperatura da superfície absorvedora de radiação é medida. Por comparação com o padrão pode-se estimar a emissividade das diferentes superfícies. Dessa forma é possível, a partir das emissividades encontradas, determinar as temperaturas dos objetos desejados.

5.5. Comparação entre resultados obtidos na PUC-Rio e na Light

Para avaliação dos resultados obtidos através da calibração, realizou-se a medição de um transformador de corrente – TC, Fig. (29). Este equipamento é responsável pela conversão de altas correntes elétricas em correntes menores possibilitando sua leitura com equipamentos de menor capacidade. Esses TCs são colocados para monitorar o fluxo de corrente elétrica que circula em equipamentos submetidos a altas correntes operativas.



Figura 29: Transformadores de corrente

Com a explosão de um desses equipamentos, a Light passou a fazer um acompanhamento semanal dos outros TCs presentes na mesma estrutura, buscando dessa forma detectar prováveis anomalias em seu funcionamento.



Figura 30 - Transformador de corrente danificado pela alta temperatura

Foi realizada uma medição utilizando o termovisor da Light (AGEMA Scanner 487) e outra com o termovisor da PUC-Rio (VarioCAM). A imagem termográfica realizada pelo termovisor da PUC-Rio pode ser vista na Fig. (31). Observe que o ponto mais quente, conforme legenda da barra termográfica da imagem, se encontra no conector, vide seta na imagem. A configuração do termovisor para a realização da medição foi a que segue abaixo:

- Temperatura ambiente = 31°C
- Emissividade utilizada = 0,85
- Distância do objeto = 15 metros
- Umidade relativa do ar = 59%
- Velocidade do vento < 2 km /h

Com essa configuração o ponto mais quente obtido pelo termovisor da Light foi de 48,2 °C e para o termovisor da PUC-Rio o valor encontrado foi de 48,6 °C.

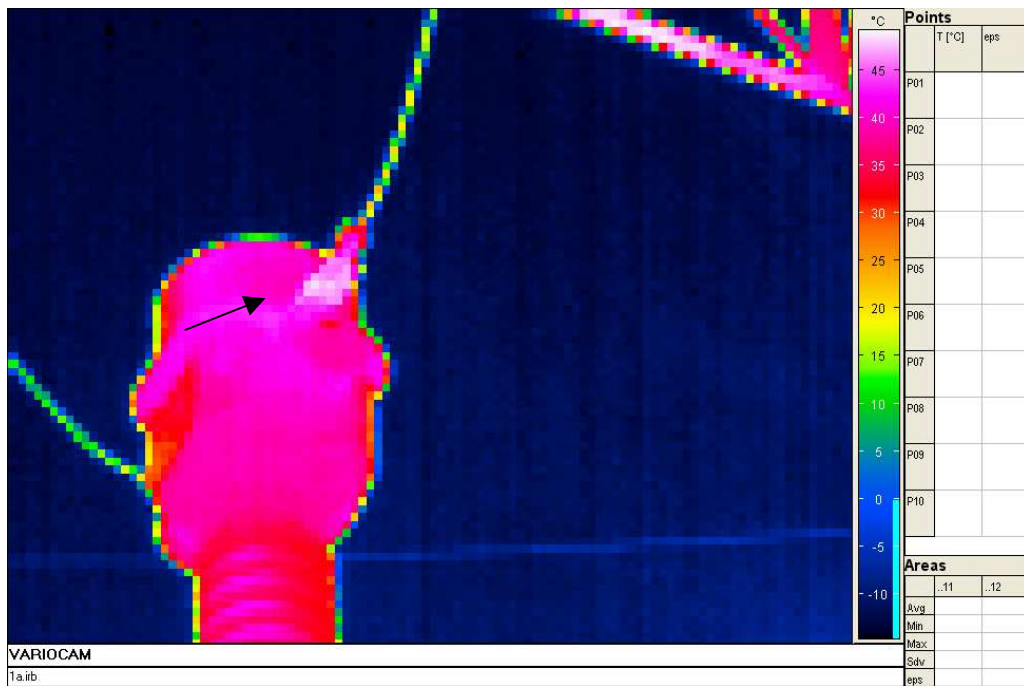


Figura 31: Imagem termográfica do transformador de corrente utilizando o termovisor da PUC-Rio

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0521525/CA

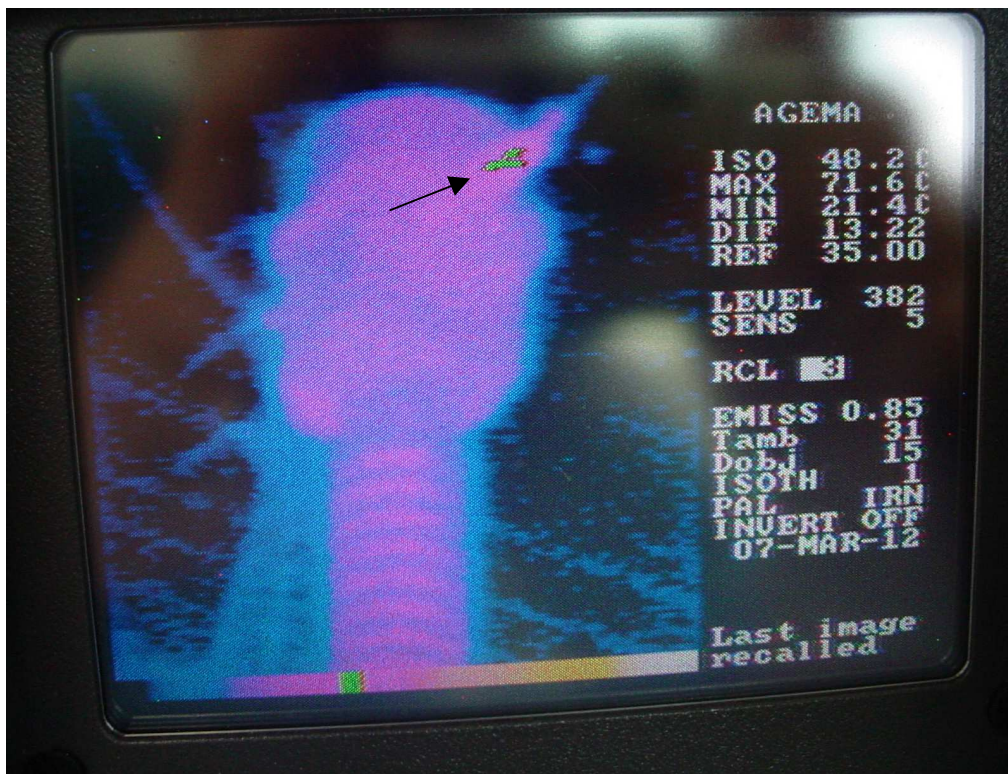


Figura 32: Imagem termográfica do transformador de corrente utilizando o termovisor da Light

Aproveitou-se também a capacidade do termovisor da PUC-Rio para a realização de 2 simulações realizadas com o software de aquisição de imagens do termovisor, que estão descritas abaixo:

1. Manteve-se a distância entre o objeto e o termovisor constante, e incrementou-se a temperatura ambiente em 2°C, começando em 20°C e terminando em 32°C. Para cada temperatura ambiente variou-se a emissividade de 1 até 0,80, com intervalos de 0,01. E para cada par de Temperatura ambiente e emissividade, encontrou-se o valor provável da temperatura do objeto informado pelo termovisor, conforme pode ser visto nas Tabelas (26), (27), (28), (29), (30), (31) e (32) do anexo.
2. Variando a emissividade de 1 até 0,98 com intervalos de 0,01. Para cada valor de emissividade foi variada a temperatura ambiente de 20°C, 22°C e 24°C, formando um par, emissividade e temperatura ambiente. A partir de cada par formado, variamos a distância entre o objeto e o termovisor, e coletamos a temperatura do objeto indicado pelo mesmo. O resultado está representado nas Tabelas (33), (34), (35), (36), (37), (38), (39), (40), (41), (42), (43) e (44) do anexo.

A Fig. (33) representa o gráfico Temperatura do objeto x Emissividade da simulação 1 anterior. Os dados foram retirados das Tabelas (26), (27), (28), (29), (30), (31) e (32) do anexo. Nela pode-se observar os seguintes pontos:

- a) Encontrou-se um ponto de convergência da temperatura do objeto para emissividade igual a 1 para todas as temperaturas ambiente simuladas;
- b) Confirmou-se a dependência da temperatura com a emissividade que é aproximadamente linear, dessa forma a determinação correta da emissividade mostra sua importância na avaliação da temperatura do equipamento objeto de análise;

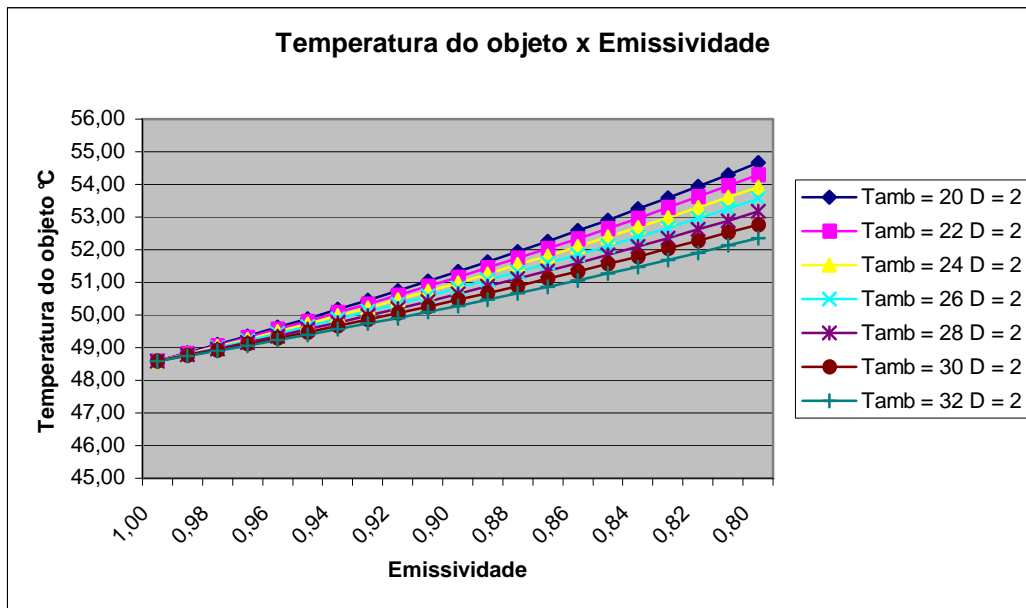


Figura 33: Temperatura do objeto x Emissividade

Os valores de temperatura do objeto para uma emissividade de 0,8, e temperatura ambiente variando entre 20 °C e 32 °C, e apresentados na Fig. (33), têm uma média de 53,5 °C e desvio padrão de 0,8 °C. A diferença entre o valor verdadeiro (encontrado) e a média é de aproximadamente 5,3 °C. Portanto, esta deve ser a sensibilidade mínima à temperatura do transformador de corrente analisado, para que seu desempenho não seja afetado pela incerteza de especificação dos parâmetros não medidos.

Para a Fig. (34), o gráfico Temperatura do objeto x Distância entre o objeto e termovisor representa a simulação 2 citada anteriormente. Os dados são das Tabelas (33), (34), (35), (36), (37), (38), (39), (40), (41), (42), (43) e (44) do anexo, podemos destacar os seguintes pontos:

- Verificou-se que a distância simulada de afastamento, que foi realizada até 22 metros, não teve influência significativa sob o resultado da temperatura do objeto sob análise.
- Os valores se apresentam agrupados por emissividade, sendo que conforme vai diminuindo a emissividade é percebido um aumento da dispersão entre as temperaturas do objeto de cada grupo. Essa dispersão merece uma análise mais detalhada para que se possa estabelecer as causas possíveis, entendemos contudo, que a emissividade contribui para esta dispersão;

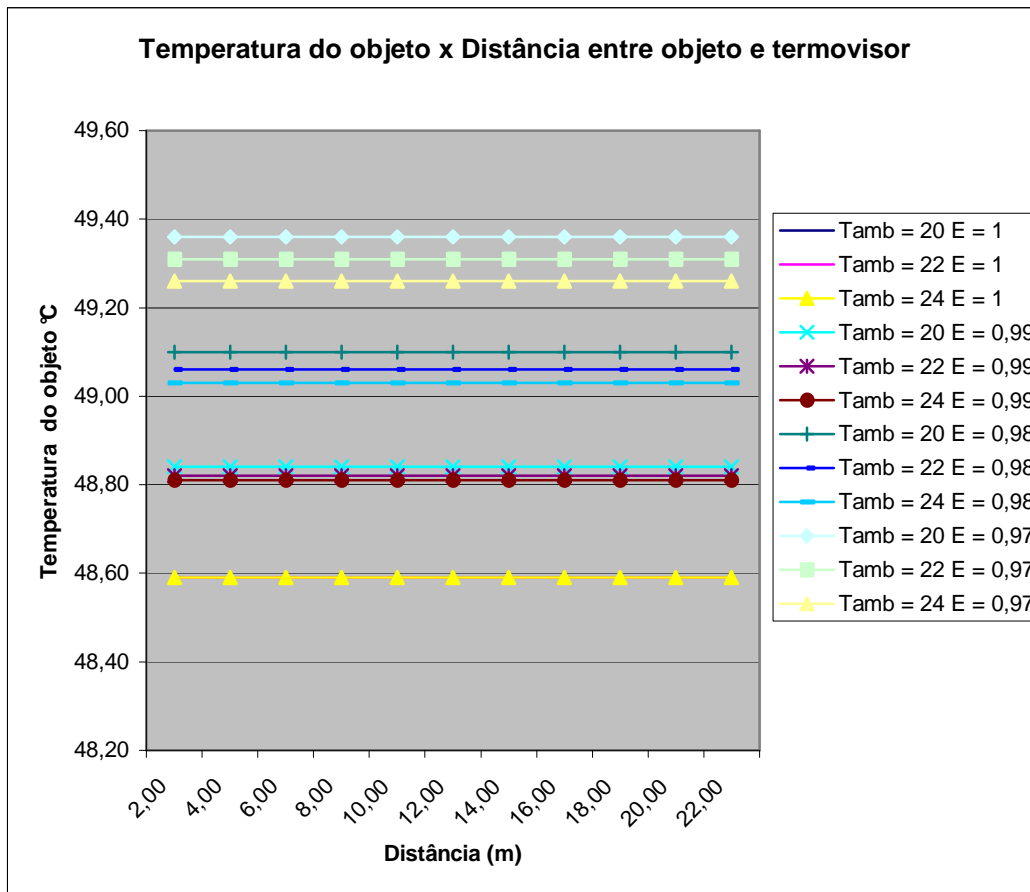


Figura 34: Temperatura do objeto x Distância entre objeto e termovisor

Obs.: Para as curvas referentes a emissividade igual a 1, as mesmas estão sobrepostas, pois obtiveram a mesma temperatura para o objeto.