

GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS

USO DE TERMÓMETROS DE FRENTE DE INFRARROJO PARA LA MEDIDA TRAZABLE SIN CONTACTO DE LA TEMPERATURA DEL CUERPO HUMANO

M. J. Martin (CEM, España), L. Knazovicka (CMI, República Checa), H. McEvoy (NPL, Reino Unido), G. Machin (NPL, Reino Unido), I. Pusnik (UL, Eslovenia), D. Cardenas (CENAM, México), M. Sadli (LNE-CNAM, Francia), B. Chengdu (NIM, China), W. Li (SPRING, Singapur), P. Saunders (MSL, Nueva Zelanda), F. Girard (INRiM, Italia)

Traducido por: M. J. Martin (CEM, España) y D. Cardenas (CENAM, México)

3ª versión. Mayo 2021

Este documento es una traducción autorizada del documento del Bureau Internacional de Pesas y Medidas "Best practice guide. Use of infrared forehead thermometers to perform traceable non-contact measurements of human body temperatures", accesible en la página web del BIPM en

<https://www.bipm.org/documents/20126/59596936/Best+Practice+Guide+for+Forehead+Thermometers/7550747b-1344-7416-3e7a-ec54f863ed5c>

Es una co-edición entre el Centro Español de Metrología y el Centro Nacional de Metrología de México.

NIPO: 11321028X

INDICE

1. ALCANCE	3
2. OBJETIVO.....	3
3. INTRODUCCIÓN	3
4. PRINCIPIO DE MEDIDA DE LOS TERMÓMETROS DE FRENTE DE INFRARROJO.....	6
5. VALIDACIÓN CLÍNICA.....	7
6. OPERACIONES BÁSICAS DE FUNCIONAMIENTO	8
7. MAGNITUDES DE INFLUENCIA EN LA MEDIDA E INCERTIDUMBRES ASOCIADAS	10
7.1. CAPACIDAD PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA INTERNA DEL CUERPO HUMANO	10
7.2. COMPORTAMIENTO DEL TERMÓMETRO DE FRENTE DE IR.....	10
7.2.1. ESPECIFICACIONES GENERALES DE LOS TERMÓMETROS DE IR – PARA ASEGURAR EL FUNCIONAMIENTO DEL TERMÓMETRO DE FRENTE DE IR.....	11
7.2.2. CONSIDERACIONES ADICIONALES EN RELACIÓN CON LA ASIGNACIÓN DE INCERTIDUMBRES EN TERMÓMETROS DE FRENTE DE IR.....	12
7.3. INCERTIDUMBRE DEL TERMÓMETRO DE FRENTE DE IR EN SU USO CLÍNICO	13
8. REFERENCIAS.....	16

1. Alcance

Este documento aplica a termómetros clínicos, del tipo termómetros de frente/piel, para la medida de la temperatura del cuerpo humano en el rango de 22 °C a 40 °C

2. Objetivo

El objetivo de este documento es ofrecer una guía de buenas prácticas, con incertidumbres realistas, para la medida de la temperatura del cuerpo humano utilizando termómetros de frente/piel.

3. Introducción

Existen varios métodos para medir la temperatura (y, por tanto, la temperatura del cuerpo humano). Según el tipo de contacto entre el termómetro y el objeto que se mide, estos métodos pueden clasificarse en:

- Métodos de contacto.
- Métodos sin contacto (métodos que utilizan la radiación térmica emitida).

Los métodos de contacto son aquellos en los que el sensor de temperatura está en contacto directo con el objeto. Para que el termómetro funcione correctamente, debe aplicarse la ley cero de la termodinámica, en el sentido de que es necesario alcanzar el equilibrio térmico entre el objeto y el termómetro. Esto siempre lleva tiempo (normalmente varios minutos), por lo que los termómetros de contacto utilizados para medir la temperatura corporal suelen llevar incorporados algoritmos de predicción para acelerar el proceso de medida¹.

Los métodos sin contacto se basan en el hecho de que todos los objetos por encima del cero absoluto emiten radiación térmica. Esta radiación térmica puede ser detectada y medida por un sensor alejado de la superficie emisora; es decir, sin contacto directo entre el termómetro y el objeto cuya temperatura se está midiendo. Sin embargo, los termómetros sin contacto son, en general, menos precisos² que los de contacto debido, entre otros, a los siguientes efectos:

- La capacidad del objeto para emitir radiación térmica (emisividad) y, a la inversa, la capacidad del objeto para reflejar la radiación térmica del entorno
- El medio a través del cual se propaga la radiación térmica desde el objeto hasta el termómetro (condiciones ambientales)

¹ Estos algoritmos predictivos introducen incertidumbres adicionales en el proceso de medida.

² En este documento se van a utilizar tres términos metrológicos diferentes [1]:

Exactitud de medida, exactitud: proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando. El concepto “exactitud de medida” no es una magnitud y no se expresa numéricamente. Se dice que una medición es más exacta cuanto más pequeño es el error de medida.

Error de medida, error: diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia.

Incertidumbre de medida, incertidumbre: parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza. La incertidumbre de medida incluye componentes procedentes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a valores asignados a patrones, así como la incertidumbre debida a la definición. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos estimados y en su lugar se tratan como componentes de incertidumbre. En general, para una información dada, se sobrentiende que la incertidumbre de medida está asociada a un valor determinado atribuido al mensurando.

- La capacidad del termómetro para recoger la radiación térmica emitida, corregir la radiación térmica reflejada e inferir la temperatura del objeto (características ópticas del termómetro, detector, lentes, alineación, temperatura del ambiente, etc.).

El propósito de un termómetro clínico es determinar la temperatura de un lugar del cuerpo en particular y luego relacionar esa medida con la temperatura corporal interna³. Los posibles resultados de la medida son determinar si un paciente está afebril, febril, hipotérmico y, en el caso de que se registren tendencias, si tiene una temperatura corporal creciente o decreciente.

En general, se considera que la temperatura corporal interna es la temperatura de la sangre en el corazón y el cerebro [2]. Sin embargo, “temperatura interna” es más un concepto que la temperatura de un lugar corporal práctico. Lugares apropiados para medir la temperatura corporal interna son la arteria pulmonar, el esófago distal, la vejiga urinaria o la membrana timpánica (no el conducto auditivo, por lo que, para obtener la verdadera temperatura corporal interna, se requeriría la inserción de un catéter invasivo. Estas medidas se consideran generalmente demasiado invasivas fuera de los quirófanos o de las unidades de cuidados intensivos y rara vez se realizan fuera de estos entornos. La medida de la temperatura de contacto timpánica se considera menos invasiva [3, 4, 5], pero la fragilidad de la membrana timpánica es una consideración importante en contra el uso rutinario de este lugar de medida para los termómetros de contacto.

Hay otros lugares alternativos de medida de la temperatura corporal (no considerados lugares de medida de la temperatura corporal interna) que podrían, con las correcciones adecuadas, representar la temperatura interna:

- Los sitios oral, rectal o axilar, tradicionalmente medidos por termómetros de contacto. Sin embargo, estos sitios fueron elegidos más por conveniencia que por ser representaciones fiables de la temperatura corporal interna. Por lo general, no representan esa magnitud y debería aplicarse una compensación para corregir las lecturas a la temperatura corporal interna, aunque esto rara vez se hace.
- El canal auditivo, con la membrana timpánica al final, se utiliza de forma rutinaria para medir la temperatura corporal por infrarrojo sin contacto. Sin embargo, las temperaturas medidas pueden no representar estrictamente la temperatura corporal interna porque la radiación térmica medida es generalmente una mezcla de radiación térmica emitida tanto por la membrana timpánica como por el canal auditivo inferior. Esta limitación no suele considerarse un problema importante porque el riego sanguíneo de estos lugares procede de la arteria carótida interna y externa, respectivamente, por lo que, en principio, deberían tener la misma temperatura. Además, el conducto auditivo está bien aislado de las condiciones ambientales y se encuentra muy cerca de las principales arterias y venas cerebrales, por lo que su temperatura es, con toda probabilidad, muy cercana a la de la membrana timpánica. Esto significa que probablemente el conducto auditivo, cerca de la membrana timpánica, tiene una emisividad efectiva cercana a la de una cavidad de cuerpo negro ideal. Además, termina a sólo unos 3,5 cm del hipotálamo, que es el centro de control de la temperatura corporal. Sin embargo, a pesar de la idoneidad de este lugar para la medida de la temperatura

³ Nota de la traducción: Se ha utilizado el término **temperatura corporal interna** como la traducción de “core body temperature”. Esta traducción es equivalente al término en español de **temperatura corporal central**, utilizado también en el ámbito médico.

corporal, en la práctica hay una serie de problemas que hacen que la técnica sea propensa a errores sistemáticos, entre éstos destacan:

- Anatómicamente el canal auditivo es un tubo ligeramente curvado de unos 3,0 cm a 3,5 cm de longitud (para un adulto). Esta curvatura, dependiendo de la persona, puede impedir la visión del conducto auditivo interno profundo y de la membrana timpánica (por lo que durante la medida hay que tomar precauciones para enderezar el conducto auditivo -la técnica del "tirón de orejas"-, aunque en la práctica no se utiliza mucho)
- Más específicamente, el cerumen o el líquido en el canal auditivo pueden oscurecer parcial o totalmente la membrana timpánica y el canal auditivo interno, dando lugar a grandes errores de medida
- Medidas de la temperatura de la piel, que se realizan para intentar determinar la temperatura de la superficie del cuerpo humano. En este caso, la temperatura medida depende significativamente de la perfusión sanguínea de la piel y, en particular, de las condiciones ambientales⁴. Además, la temperatura de la piel puede variar con la transpiración anormal (sudoración), que se produce como consecuencia de algunas condiciones de salud o tratamientos médicos. Por lo tanto, en la mayoría de las situaciones de medida, como en controles en lugares públicos o en el exterior, la temperatura de la piel no puede correlacionarse de forma fiable con la temperatura corporal interna⁵. Sin embargo, aunque es muy probable que la temperatura medida se desvíe significativamente de la temperatura corporal interna (por ejemplo, dependiendo de la parte de la piel del rostro que se mida [6]), la medida de la temperatura de la piel puede utilizarse, con cuidado, en entornos adecuados y con dispositivos bien diseñados y fabricados, para determinar tendencias de la temperatura. Para determinar si estos dispositivos pueden, en dichas condiciones, determinar de forma fiable la temperatura corporal interna serían necesarios más estudios.

Los termómetros clínicos de infrarrojo de cualquier tipo suelen tener dos modos de medida ajustado/no ajustado (o indirecto/directo):

- Modo ajustado (indirecto): la lectura del termómetro de infrarrojo muestra una temperatura corregida para un sitio particular del cuerpo (es decir, oral, rectal, interna...)
- Modo no ajustado (directo)⁶: la lectura del termómetro de infrarrojo muestra la temperatura medida sin corrección por el lugar de medición (por ejemplo, en el caso de los termómetros de piel/frente, sin corrección por emisividad de la piel).

⁴ Podría haber otros parámetros que afectaran a la temperatura; por ejemplo, la edad del sujeto o las condiciones médicas que contribuyen a una mala perfusión sanguínea de la piel.

⁵ Esta es la razón por la cual la norma ASTM E1965-98 (2016) [7] *aborda la evaluación de la temperatura interna del cuerpo de un sujeto a través de la medida de la emisión térmica del canal auditivo y los requisitos de funcionamiento para las medidas de temperatura sin contacto de la piel*. Para ser claros, esta norma es explícita en cuanto a que los termómetros de frente están destinados a determinar la temperatura de la piel de un paciente; no están destinados a evaluar la temperatura corporal interna. La norma ISO equivalente UNE EN ISO 80601-2-56:2017 [8] sí permite la validación clínica de los termómetros de frente, pero esto normalmente se realiza en entornos de salas controladas de alrededor de 23 °C y no en un valor amplio de condiciones ambientales

⁶ Hay muchos instrumentos que no tienen un modo directo. En el caso de los termómetros de frente de infrarrojo, el fabricante deben suministrar las correcciones a aplicar cuando se realiza la calibración en el laboratorio [7, 8] (véanse los apartados siguientes).

4. Principio de medida de los termómetros de frente de infrarrojo

Un termómetro de frente/piel de infrarrojo (TFIR) es un dispositivo de medida de la temperatura por infrarrojo sin contacto que puede utilizarse para inferir la temperatura corporal a partir de una medida de la temperatura de la superficie de la piel del sujeto. Estos termómetros tienen algunas ventajas en comparación con los termómetros de contacto y de oído:

- tiempo de respuesta corto;
- no hay contacto entre el sujeto y el termómetro (a diferencia de lo que ocurre con los termómetros de oído de infrarrojo), lo que es bueno desde el punto de vista del control de infecciones.

Hay dos normas que describen el funcionamiento de estos termómetros: ASTM E 1965-98 (2016) "Standard specification for infrared thermometers for intermittent determination of patient temperature" [7] e UNE EN ISO-80601-2-56 (2017) "Equipos electromédicos. Parte 2-56: Requisitos particulares para la seguridad básica y funcionamiento esencial de los termómetros clínicos para la medición de la temperatura corporal" [8].

El principio de medida de la temperatura de la piel es técnicamente el mismo que el utilizado por los termómetros de oído de infrarrojo (véase [9]). Sin embargo, existen dos diferencias significativas:

- La primera está relacionada con el lugar de medida. En el caso de los termómetros de frente/piel, hay que tener en cuenta la emisividad de la piel y la radiación térmica reflejada. Se trata de una cuestión importante ya que la emisividad de la piel puede variar de un lugar a otro del cuerpo y entre individuos, con valores que oscilan entre 0,94 y 0,99 [10, 11, 12]. Esto es diferente al caso de la emisividad del canal auditivo, donde la emisividad se puede considerar 1,00 [7]. La radiación térmica del entorno puede variar y no estar controlada dependiendo del lugar donde se realicen las medidas (p. e. medidas realizadas en lugares públicos o en el exterior)⁷.
- La segunda está relacionada con el campo de visión (FOV) del instrumento (véase el apartado 7.2.1). Para los termómetros de oído y para los de frente/piel, el campo de visión suele ser bastante amplio. En el caso de los termómetros de oído, éstos están diseñados para ser insertados en el canal auditivo y el campo de visión está completamente lleno. Esto es diferente en el caso de los termómetros de frente/piel, en los que, a menos que se tenga cuidado, la región de interés probablemente sólo llenará una parte del campo de visión. Para evitar lecturas erróneamente bajas y para medir de forma aproximada las temperaturas de la frente/piel, tanto el diseño del instrumento como la distancia de medida (suministrada por el fabricante) deben garantizar que la radiación térmica se recoge de la superficie de la piel de interés, evitando, en la medida de lo posible, cualquier radiación térmica dispersa procedente de otras partes del cuerpo no relacionadas (por ejemplo, el pelo o objetos

⁷ Los TFIRs tratan de compensar las condiciones ambientales intentando medir la temperatura ambiente de forma independiente. Sin embargo, esto es difícil de hacer, ya que el dispositivo puede calentarse por la mano del operador y la electrónica interna, y la temperatura interna medida no representaría el ambiente. Además, el termómetro tarda algún tiempo en aclimatarse a las condiciones ambientales. Así, por ejemplo, si se usa el termómetro fuera de un entorno controlado y se realiza una medida, el ambiente puede variar de menos de 0 °C a más de 30 °C, lo que tendría un impacto significativo en la temperatura medida de la piel (aparte del hecho de que, por ejemplo, la frente irradiaría significativamente el calor en condiciones de frío y, por tanto, estaría más fría que la temperatura corporal interna).

externos con diferentes temperaturas de superficie, que podrían ser fuentes de radiación térmica reflejada o emitida de forma errónea) (véase la figura 1).

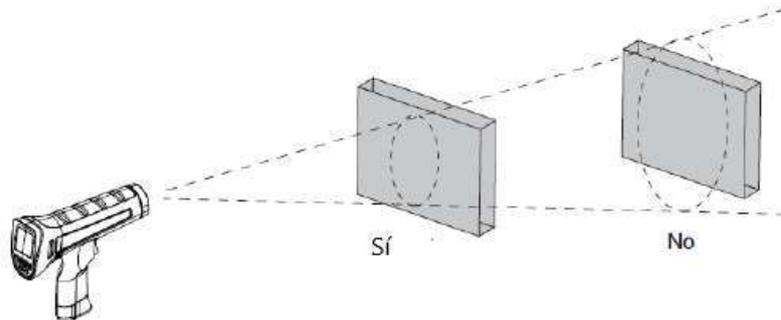


Figura 1. El campo de visión del termómetro limita la distancia al objeto que se mide.

Existen dos tipos de termómetros en el mercado para medir la temperatura de la piel de la frente:

- El “termómetro de arteria temporal” que se coloca tocando la sien y tiene forma de copa en el extremo. Generalmente, se desplaza sobre la superficie de la piel desde el centro de la frente hacia la oreja y se registra la temperatura máxima.
- El “termómetro de frente”, más general, mide en un solo punto a varios centímetros de la piel.

Los siguientes apartados se aplican a ambos, así como a otros termómetros de piel más generales.

5. Validación clínica

Cada lugar de referencia del cuerpo tendrá una temperatura diferente en función del equilibrio entre la producción, la transferencia y la pérdida de calor. Esto significa que la verificación en el laboratorio del funcionamiento de un termómetro clínico no es suficiente para determinar su eficacia en la determinación de la temperatura corporal interna, en parte debido a los factores externos (paciente y entorno) mencionados anteriormente, y, en parte, debido al algoritmo de ajuste interno del termómetro, en el que se aplica una compensación para obtener la temperatura corporal interna indicada (u otros lugares de medida de la temperatura corporal). Así pues, la exactitud de un termómetro clínico debe verificarse en dos pasos⁸ [8]:

- Comparando su indicación de temperatura (en modo no ajustado o directo) con la de un termómetro de referencia trazable a patrones nacionales de temperatura. Para un termómetro clínico, la exactitud de la medida puede determinarse correctamente en condiciones de laboratorio mediante un proceso de calibración. En el caso del TFIR, la calibración se realiza con respecto a una fuente cuerpo negro de referencia diseñada para este fin.

⁸ La validación clínica de los TFIRs solo se describe en [6]. En [7], 5.5.1.1, se establece que los requisitos de exactitud clínica no son aplicables a los termómetros de piel.

- Utilizando métodos estadísticos que comparan la temperatura indicada (en modo ajustado) con la de un termómetro clínico de referencia, que tiene una precisión clínica especificada para representar una temperatura de referencia particular del cuerpo. La exactitud clínica se valida en modo ajustado con un grupo suficientemente amplio de personas [8]. Hay que tener en cuenta que este proceso sólo puede tener un éxito limitado en el caso de TFIRs debido a la fuerte influencia de la emisividad de la piel y la radiación térmica de fondo. Se necesitarán condiciones ambientales muy controladas, con sujetos bien termalizados, para determinar ajustes a los sitios de medida de la temperatura reconocidos clínicamente.

6. Operaciones básicas de funcionamiento

Aquí se resumen una serie de indicaciones que deben seguirse para obtener el mejor funcionamiento de los TFIRs para la medida de la temperatura corporal. Estos consejos provienen de: a) las normas principales que rigen los termómetros clínicos de infrarrojo; b) la experiencia y la práctica del grupo de autores; y c) la experiencia y la práctica de los médicos consultados.

Las normas UNE EN ISO 80601-2-56:2017 y ASTM E1965-98 detallan cuál debe ser el contenido de los manuales de usuario de los TFIR y otros termómetros clínicos. El manual de usuario debe tener información sobre el uso específico del equipo (colocación, pilas, encendido/apagado, limpieza, modos de visualización, etc.). El contenido más importante relacionado con el uso práctico es:

- El lugar de medida (dónde se coloca el termómetro clínico durante la medida, es decir, cerca de la frente en el caso de un TFIR)
- El lugar de referencia del cuerpo que el TFIR intenta inferir (por ejemplo, el interior del cuerpo).
- La duración de la medida y el tiempo entre medidas.
- Rango de medida.
- Exactitud clínica: la incertidumbre que el TFIR pretende alcanzar durante su uso clínico rutinario.
- Si es necesario utilizar una cubierta protectora en el cabezal del termómetro (para los TFIRs, sólo en el caso de termómetros de arteria temporal): instrucciones sobre el uso del termómetro con y sin cubierta.
- Información sobre si el termómetro mide en modo directo o en modo ajustado.
- Información sobre las baterías.
- Información sobre el mantenimiento y calibración.

Deben seguirse una serie de precauciones (además de seguir las instrucciones del fabricante) para reducir la incertidumbre de medida con el TFIR. Éstas se resumen de la siguiente manera:

Precauciones sobre el instrumento:

- El termómetro debe colocarse a una distancia correcta de la piel (normalmente unos pocos centímetros) y el tamaño del objetivo a medir debe ser al menos el doble del FOV especificado por el fabricante. El fabricante debe indicar el rango de distancias en las instrucciones del termómetro.

- El termómetro debe estabilizarse térmicamente durante unos 15 minutos antes de ser utilizado.
- No se debe mantener el termómetro en la mano mucho tiempo durante la medida.
- Para lograr la mayor exactitud posible en medidas consecutivas, se debe esperar un mínimo de 30 segundos entre dos medidas.
- Después de sustituir la batería, se debe esperar a que el termómetro alcance la estabilidad operativa, normalmente al menos 10 minutos.
- El funcionamiento del dispositivo debe comprobarse con una referencia de temperatura trazable conocida si en algún momento el termómetro ha experimentado:
 - temperaturas de funcionamiento fuera de sus temperaturas de trabajo y/o almacenamiento
 - caídas o golpes fuertes;
 - luz solar intensa;
 - contacto directo con agua, si no está bien aislado;
 - niveles de humedad más allá de los especificados para el funcionamiento normal por el fabricante;
 - campos electromagnéticos intensos (p. e. equipos de resonancia magnética).
- El funcionamiento del dispositivo debe comprobarse con una referencia de temperatura trazable conocida después de un cierto período de uso rutinario. Este período suele estar especificado por el fabricante y es esencial para garantizar un funcionamiento continuo fiable del termómetro.
- No se debe utilizar el termómetro en condiciones inadecuadas (aire acondicionado fuerte, polvo, fuentes de calor parásitas o en presencia de fuentes de radiación térmica). La influencia de estas condiciones puede llevar a medidas significativamente erróneas.
- En el caso de los termómetros de arteria temporal, deben utilizarse las cubiertas suministradas con el termómetro para la medida. Hay que tener cuidado de que la cubierta esté bien colocada y no bloquee el campo de visión del termómetro. Si no se utilizan cubiertas desechables, la limpieza de la óptica debe ser estricta.

Precauciones sobre el paciente:

- El sistema vascular de la frente o de la zona de la arteria temporal no debe estar afectado por cambios escleróticos (suministro insuficiente de sangre a la zona de medida).
- La piel debe estar limpia, con una visión clara de la zona objetivo; no debe haber sudor, cremas faciales, maquillaje u otros obstáculos, sombrero, pelo ... Las gafas, algunos tipos de tatuajes, los piercings u otros objetos metálicos pueden distorsionar las condiciones térmicas de la zona medida; en ese caso, sería necesario elegir otro método de medida más adecuado.
- No se debe medir la temperatura inmediatamente después de ducharse, nadar, etc., cuando la frente esté mojada.
- No se debe medir la temperatura de la frente inmediatamente después de que el paciente se haya quitado una prenda que le cubra la cabeza; se debe esperar al menos 10 minutos antes de la medida.
- No se debe medir la temperatura de la frente inmediatamente después de que el paciente entre en la zona de control desde el exterior (por ejemplo, si hace frío en el exterior, es probable que la frente tenga una temperatura significativamente baja) – se debe esperar al menos 10 minutos antes de la medida.

- Si es necesario repetir las medidas para determinar tendencias de temperatura, se debe medir siempre en el mismo lugar, ya que de lo contrario es posible que los valores medidos varíen.
- No se debe medir la temperatura de un bebé durante o inmediatamente después de su momento de lactancia.
- Si existen dudas sobre la temperatura medida (por ejemplo, si no se corresponde con la sensación del paciente), se deben esperar varios minutos y repetir la medida. Como alternativa, se puede utilizar un método clínico independiente

Para su uso en situaciones de salud pública en detección de sujetos febriles y, en general, los médicos prefieren TFIRs ya que no es necesario el contacto cercano con el paciente. Sin embargo, deben seguirse cuidadosamente todas las precauciones enumeradas anteriormente ya que, como se mostrará en la sección 6, algunos de los efectos enumerados pueden tener una influencia significativa en la incertidumbre de la medida.

7. Magnitudes de influencia en la medida e incertidumbres asociadas

La exactitud de un TFIR depende de su capacidad para determinar la temperatura de la piel, de la exactitud del propio termómetro, de su capacidad para inferir la temperatura de un sitio corporal reconocido y de la incertidumbre de la medida cuando se utiliza.

7.1. Capacidad para determinar la temperatura interna del cuerpo humano

En una publicación reciente [13], donde se recopilan y estudian diferentes publicaciones, se concluye que los estudios clínicos realizados (en los que se comparan las medidas con las referencias de la temperatura interna) no respaldan el uso de los termómetros de frente en un entorno clínico para identificar a individuos febriles y, en general, se considera que la capacidad de los TFIR para medir la temperatura corporal interna está fuera de los límites clínicamente aceptables.

Cuando se considera el contexto de la medida, este hallazgo no es sorprendente: la temperatura de la piel depende en gran medida de la perfusión sanguínea de la piel y de las condiciones ambientales. Debido a estos factores, y sobre la base de las pruebas publicadas hasta la fecha, no parece probable que la temperatura de la piel pueda correlacionarse de forma fiable con la temperatura corporal interna.

En la práctica, se necesitan más estudios para evaluar si es posible, en cualquier circunstancia, utilizar los TFIR para determinar de forma fiable la temperatura corporal⁹.

7.2. Comportamiento del termómetro de frente de IR

En general, todos los termómetros de infrarrojos funcionan de la misma manera. En la primera parte de esta sección se describen las incertidumbres a las que están sujetos todos los termómetros de infrarrojos, dadas en el contexto de los TFIRs, y luego se consideran factores adicionales específicos para los TFIRs.

⁹ Sin embargo es posible controlar las tendencias de temperatura con algunos dispositivos de este tipo, si se utilizan en un entorno cuidadosamente controlado.

7.2.1. Especificaciones generales de los termómetros de IR – para asegurar el funcionamiento del termómetro de frente de IR

La norma IEC TS 62492-1:2008 "Industrial process control devices – Radiation thermometers – Part 1: Technical data for radiation thermometers" [13] describe los parámetros metrológicos utilizados para describir las características de un termómetro de radiación y la norma IEC TS 62492-2:2013 "Industrial process control devices – Radiation thermometers – Part 2: Determination of the technical data for radiation thermometers" [14] describe cómo medir estos parámetros. Los parámetros metrológicos que afectan a la precisión de los termómetros IR son:

- **Diferencia de temperatura equivalente al ruido (en inglés, Noise equivalent temperature difference (NETD)):** cómo afecta el ruido eléctrico del instrumento a la indicación de la temperatura; en el caso de un TFIR, suele ser inferior a la resolución, 0,1 °C.
- **Distancia de medida:** la distancia de medida debe estar dentro del rango especificado por el fabricante, dependiendo del campo de visión del termómetro. En cualquier caso, debe fijarse de tal manera que el diámetro del objetivo sea al menos dos veces el diámetro del campo de visión (FOV) especificado por el fabricante.
- **Campo de visión (en inglés, field of view, FOV)** (blanco, zona de medida): zona plana (normalmente circular) del objeto medido del que el termómetro de radiación recibe la radiación.
- **Efecto del tamaño de la fuente (en inglés, size of source effect (SSE)):** variaciones en la lectura de la temperatura del termómetro de radiación al cambiar el tamaño del área de radiación de la fuente observada. Normalmente se expresa como un porcentaje de la señal procedente del objetivo. El SSE está causado por la dispersión y la difracción dentro del sistema óptico del instrumento de medida. Esto puede ser una fuente importante de incertidumbre para los TFIR.
- **Emisividad:** la emisividad de una superficie es la relación entre la radiación emitida por esta superficie y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. En el caso de los TFIRs, la emisividad de la piel puede considerarse entre 0,94 y 0,99, por lo que los termómetros deben ajustarse a esta emisividad. Cualquier diferencia entre la emisividad de ajuste y el valor real de la emisividad de la piel que se mide es una fuente de incertidumbre. La incertidumbre no es ni mucho menos despreciable (del orden de unas décimas de grado Celsius) y depende de la temperatura ambiente: cuanto más alejada esté la piel de la temperatura ambiente, mayor será la incertidumbre.
- **Coefficiente de temperatura:** parámetro que proporciona una incertidumbre adicional en el valor de la temperatura medida en función de la desviación de la temperatura del TFIR con respecto al valor para el que los datos técnicos son válidos, tras el tiempo de calentamiento establecido y en condiciones ambientales estables.
- **Coefficiente de humedad:** parámetro que da la incertidumbre adicional en el valor de la temperatura medida en función de la humedad relativa del aire a una temperatura ambiente definida.
- **Estabilidad a largo plazo:** reproducibilidad de las medidas repetidas a lo largo de un periodo de tiempo prolongado (que puede ser de días, semanas o meses)
- **Estabilidad a corto plazo:** reproducibilidad de las medidas repetidas durante un período de tiempo corto (varias horas)

- **Tiempo de respuesta:** intervalo de tiempo entre el instante de un cambio brusco en el valor del parámetro de entrada (temperatura del objeto) y el instante después del cual el valor medido en el termómetro IR permanece dentro de un límite especificado de su valor final.
- **Tiempo de calentamiento:** tiempo necesario, después de encender el termómetro, para que funcione según sus especificaciones.

Estos parámetros deben determinarse por el fabricante de acuerdo con la norma IEC TS 62492-2:2013 Parte 2, con el fin de asignar un valor de incertidumbre para el termómetro cuando funciona en condiciones casi ideales (condiciones de laboratorio).

Para un TFIR, el error máximo permitido (EMP) establecido en la norma ASTM E1965 - 98 es de 0,3 °C. Todos los parámetros listados en este apartado deberían haberse tenido en cuenta para evaluar valores realistas de los EMPs¹⁰.

7.2.2. Consideraciones adicionales en relación con la asignación de incertidumbres en termómetros de frente de IR

Ensayos de laboratorio con cuerpos negros de referencia

Las normas UNE EN ISO 80601-2-56:2017 y ASTM E1965 – 98 incluyen algunos requisitos para la calibración de los TFIR, con el fin de verificar que la incertidumbre del termómetro está en el EMP de la norma o por debajo de él. La calibración debe realizarse utilizando la cubierta del cabezal sensor suministrada por el fabricante (si existe) y **debe realizarse con la indicación del termómetro en modo directo**⁵.

En el caso de la norma UNE EN ISO 80601-2-56:2017, se establecen los siguientes requisitos para la calibración de un TFIR:

- Uso de una cavidad de cuerpo negro con una emisividad cercana a 1 especialmente diseñada para la calibración de TOIRs (EN 12470-5 (2003) [15], ASTM E1965 - 98 (2016) o JIS T 4207: 2005), inmersa en un recinto isoterma con un volumen de, al menos, 5 litros.
- El recinto isoterma debe tener una estabilidad de temperatura inferior a $\pm 0,02$ °C y una homogeneidad de $\pm 0,01$ °C.
- Uso de termómetros de referencia calibrados, con trazabilidad metrológica, y con una incertidumbre expandida de calibración ($k = 2$) inferior a 0,02 °C.
- La incertidumbre expandida de la temperatura de radiación de referencia del cuerpo negro debe ser inferior a 0,07 °C¹¹

En el caso de la norma ASTM E1965 – 98, los requisitos son:

- Uso de la cavidad especial de cuerpo negro prevista en el anexo A1 de la norma, inmersa en un recinto isoterma con un volumen de, al menos, 2 litros.
- El recinto isoterma debe tener una estabilidad de temperatura inferior a $\pm 0,03$ °C.

¹⁰ Los termómetros deben estar etiquetados con una marca regional (por ejemplo, la marca CE en Europa) para advertir a los usuarios de que se ha comprobado adecuadamente su conformidad con las normas apropiadas.

¹¹ Esta incertidumbre incluye las componentes procedentes del termómetro de referencia de contacto, del baño de líquido y de la emisividad del cuerpo negro insertado en el baño de líquido. Si se siguen las referencias EN 12470-5, ASTM E1965 - 98 o JIST se puede considerar que la emisividad del cuerpo negro es de aproximadamente 1,0.

- Uso de termómetros de referencia calibrados, con trazabilidad metrológica y con una incertidumbre expandida de calibración ($k = 2$) inferior a $0,03\text{ °C}$, colocados en el líquido cerca de la cavidad del cuerpo negro.

Ensayos adicionales para confirmar el funcionamiento con seres humanos

Además de la validación/calibración en el laboratorio descrita anteriormente, es necesaria una validación clínica para cumplir el EMP [8]. Los ensayos de exactitud clínica tienen por objeto evaluar la exactitud de las compensaciones instrumentales incorporadas y el funcionamiento de un TFIR en su intento de representar la temperatura de los sitios de medida de la temperatura corporal clínicamente reconocidos de sujetos reales.

Es importante que las pruebas de exactitud clínicas y de laboratorio se lleven a cabo de forma rigurosa para garantizar que el termómetro cumple las especificaciones de funcionamiento requeridas. En [18] se muestra una comparación de diferentes TFIR. Se midieron nueve termómetros (tres tipos), se compararon con normas nacionales y los resultados muestran que, al menos, cinco de ellos estaban muy lejos del rango de exactitud declarado por sus fabricantes, así como del requerido por la norma ASTM. Estas medidas, en combinación con la reciente revisión en [13], indican que para los TFIRs probados, pocos, si alguno, eran adecuados para la medida de la temperatura corporal.

7.3. Incertidumbre del termómetro de frente de IR en su uso clínico

Los TFIRs son propensos a una serie de fuentes de incertidumbre que deben tenerse en cuenta cuando se utilizan. Éstas se enumeran a continuación y las estimaciones de sus valores figuran en la Tabla 1:

- **Resolución¹²**: cada vez que se realiza una medida hay que tener en cuenta la resolución del termómetro. La resolución de un TFIR suele ser $0,1\text{ °C}$.
- **Repetibilidad¹¹**: la desviación típica de las medidas, si se toma más de una lectura.
- **Efecto del tamaño de la fuente (SSE)/efecto de la distancia**: la temperatura medida de un blanco a temperatura constante varía en función del tamaño dicho blanco. Debido a esto, los TFIR deben utilizarse lo más cerca posible de la superficie de la piel para conseguir un tamaño mínimo del blanco donde se realiza la medida. En [18], manteniendo una distancia fija al blanco (5 mm), para recibir el 98% de la radiación procedente del mismo, se requería un tamaño mínimo del blanco entre 11 mm y 19 mm . Estas áreas son más grandes de lo deseable en la práctica clínica. Como ejemplo, en un estudio checo de varios TFIRs [19], al medir diferentes tamaños de blanco, la diferencia del valor medio de la temperatura indicada fue de $0,2\text{ °C}$. **En general, los TFIRs tienen características de SSE relativamente inadecuadas y se utilizan en un rango de distancias bastante amplio. Si no se respeta la distancia de uso indicada por el fabricante, es fácil que se produzcan incertidumbres de varios grados Celsius.**

La distancia al blanco está relacionada con el SSE porque, al aumentar la distancia, se reduce el ángulo sólido subtendido por un blanco de diámetro fijo. En consecuencia, a medida que aumenta la distancia al blanco, la lectura de la temperatura se desvía cada vez más de la temperatura real del blanco (en climas templados, esto significa que el TFIR casi siempre leerá un valor inferior al verdadero). Los resultados de [18] muestran que la magnitud del efecto

¹² Se debe incluir la desviación típica de las lecturas repetidas o la incertidumbre de la resolución, la que sea mayor.

de la distancia combinada con el SSE puede ser muy grande, causando un cambio en la lectura de la temperatura de hasta 8 °C (para uno de los tipos de termómetros probados) al mover el termómetro de 4 mm a 7 mm de distancia de una fuente de 15 mm de diámetro a una temperatura constante de 32 °C. Por lo tanto, un TFIR que toque la sien sería más repetitivo que uno colocado a distancia, pero, por contra, esto anularía la ventaja de que el método sea sin contacto.

- **Condiciones ambientales:** están relacionadas con el efecto de la distancia, la radiación térmica ambiental, la radiación solar, el aire acondicionado, el viento, etc. Para determinar el efecto de las condiciones ambientales, partimos de [20]. La influencia de la radiación térmica ambiental aumenta a medida que la temperatura objetivo es más alejada de la temperatura ambiente. El requisito de medir la temperatura desde una distancia muy pequeña de la frente compensa parcialmente la influencia de las fuentes circundantes. En el caso de algunos termómetros de mejor calidad, el fabricante puede afirmar que los valores medidos se compensan internamente con la temperatura ambiente (la temperatura ambiente se mide mediante un sensor independiente incorporado en el termómetro). Si suponemos que se compensa la influencia del entorno, podemos estimar una variación máxima de $\pm 0,1$ °C. Si el termómetro no está compensado, se estima que el efecto de la radiación térmica ambiental, de acuerdo con [20], provoca errores de 0,3 °C a 0,4 °C (suponiendo una incertidumbre de emisividad de 0,005). Obsérvese también que las condiciones ambientales pueden tener un efecto fisiológico importante en la temperatura de la frente del sujeto, pudiendo disminuir su temperatura en varios grados Celsius si ha estado expuesto al frío inmediatamente antes de la medida.
- **Emisividad:** esta es una cuestión compleja porque, en general, el termómetro compensa la emisividad de la piel con un valor determinado, y también puede intentar corregir la radiación térmica de fondo con un termómetro interno. La determinación de la emisividad de la piel ha sido el objeto de varios estudios clínicos y se han determinado valores que oscilan entre 0,94 y 0,99 [10, 11, 12]. La incertidumbre total de esta determinación está en el rango de aproximadamente (0,002 a 0,005); es decir, del 0,2% al 0,5% del valor de emisividad (valores máximos). Esto da lugar a una serie de contribuciones de incertidumbre (véase el anexo 2): si consideramos $\varepsilon = 0,98 \pm 0,02$ ($u(\varepsilon) = 0,02/\sqrt{3} = 0,012$) y $t_{\text{amb}} = 20$ °C ± 2 °C ($u(t_{\text{amb}}) = 2/\sqrt{3} = 1,2$ °C), la incertidumbre típica para una temperatura medida de 37 °C es de 0,2 °C para un termómetro que trabaje en 8 μm - 14 μm (véase el anexo 1 y 2).

Habría una componente adicional por el equilibrio térmico de la piel – para evitar este efecto, la piel debería dejarse estabilizar térmicamente durante 10 a 15 minutos antes de la medida, y entonces el efecto debería ser pequeño.

- **Influencia de la cubierta de la sonda (variación entre diferentes cubiertas de la sonda):** puede ocurrir que llegue una menor cantidad de radiación térmica al detector debido a la transmisión no ideal de la cubierta de la sonda (termómetros de arteria temporal). No hay estudios publicados para los TFIRs, por lo que nos basamos los resultados de los termómetros infrarrojos de oído (TOIRs) como valor mínimo (0,2 °C) [21]. El valor es cero cuando no se utiliza ninguna cubierta.
- **Calentamiento del termómetro cuando se sostiene en la mano y por el flujo de calor de la fuente:** dependerá del diseño del termómetro (si tiene o no regulación interna de la temperatura del sensor). No existen estudios para los TFIRs, por lo que utilizamos los resultados de los TOIRs como valor mínimo (0,4 °C) [21].

- **Homogeneidad térmica del área de medida:** a modo de ejemplo, en un estudio checo [19] ha medido la temperatura después de la estabilización completa del TFIR. El paciente estuvo en reposo durante al menos 30 minutos, su frente no estaba expuesta a ningún flujo de aire ni a otras perturbaciones y no estaba cubierta de sudor y el suministro de sangre a su frente no estaba afectado por ningún proceso esclerótico. Como resultado, la mayor variación de temperatura en la piel de la frente fue 0,2 °C (determinada a partir de las temperaturas medias medidas en diferentes puntos de la frente entre las sienes). Es muy probable que esto sea una subestimación en la práctica clínica real, donde la temperatura del paciente se mide generalmente a los pocos minutos de llegar a la sala de evaluación, o la variación puede ser aún mayor si el TFIR se utiliza en un entorno público o en el exterior, donde se han encontrado desviaciones de varios grados en algunos casos.
- **Deriva:** para mantener la exactitud del termómetro siempre es necesario realizar una calibración periódica trazable. El fabricante debe dar información sobre el período de calibración¹³, aunque el intervalo de calibración también puede basarse en la frecuencia de uso. El funcionamiento del TFIR podría ser significativamente erróneo si ha sufrido algún tipo de cambio brusco, como cambios de temperatura fuera de su rango normal de uso, o un choque físico, como una caída al suelo, y debería comprobarse antes de volver a entrar en servicio

Balance de incertidumbres

En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de un balance de incertidumbre (véase el anexo para una información más detallada), cuando se han tenido en cuenta todas las precauciones enumeradas en la sección 6. **No se ha incluido la capacidad del termómetro para medir la temperatura corporal interna o de otros sitios de temperatura corporal reconocidos**, lo que podría ser significativo, ya que actualmente no se han publicado estudios con trazabilidad sobre la evaluación de los sitios de temperatura corporal interna (u otros) y de la temperatura de la frente/piel. Además, se supone que el termómetro tiene modo directo, lo que permite su calibración mediante un cuerpo negro (véase la sección 7).

Tabla 1. Ejemplo de balance de incertidumbre para un TFIR. La incertidumbre total se ha redondeado y se ha dado con el mismo número de decimales que la resolución habitual en este tipo de termómetros (0,1 °C). No se ha tenido en cuenta la influencia de la cubierta porque sólo se utiliza en algunos dispositivos muy especializados (y, en cualquier caso, esta componente sería de sólo 0,2 °C, por lo que el cálculo global no se vería afectado). Hay que subrayar que se trata de la mejor estimación de la incertidumbre: si estos termómetros se utilizan en entornos públicos, la incertidumbre podría ser considerablemente mayor, incluso más del doble.

Componente de incertidumbre	Valor (error máximo) °C	Valor (incertidumbre típica) °C
Norma/calibración inicial		
ASTM E1965 – 98 (2016)	± 0,3	0,3 /√3

¹³ Por ejemplo, uno de los requisitos que debe cumplir el fabricante para obtener el marcado CE con la Directiva 93/42/CEE del Consejo Europeo, de 14 de junio de 1993, relativa a los productos sanitarios (productos sanitarios de clase IIa) es "cuando proceda, el fabricante deberá incluir en el manual de instrucciones indicaciones sobre el uso seguro del producto, incluida la necesidad de realizar calibraciones y/o verificaciones periódicas, a fin de garantizar la fiabilidad de las medidas realizadas".

UNE EN ISO 80601-2-56:2017		
Uso		
Repetibilidad	0,2 (*)	0,2 / $\sqrt{12}$
Efecto del tamaño de la fuente (SSE)/efecto de la distancia	1,0 (**)	1,0 / $\sqrt{12}$
Condiciones ambientales	$\pm 0,1$	0,1 / $\sqrt{3}$
Emisividad	0,2	0,2
Calentamiento del termómetro cuando se sostiene en la mano y por el flujo de calor de la fuente	0,4	0,4 / $\sqrt{12}$
Homogeneidad térmica del área de medida	0,2	0,2 / $\sqrt{12}$
Deriva (al menos, la incertidumbre de calibración)	$\pm 0,3$ (***)	0,3 / $\sqrt{3}$
Incertidumbre expandida ($k = 2$) [$\cong 95\%$ de intervalo de confianza]		0,9 °C

(*) Para 10 medidas realizadas, con una variación máxima de dos veces la resolución.

(**) De [18], el mayor valor obtenido para el TFIR B, Figura 6.

(***) Se ha considerado una deriva igual al EMP.

8. Referencias

- [1] "Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM)". 3ª Edición. Centro Español de Metrología.
- [2] Brengelmann G. L., "Dilemma of body temperature measurement" Shiraki, Keizo and Yousef, M.K. Ed. "Man in stressful environments: thermal and work physiology" Charles C. Thomas, Springfield, IL, 1987, pp 5-22.
- [3] Benzinger M., "Tympanic thermometry in anaesthesia and surgery", *JAMA*, 209, 1969, pp 1207-11.
- [4] Webb G. E., "Comparison of esophageal and tympanic temperature monitoring during cardiopulmonary bypass" *Anaesthesia and Analgesia*, 52, 1973, pp 729-33.
- [5] Brinnel H. and Cabanac M. T. "Tympanic temperature is a core temperature in humans" *J. Therm. Bio.* (UK) 14, 1969, pp 47 – 53.
- [6] Y. Zhou et al "Clinical evaluation of fever screening thermography: impact of consensus guidelines and facial measurement location" *J. of Biom. Opt.*, 25(9), 097002, 2020.
- [7] ASTM E1965 - 98(2016) "Standard Specification for Infrared Thermometers for Intermittent Determination of Patient Temperature".

- [8] UNE-EN-ISO 80601-2-56:2017 “Equipos electromédicos. Parte 2-56: Requisitos particulares para la seguridad básica y funcionamiento esencial de los termómetros clínicos para la medición de la temperatura corporal”.
- [9] Guía de buenas prácticas “Uso de termómetros de oído de infrarrojo para la medida trazable sin contacto de la temperatura del cuerpo humano”.
- [10] F. J. Sanchez-Marin et al “Novel approach to assess the emissivity of the human skin” *J. of Biom. Opt.*, 14(2), 024006, 2009.
- [11] T. Togawa – Non-contact skin emissivity: measurement from reflectance using step change in ambient radiation temperature, *Clin. Phys. Physiol. Meas.* 10 ,1989.
- [12] J Steketee – Spectral emissivity of skin and pericardium, *Phys. Med. Biol.* 18, 1973.
- [13] Bolton S., Latimer E. and Clark D. “is there sufficient evidence to support the use of temporary artery and non-contact infrared thermometers in clinical practice? A literature review. *J. Global Clinical Engineering*, 2-2, 2020, pp 8-16.
- [14] IEC TS 62492-1:2008 “Industrial process control devices - Radiation thermometers - Part 1: Technical data for radiation thermometers”.
- [15] IEC TS 62492-2:2013 “Industrial process control devices - Radiation thermometers - Part 2: Determination of the technical data for radiation thermometers”.
- [16] EN 12470-5:2003 “Clinical thermometers. Part 5: Performance of infrared ear thermometers (with maximum device)”, inactive.
- [17] JIS T 4207: 2005(E) “Infrared ear thermometers”.
- [18] Fletcher T., Whittam A., Simpson R. and Machin G. “Comparison of non contact infrared skin thermometers” *J. Medical Engineering & Technology*, 2018,
<https://doi.org/10.1080/03091902.2017.1409818>.
- [19] J. Vojtíšek, MPM 3.2.3/01/16, Měření teploty bezkontaktními teploměry ve zdravotnictví, 2016, Czech metrology society
(https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj_n8vQrt_tAhUD1hoKHRY4CPEQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fspolky.csvts.cz%2Fcms%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmpm_3230116_lekarske_infrateplomery_0.pdf&usg=AOvVaw1JeByVQ4EYp2VFTrNtkiKY).
- [20] CCT-WG5 on Radiation Thermometry: Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver (2008).
- [21] PUŠNIK, Igor, DRNOVŠEK, Janko. Infrared ear thermometers - parameters influencing their reading and accuracy. *Physiological measurement*. [Print ed.]. 2005, vol. 26, pp. 1075-1084.
- [22] “Evaluación de los datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” JCGM 100:2008. 1ª Edición en español. Centro Español de Metrología.
- [23] P Saunders, “Calibration and use of low-temperature direct-reading radiation thermometers”, *Measurement Science and Technology*, 20, 025104, 2009.

- [24] P Saunders, A Manoi, “Uncertainties in blackbody corrections for low-temperature radiation thermometers”, Metrologia, 57, 024002, 2020, <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab64a9>.

ANEXO1. Modelo matemático y cálculo de incertidumbres

En este anexo se detalla cómo se han estimado los valores de incertidumbre de la Tabla 1.

Durante la medida, se realizan 10 lecturas con un TFIR y la variación máxima observada fue el doble de la resolución. El valor final medido se calcula como la media aritmética (t_{mean}) y se determina la desviación típica del valor medio de la medida (0,06 °C). La resolución del TFIR utilizado para las medidas fue 0,1 °C, inferior a la repetibilidad, por lo que sólo se ha considerado la repetibilidad en el balance de incertidumbre. El TFIR cumple con la norma ASTM E1965 – 98 con un EMP de 0,3 °C y no ha sido recalibrado. Se considera una deriva máxima igual al EMP en un año. (En el caso de que el TFIR hubiera sido recalibrado, se debería considerar la incertidumbre de la calibración, más la corrección si no se aplica, en lugar del error máximo permitido, y la deriva podría calcularse como la diferencia entre calibraciones sucesivas).

El valor de la temperatura medida, t_x , puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$t_x = t_{\text{mean}} + \delta t_{\text{std}} + \delta t_{\text{amb}} + \delta t_{\text{SSE}} + \delta t_{\text{cover}} + \delta t_{\text{heat}} + \delta t_{\epsilon} + \delta t_{\text{hom}} + \delta t_{\text{drift}} \quad (1)$$

donde:

t_{mean} : media aritmética de las mediciones realizadas;

δt_{std} : corrección debida a la repetibilidad del termómetro;

δt_{amb} : corrección debida a la influencia de las condiciones ambientales;

δt_{SSE} : corrección debida al SSE y al efecto de la distancia;

δt_{cover} : corrección debida a la influencia de la cubierta;

δt_{heat} : corrección debida a la influencia del calentamiento al sostener el termómetro en la mano y por el flujo de calor de la fuente;

δt_{ϵ} : corrección debida a la influencia de la emisividad de la piel;

δt_{hom} : corrección debida a la homogeneidad térmica del área de medida;

δt_{drift} : corrección debida a la deriva del termómetro.

Todas las correcciones de (1) suelen ser desconocidas y pueden considerarse nulas, se tienen en cuenta sólo como componentes de incertidumbre. Utilizando la ley de propagación de incertidumbres [22] en (1) y asumiendo la independencia de las variables, se obtiene $u(t_x)$:

$$u^2(t_x) = u^2(t_{\text{mean}}) + u^2(\delta t_{\text{std}}) + u^2(\delta t_{\text{amb}}) + u^2(\delta t_{\text{SSE}}) + u^2(\delta t_{\text{cover}}) + u^2(\delta t_{\text{heat}}) + u^2(\delta t_{\epsilon}) + u^2(\delta t_{\text{hom}}) + u^2(\delta t_{\text{drift}}) \quad (2)$$

donde:

$u(t_{\text{mean}})$ es la incertidumbre debida al EPM, $\pm 0,3$ °C considerado como un error máximo, por lo que utilizando una distribución rectangular calculamos $0,6/\sqrt{12} = 0,3/\sqrt{3}$ como una incertidumbre típica;

$u(\delta t_{\text{std}})$ es la incertidumbre debida a la repetibilidad, en este caso la desviación típica de las medidas, 0,06 °C;

$u(\delta t_{amb})$ es la incertidumbre debida a la influencia de las condiciones ambientales, $\pm 0,1$ °C considerado como un error máximo, por lo que utilizando una distribución rectangular calculamos $0,2/\sqrt{12} = 0,1/\sqrt{3}$ como una incertidumbre típica;

$u(\delta t_{SSE})$ es la incertidumbre debida al SSE, $0,2$ °C considerado como un error máximo, por lo que utilizando una distribución rectangular calculamos $0,2/\sqrt{12}$ como una incertidumbre típica;

$u(\delta t_{cover})$ es la incertidumbre debida a la influencia de la cubierta, $0,2$ °C considerado como un error máximo, por lo que utilizando una distribución rectangular calculamos $0,2/\sqrt{12}$ como una incertidumbre típica;

$u(\delta t_{heat})$ es la incertidumbre debida a la influencia del calentamiento al sostener el termómetro en la mano y por el flujo de calor de la fuente, $0,4$ °C considerado como un error máximo, por lo que utilizando una distribución rectangular calculamos $0,4/\sqrt{12}$ como una incertidumbre típica;

$u(\delta t_{\epsilon})$: es la incertidumbre debida a la emisividad de la piel, utilizando las ecuaciones del Anexo 2, con $\epsilon = 0,98 \pm 0,02$ ($u(\epsilon) = 0,02/\sqrt{3} = 0,012$) y $t_{amb} = 20$ °C ± 2 °C ($u(t_{amb}) = 2/\sqrt{3} = 1,2$ °C), la incertidumbre típica para una temperatura de medida de 37 °C es $0,2$ °C para un termómetro trabajando en la banda de $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$;

$u(\delta t_{hom})$: es la incertidumbre debida a la homogeneidad térmica del área de medida, $0,2$ °C considerado como un error máximo, por lo que utilizando una distribución rectangular calculamos $0,2/\sqrt{12}$ como una incertidumbre típica;

$u(\delta t_{drift})$ es la incertidumbre debida a la deriva, $\pm 0,3$ °C considerada como un error máximo, por lo que utilizando una distribución rectangular calculamos $0,6/\sqrt{12} = 0,3/\sqrt{3}$ como una incertidumbre típica.

El balance de incertidumbre con el cálculo final se muestra en la Tabla 1 del apartado 7.3.

.

ANEXO 2. Cálculo de emisividad

Asumimos que la temperatura, T_{meas} , mostrada en la lectura del termómetro de frente viene dada por [1]:

$$S(T_{\text{meas}}) = \frac{S_{\text{meas}}}{\varepsilon_{\text{instr}}} + S(T_{\text{det}}), \quad (1)$$

donde $S(T)$ es la función de respuesta señal-temperatura del termómetro (aproximada por la ecuación de Sakuma-Hattori), $\varepsilon_{\text{instr}}$ es la emisividad utilizada para el ajuste instrumental del termómetro, T_{det} es la temperatura interna del detector, y S_{meas} corresponde a la radiación neta en el detector. Esta última viene dada por [23]:

$$S_{\text{meas}} = \varepsilon S(T) + (1 - \varepsilon)S(T_{\text{amb}}) - S(T_{\text{det}}), \quad (2)$$

Donde ε es la emisividad del blanco (la frente), T es la temperatura real del blanco y T_{amb} es la temperatura ambiente. La ecuación (2) corresponde a la diferencia entre la radiación que llega al detector (los dos primeros términos) y la emitida por el propio detector (el tercer término).

Sustituyendo la ecuación (2) en la ecuación (1) se obtiene:

$$\begin{aligned} S(T_{\text{meas}}) &= \frac{\varepsilon S(T) + (1 - \varepsilon)S(T_{\text{amb}}) - (1 - \varepsilon_{\text{instr}})S(T_{\text{det}})}{\varepsilon_{\text{instr}}} \\ &= S(T) + \frac{(1 - \varepsilon_{\text{instr}})}{\varepsilon_{\text{instr}}} [S(T_{\text{amb}}) - S(T_{\text{det}})] + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{\text{instr}})}{\varepsilon_{\text{instr}}} [S(T) - S(T_{\text{amb}})]. \end{aligned} \quad (3)$$

Así, hay dos condiciones necesarias de $\varepsilon_{\text{instr}}$ y T_{amb} para que T_{meas} sea igual a T : (o $\varepsilon_{\text{instr}} = 1$ o $T_{\text{amb}} = T_{\text{det}}$) y (o $\varepsilon_{\text{instr}} = \varepsilon$ o $T_{\text{amb}} = T$). Generalmente, ambas condiciones no se cumplen, por lo que habrá una diferencia entre T_{meas} y T .

Esta diferencia se tratará como una componente de incertidumbre. En el cálculo siguiente se supone que se ha dejado que el termómetro se equilibre con el entorno, de modo que $T_{\text{amb}} = T_{\text{det}}$ (aunque se supondrá que existe una incertidumbre asociada al valor de T_{det}). Además, se supone que la emisividad del blanco (la piel de la frente) varía en un rango determinado [10, 11, 12] con una distribución rectangular.

Los coeficientes de sensibilidad $\partial T_{\text{meas}} / \partial \varepsilon$ y $\partial T_{\text{meas}} / \partial T_{\text{det}}$ se dan en [24].

$$\frac{\partial T_{\text{meas}}}{\partial \varepsilon} = \frac{(AT_{\text{meas}} + B)^2 [S(T) - S(T_{\text{amb}})] [1 - \exp(-c_2 / (AT_{\text{meas}} + B))]}{\varepsilon_{\text{instr}} c_2 A S(T_{\text{meas}})} \quad (4)$$

y

$$\frac{\partial T_{\text{meas}}}{\partial T_{\text{det}}} = - \frac{(1 - \varepsilon_{\text{instr}}) (AT_{\text{meas}} + B)^2 S(T_{\text{det}}) [1 - \exp(-c_2 / (AT_{\text{meas}} + B))]}{\varepsilon_{\text{instr}} (AT_{\text{det}} + B)^2 S(T_{\text{meas}}) [1 - \exp(-c_2 / (AT_{\text{det}} + B))]}, \quad (5)$$

donde A y B son los coeficientes de longitud de onda y ancho de banda de la ecuación de Sakuma-Hattori

$$S(T) = \frac{C}{\exp(c_2/(AT + B)) - 1} \quad (6)$$

La incertidumbre típica combinada $u(T_{\text{meas}})$, está dada por:

$$u(T_{\text{meas}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{\text{meas}}}{\partial \varepsilon} u(\varepsilon)\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{\text{meas}}}{\partial T_{\text{det}}} u(T_{\text{det}})\right)^2} \quad (7)$$

Notar que también hay incertidumbres debidas a las incertidumbres en los valores estimados de A y B , pero son insignificantes. Obsérvese también que, dado que la corrección $T - T_{\text{meas}}$, calculada a partir de la ecuación (3), no se aplicaría durante el uso del termómetro, la incertidumbre expandida total ($k = 2$) viene dada, de acuerdo con la GUM, por:

$$U(T_{\text{meas}}) = 2u(T_{\text{meas}}) + |T - T_{\text{meas}}|. \quad (8)$$

La incertidumbre expandida dada por la ecuación (8) da la incertidumbre en la temperatura de la piel en el momento de la medida y no considera la relación entre la temperatura de la piel y la temperatura corporal interna.