



Universidad Michoacana de San
Nicolás de Hidalgo



Instituto de Física y Matemáticas

Análisis termográfico del proceso de evaporación en soluciones de tensoactivos: hacia nuevas técnicas no invasivas para la caracterización de materiales biológicos

T E S I S

que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en el Área de Física

presenta

Pedro Emigdio García González

Asesor:

Dr Pablo Martínez Torres

Co-Asesor:

Dr. Carlos Villaseñor Mora

Morelia, Michoacán, México

agosto, 2025

A hombros de gigantes

Este trabajo se realizó gracias al apoyo económico de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti).

Junto con el apoyo de la Universidad de Guanajuato (UG) que prestó el equipo necesario para la investigación.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vi
Abstract	vii
1. Introducción	1
1.1. Justificación	4
1.2. Hipótesis y preguntas de investigación	5
1.2.1. Hipótesis principal	5
1.2.2. Hipótesis secundarias	6
1.2.3. Preguntas de investigación	6
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
2. Marco teórico	8
2.1. Termografía infrarroja: fundamentos físicos	8
2.1.1. Contexto histórico	8
2.1.2. Funcionamiento de la cámara de termografía infrarroja	10
2.1.3. Fenómenos de evaporación y transferencia de calor	14
2.2. Tensoactivos y dinámica interfacial	15
2.3. Emisividad de película dependiente de su espesor	18
3. Metodología experimental	26
3.1. Arreglo de termografía infrarroja	26
3.1.1. Configuración general	26
3.1.2. Especificaciones técnicas y calibración	28

3.1.3. Preparación de sustrato y proceso de depósito de muestra	28
3.2. Preparación de soluciones de tensoactivo	31
3.3. Adquisición y tratamiento de imágenes	32
3.3.1. Procedimiento de adquisición	32
3.3.2. Procesamiento de datos y criterios de análisis	33
4. Resultados y discusión	37
4.1. Determinación de la TMC	38
4.2. Proceso de evaporación de una película de solución de SDS	41
5. Conclusiones	55
Bibliografía	57

Agradecimientos

- . A mis padres, Sonia y Pedro, por su apoyo incondicional y ejemplo.
- . A mi asesor Dr. Pablo Genaro Martínez Torres por espacio que me brindo, la confianza que deposito en mi y la amistad que me ofrecio.
- . Al Dr. Carlos Villaseñor Mora, por la ayuda y guía brindada, por su paciencia al explicarme.
- . A los Sinodales, Dr. Gabriel Espinosa Pérez, Dr. Ricardo Becerril Bárcenas, Dr. Luis M. Montes-de-Oca, por su guía y comentarios acerca de este trabajo.
- . A mis amigos y compañeros en el laboratorio Nikte Gómez, Miguel Ceja Morales, Hipolito Venegas Montaña, Juan Gutiérrez León, Mario Ledesma Rodriguez y Elí Chagolla Inzunza, por su ayuda y compañía.
- . A mis profesores del Instituto de Física y Matemáticas, por sus enseñanzas.

Resumen

Proponer nuevas técnicas de diagnóstico, para aplicarse en personas, implica el compromiso de seguir protocolos de intervención autorizados y vigilados por comités de bioética y contar con el apoyo de equipos de especialistas médicos colaborando con especialistas en el área de estudio. Cuando la técnica propuesta, en etapas iniciales, no requiere necesariamente de la intervención en personas, se opta por usar animales o sistemas que modelen el órgano o sistema del cuerpo que se desea estudiar. Una vez que se valida su pertinencia y se conocen sus riesgos y efectos secundarios; y se tiene un protocolo bien estructurado, entonces es posible su validación en personas. Con el presente estudio se buscó entender la fisiología de la película lagrimal del ojo humano, simulando y modelando su funcionalidad bajo condiciones normales y buscando entender cómo diagnosticar la condición de ojo seco bajo la modificación de la estructura de la capa de lípidos. Para ello se diseñó, implementó y armó un arreglo experimental, que consta de un sistema embebido para el control de temperatura de una base diseñada especialmente para colocar muestras de tensoactivos, que se eligieron con base en las propiedades de la capa de lípidos de la película lagrimal. Las muestras de tensoactivos fueron preparadas bajo diferentes concentraciones y se estudió la dinámica de evaporación por medio de la adquisición de secuencias de imágenes de infrarrojo, para la medición de propiedades energéticas de soluciones acuosas de dodecil sulfato de sodio (SDS) en bulto y como películas delgadas, pudiendo extraer relaciones entre la concentración de la solución estudiada y la energía emitida por esta. Con ello se entendió cómo la emisión de energía es afectada por el grosor, distribución y acumulación por zona de los lípidos (tensoactivos), esto permite que en un futuro cercano se pueda validar la técnica de análisis por termografía en personas.

Palabras clave: *Termografía infrarroja, tensoactivos, dodecil sulfato de sodio, evaporación, emisividad*

Abstract

Proposing new diagnostic techniques for use in humans, requires the commitment to follow approved intervention protocols supervised by bioethics committees, as well as collaboration between medical specialists and domain experts. When a technique in its early stages does not require direct intervention in humans, animal or representative systems models are typically employed to approximate the organ or physiological system of interest. Once viability is established, and risks and side effects are understood within a well-structured protocol, validation in humans becomes possible.

This study aims to understand the physiology of the human tear film by simulating and modeling its functionality under normal conditions and pursuing diagnostic strategies for dry eye disease through controlled modifications of the lipid layer structure. To this end, we designed and built an experimental setup comprising an embedded system for temperature control of a custom base that holds surfactant samples selected to mimic the lipid layer properties of the tear film. Surfactant samples were prepared at different concentrations, and evaporation dynamics were investigated via infrared image sequences. This enabled the measurement of energetic properties of aqueous sodium dodecyl sulfate (SDS) solutions both in bulk and as thin films, allowing us to extract relationships between solution concentration and emitted energy. Our results lead us to a better understanding of the thickness, distribution, and lipids (tensoactives) accumulation influence on the energy emission. These findings support the potential of thermographic analysis as a noninvasive diagnostic tool and establish a precedent for near-term validation of the technique in human subjects.

Keywords: *Infrared thermography, surfactants, sodium dodecyl sulfate, evaporation, emissivity*

Capítulo 1

Introducción

El análisis, simulación y modelado previos al estudio y monitoreo de fenómenos físicos son fundamentales para garantizar que las pruebas realizadas permitan una correcta medición, controlabilidad y observabilidad, asegurando que la estabilidad del fenómeno no comprometa la integridad de todo el sistema analizado.

En el caso de aplicaciones biomédicas existe especial interés en que las pruebas de diagnóstico sean eficientes, económicas, rápidas, indoloras y sobre todo no invasivas. Sin embargo, al trabajar en personas el problema de hacer las pruebas in-vitro vuelve muy complicado validar nuevas técnicas de diagnóstico y tratamiento, ya que además de cumplir con los criterios de ética aplicables, como la Declaración de Helsinki, se debe evitar lastimar innecesariamente a los participantes, cuidar los posibles efectos secundarios, y en general estar rodeado de personal médico certificado y con experiencia en el área de estudio.

Por lo anterior, comenzar la validación de una nueva técnica de diagnóstico, debe involucrar primero entender la dinámica, anatomía y fisiología de los aparatos y sistemas del cuerpo humano, proponer modelos matemáticos y arreglos que simulen el funcionamiento lo más cercano posible al real, de modo que se puedan reproducir las condiciones de falla (o enfermedad). Esto puede involucrar desde el uso de animales, hasta como en el caso de este trabajo, el uso de sistemas electrónicos embebidos que simulen el comportamiento de un órgano en condiciones normales como en condiciones de enfermedad; todo esto con el objetivo principal de demostrar que la técnica funciona y que puede ser probada en personas sin causar daño y justificando su efectividad.

El uso de Técnicas no Destructivas (NDT) y no invasivas (NIT) resultan particularmente atractivas. Algunos ejemplos de estas técnicas son: pruebas ultrasónicas, emisión acústica, pruebas de partículas magnéticas, prueba de corrientes Eddy, radiografía industrial, shearografía, interferencia de luz, proyecciones holográficas, tomografías de coherencia óptica,

entre muchas otras [1,2]. Sin embargo, dentro de las NDT y NIT, una que es especialmente atractiva es la termografía infrarroja.

La termografía infrarroja (IRT, Infrared Thermography) es una técnica ampliamente utilizada en diversos campos, incluyendo la industria, la ciencia y la medicina, entre otros [1–7]. En aplicaciones biomédicas, la variación en la emisión de energía y los cambios de temperatura por fenómenos biológicos y manifestaciones clínicas resultan especialmente interesantes de analizar con termografía infrarroja. La radiación térmica emitida por los órganos del cuerpo se puede caracterizar y estudiar con las imágenes adquiridas por cámaras de infrarrojo sensibles en el rango medio, y así descubrir información imperceptible a simple vista, por ejemplo, padecimientos internos como lesiones, fracturas, inflamación o artritis, entre otros [8–12]. La IRT por ejemplo, permite localizar padecimientos sin la necesidad de hacer una auscultación interna de los pacientes.

Dentro de los sistemas que conforman el cuerpo humano, el sistema ocular es uno de los más complejos de diagnosticar y tratar. El ojo es el segundo órgano más complejo después del cerebro, y su fisiología aún no es entendida completamente, por lo que estudiar la dinámica y el funcionamiento de sus partes contribuye al avance del conocimiento.

La película lagrimal está compuesta de 3 capas sobre un sustrato, llamado epitelio de la córnea, éste tiene la cualidad de ser hidrofílico, y está cubierto por una capa mucosa (conocida como capa de mucinas), después se encuentra la capa acuosa y por último la capa delgada de lípidos que se extienden sobre la superficie de la fase acuosa; esta última capa lipídica es la que inicialmente captó la atención de este estudio, debido a que forma parte de la interfaz de la película lagrimal con el aire, siendo desde nuestro punto de vista la más crítica, ya que su alteración conduce a una mala visión.

La composición exacta de la capa lipídica sigue en estudio hasta el día de hoy [13,14]; sin embargo, es ampliamente aceptado que su composición incluye una capa de lípidos polares que interactúan con la fase acuosa y una capa de lípidos no polares expuestos en la interfaz con el aire.

El objetivo de este trabajo fue utilizar la técnica de IRT en el estudio de modelos experimentales semejantes a la película lagrimal, para entender cómo funciona y cómo se afecta su fisiología bajo diferentes condiciones de temperatura, composición y grosor. En particular se estudió el proceso de evaporación de las capa acuosa y de lípidos, ya que el mal funcionamiento de éstas se relaciona directamente con la aparición de enfermedades como ojo seco, muy común entre la población y poco diagnosticada, debido en parte al uso de técnicas invasivas y dolorosas como la tira de Schirmer; en periodos prolongados de ojo seco, la capa de lípidos se deforma y engruesa de una manera poco uniforme, afectando

la calidad de la visión o incluso la calidad de las imágenes de fondo de ojo que se puedan obtener de la persona.

El uso de termografía ayuda a evaluar la tasa de evaporación al estar directamente relacionada con la tasa de enfriamiento de la superficie del ojo. Cuando se parpadea, la lagrime fluye por los ductos excretores de la glándula lagrimal (situados en la cara interna del párpado superior) hacia la superficie ocular regenerando la capa acuosa de la película lagrimal. Este mecanismo además de regenerar la capa acuosa, redistribuye la capa de lípidos limpiando la superficie del ojo y calentándola (el parpado si tiene vasos sanguíneos, la córnea no), este calentamiento y posterior proceso de enfriamiento es posible de analizar por medio de imágenes térmicas, con la manifestación de regiones de diferente tonalidad o nivel de gris, lo cual se atribuye a cambios térmicos en la superficie ocular.

Para entender el proceso de caracterización de la película lagrimal es conveniente entender su estructura. La película lagrimal tiene una composición de 3 capas sobre un sustrato, llamado epitelio de la córnea, con la cualidad de ser hidrofílico, y está cubierto por una capa mucosa (conocida como capa de mucinas), después se encuentra la capa acuosa y por último la capa delgada de lípidos que se extienden sobre la superficie de la fase acuosa. Esta última capa lipídica es la que capta la atención de nuestro estudio, debido a que forma parte de la interfaz de la película ocular con el aire, siendo desde nuestro punto de vista la más crítica, ya que su alteración conduce a una mala visión.

La composición exacta de la capa lipídica sigue en estudio hasta el día de hoy [13, 14], sin embargo, es ampliamente aceptado que su composición incluye una capa de lípidos polares que interactúan con la fase acuosa y una capa de lípidos no polares expuestos en la interfaz con el aire. Dentro de estos lípidos polares, ha sido aceptado que los componentes principales de la subcapa lipídica polar están formados por fosfolípidos, y se asume que estos son los que proporcionan la estabilidad a la interfaz agua-aire y, por lo tanto, a la película ocular.

Sin embargo, el estudio de in-situ de la capa lipídica representa un reto difícil de superar con las técnicas actuales de estudio, por lo cual, nuestro estudio propone el uso de sustancias con moléculas polares, pues son las que tienen la capacidad de interactuar con la fase acuosa. Estas sustancias, conocidas como tensoactivos, poseen una estructura molecular formada por dos regiones: una hidrofílica y otra hidrofóbica.

1.1. Justificación

Los padecimientos del ojo derivados de la alteración funcional de la película lagrimal son muy comunes y poco diagnosticados de manera correcta. Factores como, el alto costo de materiales y consulta médica, al requerir personal altamente capacitado, provocan que muchas personas padezcan de trastornos comunes de la visión como ojo seco y no se traten adecuadamente. Adicionalmente, la mayoría de las técnicas disponibles son invasivas y dolorosas; es aquí donde se propone el inicio de una investigación que aproveche las ventajas de la termografía para diagnosticar alteraciones en la funcionalidad de la película lagrimal, concretamente en las capas acuosa y de lípidos.

La termografía se ha venido usando considerablemente para el estudio de la dinámica de evaporación de la capa acuosa al estar directamente relacionada con el enfriamiento de la superficie ocular, fácilmente observable con termografía. Sin embargo, de la literatura revisada hasta la redacción de este trabajo no encontramos investigaciones sobre el estudio de la capa de lípidos con termografía. Bajo la experiencia de nuestro grupo de trabajo, se considera que la dinámica de dispersión de los lípidos después del parpadeo se puede caracterizar con análisis termográfico.

Se sabe que después del parpadeo los lípidos se redistribuyen, acomodan y reemplazan, por lo que, si la capa es de grosor normal, el proceso dura pocos milisegundos. Si ya se tiene una alteración, esto puede llevar incluso hasta 3 segundos. La manera en que la emisividad, y emisión de energía cambian en este tiempo es la clave para conocer la integridad de la capa de lípidos. Es por esto que se propone el uso de modelos basados en tensoactivos con propiedades polares para entender la interacción de estos con la capa acuosa.

Los tensoactivos tienen la propiedad de formar estructuras de auto-ensamblado, como por ejemplo las micelas, que son estructuras en las cuales la parte hidrofóbica de la molécula se “esconde” dentro del arreglo exponiendo las partes hidrofílicas al medio acuoso.

La formación de micelas se da bajo ciertas condiciones, entre ellas, la concentración de tensoactivo en la solución y la temperatura. Cuando la concentración es adecuada para el ensamble de estas estructuras, se le llama concentración micelar crítica (CMC) y a la temperatura se le llama temperatura micelar crítica (TMC). Para concentraciones iguales o mayores que la CMC se sabe que las moléculas de tensoactivo saturarán la interfaz de la solución.

La propuesta de estudiar el fenómeno de evaporación de la película ocular, es a través de emular las condiciones a las cuales se presenta la evaporación. Para esto se empleó una solución acuosa de tensoactivo dodecil sulfato de sodio (SDS) y se analizó su proceso de

evaporación. Este tensoactivo fue seleccionado, ya que tiene una concentración micelar crítica (CMC) cerca de los 35 °C, que es la temperatura promedio de la superficie del ojo.

Si bien, se esperaría que los lípidos no polares también contribuyan a la radiación efectiva de la película lagrimal, se ha optado por comenzar estudiando un sistema con un solo tipo de molécula, dejando para un trabajo futuro el estudio de la interacción entre diferentes tipos de lípidos.

Esta investigación contribuye significativamente al avance científico en el área de la biofísica ocular y las técnicas de análisis térmico no invasivo. El desarrollo de nuevas metodologías de análisis basadas en termografía infrarroja representa una innovación importante que puede transformar la comprensión de los procesos térmicos en sistemas biológicos complejos.

La relevancia científica de este trabajo radica en la validación del uso de la termografía infrarroja como una técnica precisa y no invasiva para el estudio de cambios de fase en sistemas que simulan la película lagrimal. Esta aproximación metodológica puede establecer las bases para futuras investigaciones en el campo de la oftalmología, proporcionando herramientas analíticas más precisas y menos invasivas.

El desarrollo de técnicas de análisis térmico para películas delgadas de tensoactivos tiene implicaciones que trascienden el campo oftalmológico, contribuyendo al conocimiento fundamental sobre el comportamiento térmico de sistemas coloidales y la detección de transiciones de fase mediante métodos ópticos. Esta investigación puede sentar precedentes metodológicos para el análisis de otros sistemas biológicos complejos donde los métodos invasivos limitan la comprensión de los fenómenos naturales.

1.2. Hipótesis y preguntas de investigación

1.2.1. Hipótesis principal

Usando termografía infrarroja es posible caracterizar los cambios en la emisión de energía de películas delgadas de soluciones acuosas de dodecilsulfato de sodio (SDS), causados por variaciones en la concentración de tensoactivos y los procesos de formación micelar asociados, que simulan la dinámica de acomodación y dispersión de la capa de lípidos polares de la película lagrimal.

1.2.2. Hipótesis secundarias

- Los cambios en la concentración micelar crítica (CMC) del SDS se reflejan en variaciones detectables de la emisividad térmica de la película.
- La emisividad de la película de SDS presenta una dependencia mensurable con el grosor de la película y la concentración del tensoactivo.
- Los procesos de reorganización molecular durante la formación de micelas generan cambios térmicos detectables mediante termografía infrarroja.

1.2.3. Preguntas de investigación

1. ¿Cómo afecta la concentración de SDS a la energía térmica emitida por la película?
2. ¿Es posible determinar la concentración micelar crítica utilizando únicamente análisis termográfico infrarrojo?
3. ¿Qué relación existe entre el grosor de la película de SDS y su emisividad térmica?
4. ¿Cómo influye el control preciso de temperatura en la estabilidad y reproducibilidad de las mediciones termográficas?
5. ¿Qué modelos teóricos describen mejor la relación entre emisividad y concentración de tensoactivos en películas delgadas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Caracterizar las propiedades térmicas de películas delgadas de soluciones acuosas de dodecilsulfato de sodio (SDS) como sistema modelo de la película lagrimal, mediante termografía infrarroja, validando esta metodología no invasiva en el estudio de cambios de fase y procesos micelares en sistemas biológicos complejos.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Determinar la concentración micelar crítica (TMC) del SDS utilizando termografía infrarroja como técnica de análisis principal.
2. Desarrollar un arreglo experimental especializado para el análisis termográfico de películas delgadas de soluciones acuosas de SDS, optimizando las condiciones de medición.

3. Implementar un sistema de control de temperatura preciso que asegure la estabilidad térmica de las soluciones acuosas de SDS durante las mediciones experimentales.
4. Modelar la relación entre la emisividad de la película y su grosor, basándose en modelos teóricos existentes y validándolos experimentalmente.
5. Establecer correlaciones cuantitativas entre la concentración de SDS, los cambios de fase micelares y las variaciones en la emisión térmica detectada por termografía infrarroja.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Termografía infrarroja: fundamentos físicos

2.1.1. Contexto histórico

Se podría asumir que la termografía infrarroja comenzó a inicios de los años 1800, con el descubrimiento de una radiación invisible al ojo humano en un experimento realizado por el físico inglés William Herschel, posteriormente, a esta luz no visible se le nombró infrarroja. Años después (1884), gracias a los trabajos experimentales de Joseph Stefan y el análisis teórico de Ludwig Boltzmann, se desarrolló la conocida ley de Stefan-Boltzmann (2.1.1), la cual nos indica que la energía emitida por un cuerpo es proporcional a su temperatura elevada a la cuarta potencia [15, 16], esto es:

$$E = \varepsilon \sigma A T^4, \quad (2.1.1)$$

donde A es el área efectiva de radiación, σ es la constante de Stefan y ε es la emisividad del objeto, un parámetro con valor entre 0 y 1, siendo $\varepsilon = 1$ la emisividad de un cuerpo negro.

Un *Cuerpo negro* es un objeto teórico, postulado por primera vez por Kirchhoff en 1860 [17] y estudiado a fondo por Max Planck con su teoría de emisión de cuerpo negro [18], que se caracteriza por el comportamiento que este adopta cuando la radiación electromagnética incide sobre él. Cuando la radiación incide sobre el Cuerpo negro, este absorbe toda la radiación, sin importar la polarización, dirección de incidencia o longitud de onda, sin llegar a reflejar ni transmitir energía [19]. Esta característica fundamental establece que un Cuerpo negro perfecto también debe emitir radiación de manera óptima para mantener

el equilibrio térmico.

A pesar de que el Cuerpo negro no existe en la realidad, muchos materiales se aproximan a este comportamiento en ciertos rangos espectrales [20, 21]. Las cavidades con pequeñas aberturas, conocidas como “cavidades de Cuerpo negro”, proporcionan excelentes aproximaciones experimentales.

Por otro lado, gracias a las ecuaciones que llevan su nombre, James Clerk Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas de distintas longitudes de onda, pero todas viajando a la misma velocidad c , cosa que fue corroborada por German Heinrich Rudolf Hertz. Así, comenzó la búsqueda de las leyes que describen el comportamiento de la radiación infrarroja. Una de las primeras aproximaciones formuladas fue la ley de Rayleigh-Jeans, ecuación (2.1.2), la cual trata de expresar la irradiancia del cuerpo negro en función de su temperatura y frecuencia ν , siendo k_B la constante de Boltzmann ($1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) [22, 23]:

$$I(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2 k_B T}{c^3}. \quad (2.1.2)$$

Si bien esta ley describe adecuadamente el comportamiento del cuerpo negro para longitudes de onda, “largas”, falla para longitudes de onda asociadas con mayores energías (consecuencia conocida como la catástrofe ultravioleta) [24]. La corrección de esta ley llegó en 1900 gracias a la derivación de Max Planck, quien postuló que el comportamiento de la luz no se limitaba al comportamiento clásico, sino que el comportamiento de la radiación electromagnética era de naturaleza cuántica, lo cual plasmó en la ley que lleva su nombre:

$$I(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}, \quad (2.1.3)$$

la cual describe de forma adecuada la irradiancia del cuerpo negro para una temperatura dada [25]. Esta ecuación es resultado de considerar que la energía de las ondas radiadas está cuantizada como $h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la onda radiada. Al derivar esta ley respecto a la longitud de onda $\lambda = \nu^{-1}$ y buscando su valor máximo, se obtiene la ley de desplazamiento de Wien (ecuación (2.1.4)), la cual nos da una relación inversamente proporcional entre la temperatura de un cuerpo negro y su máxima longitud de onda:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (2.1.4)$$

donde b es la constante de desplazamiento de Wien ($2.8978 \times 10^{-3} \text{ K m}$). Esta ley nos indica que para fenómenos alrededor de la temperatura ambiente ($\approx 300 \text{ K}$) los objetos tienen su máxima radiación en una longitud de onda cercana a $1 \mu\text{m}$, la cual se encuentra

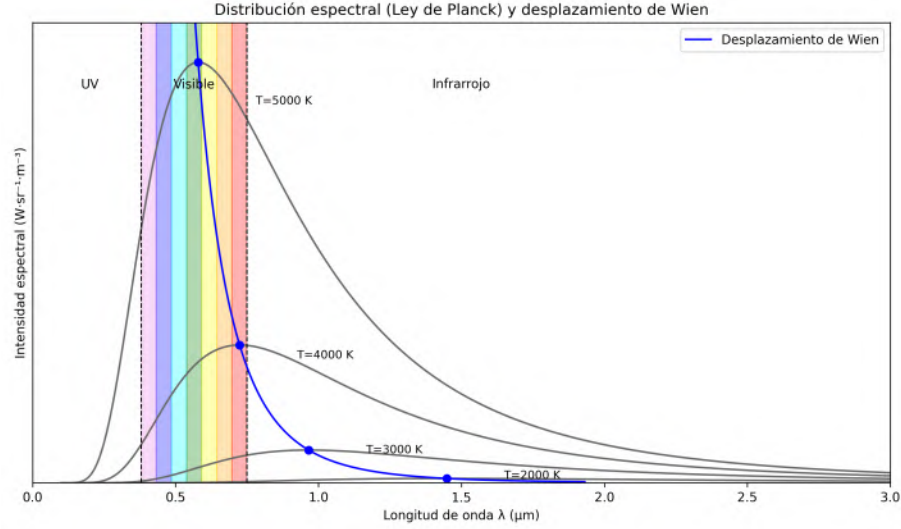


Figura 2.1: Curvas de intensidad espectral a diferentes temperaturas (Ley de Planck) (2.1.3), junto con la curva de la ley de desplazamiento de Wien (2.1.4) (línea azul). [26]

en la banda del infrarrojo, ver Figura 2.1. Por lo cual, el uso de dispositivos capaces de captar imágenes en estas longitudes de onda, invisibles al ojo humano, junto con un posterior análisis, es atractivo para comprender la radiación de los cuerpos debido a los cambios de temperatura externos y cómo esta radiación puede verse influenciada por las características de los diferentes materiales.

2.1.2. Funcionamiento de la cámara de termografía infrarroja

Para comprender el funcionamiento de la termografía infrarroja, es necesario saber, como concepto fundamental, que la radiación infrarroja (IR) forma parte del espectro electromagnético situándose entre la luz visible y las microondas. Abarca longitudes de onda aproximadamente desde 0.75 hasta 1000 micrómetros (μm). Este espectro se subdivide comúnmente en tres regiones principales según la longitud de onda: infrarrojo cercano (NIR), de 0.75 a 1.4 μm ; infrarrojo medio (MIR), de 1.4 a 15 μm ; e infrarrojo lejano (FIR), que se extiende desde 15 hasta alrededor de 1000 μm .

Cada una de estas regiones está asociada con diferentes interacciones físicas y aplicaciones. Por ejemplo, el NIR se utiliza frecuentemente en imagenología biomédica y comunicaciones por fibra óptica, el MIR es fundamental en espectroscopía molecular debido a las transiciones vibracionales de las moléculas y para termografía de objetos a temperatura cercana al ambiente, y el FIR se emplea comúnmente en astrofísica, ya que corresponde a la radiación térmica emitida por objetos a temperaturas bajas o muy lejanas.

Desde el punto de vista industrial, el espectro infrarrojo se clasifica comúnmente en tres bandas principales según la longitud de onda: infrarrojo de onda corta (SWIR), infrarrojo de onda media (MWIR) e infrarrojo de onda larga (LWIR). El SWIR abarca longitudes de onda aproximadamente entre 0.75 y 1.4 micrómetros (μm), y se utiliza en aplicaciones como la inspección óptica, la visión nocturna y el análisis de contenido de humedad. El MWIR cubre el rango de 1.4 a 3 μm , o en algunos contextos extendido hasta 5 μm , siendo especialmente útil en espectroscopía molecular, defensa y termografía de alta precisión. Por su parte, el LWIR se extiende entre 8 y 15 μm (frecuentemente citado como 8–14 μm), y se emplea ampliamente en termografía pasiva, monitoreo ambiental e imagen térmica en condiciones de bajo contraste. Adicionalmente, algunos esquemas incluyen una categoría denominada infrarrojo de onda muy larga (VLWIR), que comprende longitudes de onda superiores a los 15 μm , utilizada principalmente en investigación científica y aplicaciones astronómicas. Esta clasificación está estrechamente relacionada con las denominadas "ventanas atmosféricas", que determinan qué rangos del infrarrojo pueden atravesar la atmósfera terrestre sin ser absorbidos, lo cual es clave para muchas aplicaciones tecnológicas y de detección remota.

La radiación infrarroja está estrechamente relacionada con la temperatura, lo que puede comprenderse a través de la ley de Stefan-Boltzmann y la ley de desplazamiento de Wien. La primera nos da la relación entre la temperatura T , de un cuerpo y la energía de la radiación electromagnética que éste irradia. La segunda ecuación nos indica la relación que tiene la temperatura del cuerpo con la longitud de onda de la radiación de máxima intensidad emitida.

Una cámara de termografía infrarroja funciona esencialmente como cualquier otra cámara que capture imágenes a través de la detección de luz, con la diferencia de que la cámara de termografía infrarroja cuenta con un detector infrarrojo, componente principal de la cámara [27–29]. Las cámaras de termografía infrarroja necesitan de pantallas para la visualización de la escena formada en el detector; dependiendo de la aplicación, estas pantallas pueden estar integradas en el cuerpo de la misma cámara, o requerir una interfaz externa que comúnmente aprovecha el monitor de una computadora [30], como usualmente lo requieren las cámaras de grado científico.

Los detectores, dependiendo de su funcionamiento, se clasifican como fotónicos o térmicos (refrigerados o no refrigerados) (Figura 2.2), de estos, los más comunes son los detectores térmicos no refrigerados basados en microbolómetros. Estas cámaras suelen tener un sistema óptico formado por un sistema de lentes intercambiables, con el propósito de que la radiación incida de forma adecuada sobre el detector.

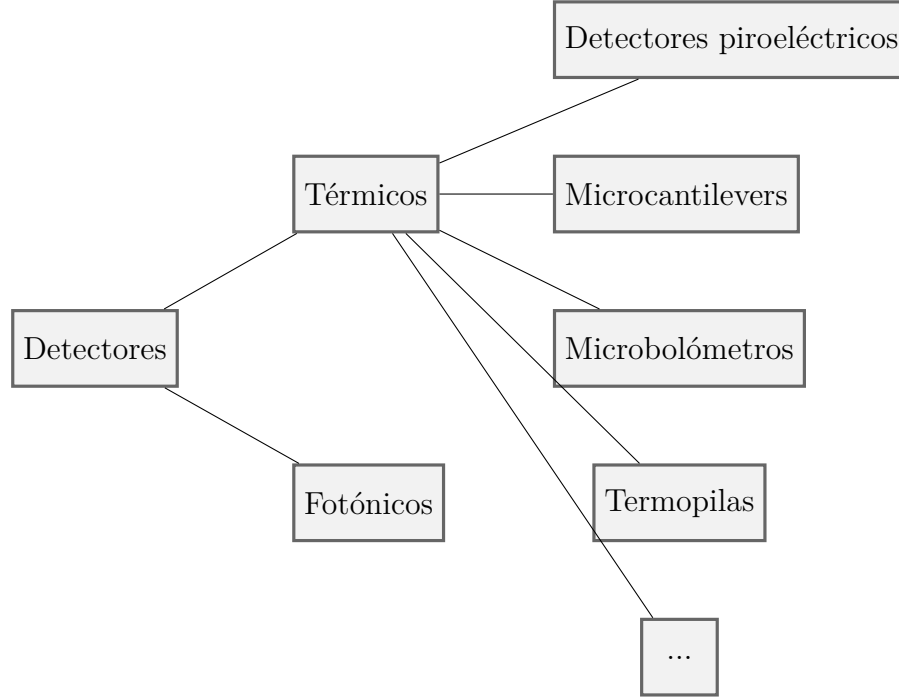


Figura 2.2: Clasificación de detectores de radiación infrarroja.

La energía que el detector recibe para formar la escena, depende mayoritariamente de la temperatura y la emisividad asociada al objeto bajo estudio, ver Ec.(2.1.1), y la convierte en una señal eléctrica; que se transforma en un mapa de energías del objeto.

Los microbolómetros constan de un arreglo de sensores tipo bolómetro, cada uno de estos elementos contiene una capa de material con capacidad de absorción de radiación infrarroja (metal o semiconductor) los cuales, al exponerse a la radiación térmica, cambian su valor de resistencia eléctrica dependiendo de la cantidad de energía térmica absorbida. Este cambio de resistencia es convertido a voltaje por medio de un circuito integrado “read-out” (ROIC por sus siglas en inglés) [31, 32] y este a su vez en una señal digital [33–35]. Un diagrama del funcionamiento del microbolómetro se aprecia en la Figura 2.3.

Los instrumentos de medición infrarroja son usualmente clasificados como radiómetros de espectro completo, aunque estos detecten solo una fracción de la región infrarroja, en particular, los detectores de onda media (MWIR) y los de onda larga (LWIR), basan su funcionamiento en la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación 2.1.1). Comparando la medición con los valores de emisión de cuerpo negro de Planck (ecuación 2.1.3), se puede extraer información del cuerpo medido, por lo que entender el papel que juega la emisividad en la medición es imperativo para realizar un correcto análisis de la señal obtenida representada por la imagen.

La emisividad es la propiedad de la materia de emitir radiación térmica; matemática-

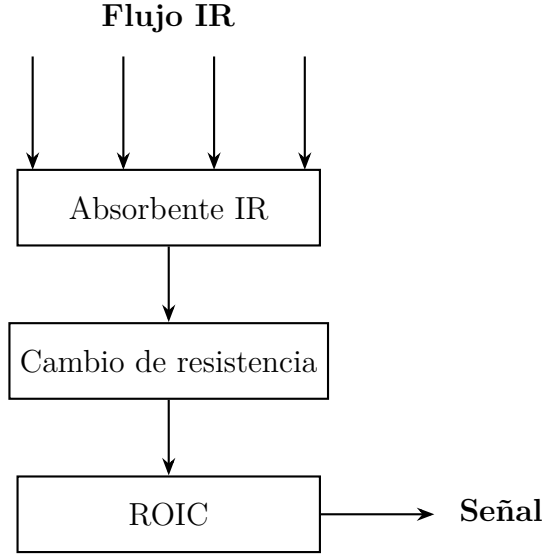


Figura 2.3: Diagrama esquemático del funcionamiento del microbolómetro.

mente se expresa como la razón de la radiación total emitida por la superficie de un cuerpo a una temperatura T , entre la radiación total emitida por la superficie de un cuerpo negro a la misma temperatura [36], como se expresa en la ecuación (2.1.5), donde $E(T)$ es la energía asociada al cuerpo bajo estudio a una temperatura T y E_{BB} hace referencia a la energía emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura T del objeto bajo estudio.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_{BB}(T)}. \quad (2.1.5)$$

En mediciones experimentales, la radiación que detecta la cámara no solo depende de la energía del objeto estudiado, sino que incluye la suma de las energías de la atmósfera, de cuerpos cercanos al cuerpo estudiado, y el ruido de fondo del propio sistema óptico y del detector de la cámara. Un diagrama de esta interacción puede verse en la Figura 2.4.

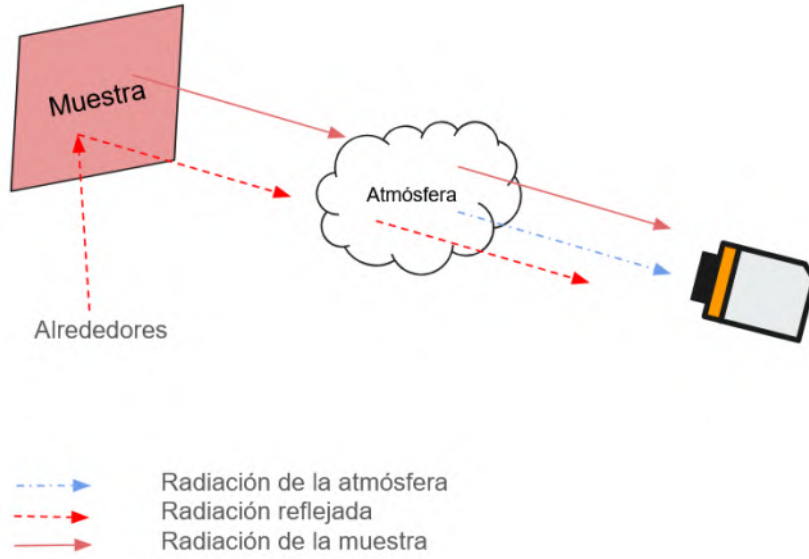


Figura 2.4: Diagrama esquemático de la energía detectada por la cámara IR, donde la energía depende de la muestra (rayo naranja), la atmósfera (rayo azul punteado) y la proveniente del entorno (rayo rojo punteado).

Así, la energía medida por la cámara IR puede expresarse como se ve en la ecuación (2.1.6), donde las constantes A , B y C están relacionadas con las características de la superficie de la muestra, la energía reflejada y la atmósfera entre la muestra y la cámara [30].

$$E_{\text{Detectada}} = A E_{\text{muestra}} + B E_{\text{reflejada}} + C E_{\text{atmosfera}}. \quad (2.1.6)$$

2.1.3. Fenómenos de evaporación y transferencia de calor

La evaporación es un proceso termodinámico en el cual las moléculas de un líquido con suficiente energía cinética escapan del bulto hacia la fase gaseosa, dando lugar a una pérdida de masa y una disminución de temperatura en la superficie. Este fenómeno implica el cambio de fase de una sustancia de líquido a vapor. Este proceso requiere energía en forma de calor latente de vaporización, utilizada para romper los enlaces intermoleculares propiciando el desprendimiento de las moléculas en la interfaz. Como consecuencia directa de la absorción de calor latente de vaporización, se produce una transferencia de calor, principalmente por conducción, desde las capas internas del sustrato hacia la superficie, compensando la energía perdida durante la evaporación en un intento de mantener el equilibrio térmico [37–39].

Durante la evaporación, esta energía es extraída del entorno inmediato a la superficie del objeto bajo estudio, lo que provoca una disminución de la temperatura local. Este enfriamiento superficial puede ser detectado mediante termografía infrarroja, permitiendo visualizar y cuantificar las variaciones térmicas en tiempo real; además de estudiar la dinámica térmica asociada a la evaporación, evaluando indirectamente la tasa de pérdida de masa. Esta herramienta junto con protocolos estandarizados puede llegar a ser muy útil en aplicaciones como la fisiología, la dermatología y la caracterización de películas delgadas, ya que permite relacionar zonas de mayor tasa de evaporación con regiones de mayor enfriamiento, estableciendo un vínculo directo entre el comportamiento térmico y los flujos másicos que se producen en la interfaz líquido-aire [40].

2.2. Tensoactivos y dinámica interfacial

Los surfactantes o tensoactivos son, esencialmente, compuestos químicos anfifílicos, formados de una parte hidrofóbica o también llamada apolar y otra parte hidrofílica, también llamada polar; esta última es capaz de formar enlaces con las moléculas de agua. Un diagrama de esta estructura se puede apreciar en la Figura 2.5. Así, para soluciones acuosas, la estructura anfifílica permite una orientación preferente de las moléculas de tensoactivo en la interfase agua-aire, donde se colocan con la cabeza polar hacia el agua y la cola hidrofóbica hacia el aire, lo cual modifica las propiedades superficiales del sistema [41].

Dependiendo de la naturaleza de la parte hidrofílica, los surfactantes pueden ser clasificados como: aniónicos, catiónicos, no-iónicos y zwitteriónicos. [42–48].

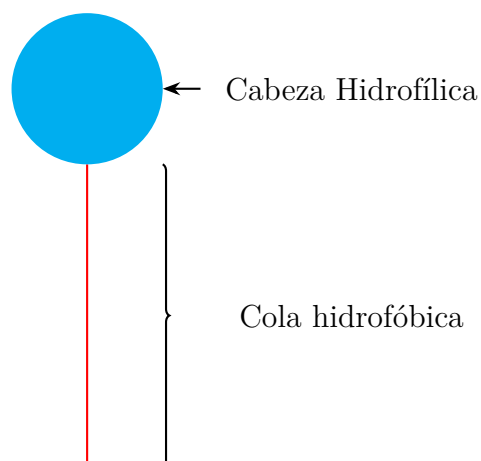


Figura 2.5: Diagrama esquemático del monómero de un tensoactivo.

La naturaleza anfifílica de los tensoactivos permite la organización preferente de las

moléculas de surfactantes en la superficie acuosa. Esto produce la disminución de la tensión superficial debido a la interferencia de las moléculas de surfactante en la red de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua en la interfaz, disminuyendo las fuerzas cohesivas responsables de la tensión superficial [49–52], como se muestra en la figura 2.6.

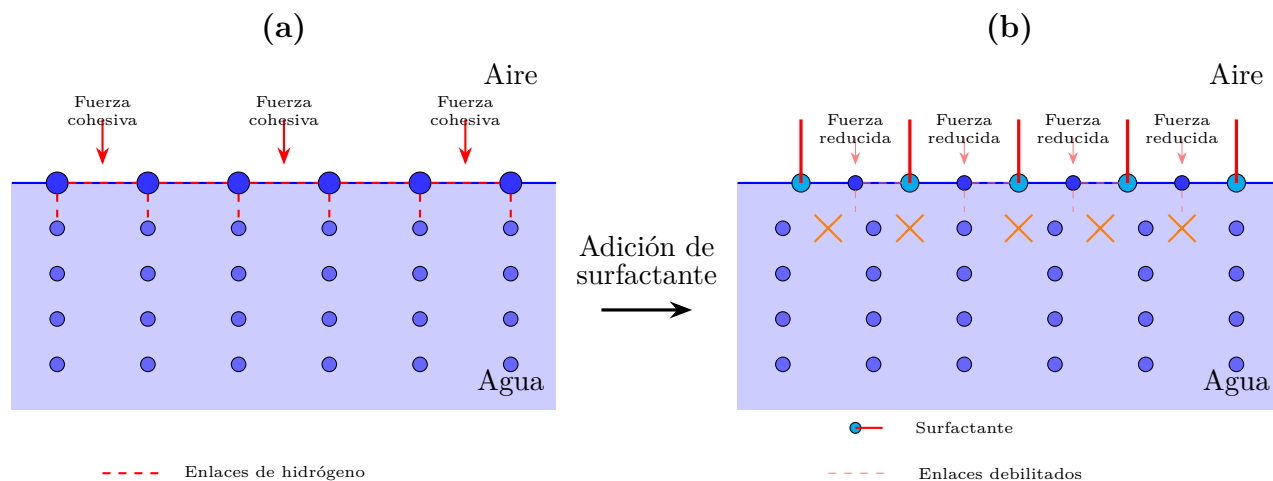


Figura 2.6: Diagrama de reducción de la tensión superficial por efecto de adición de surfactantes. (a) Moléculas de agua interaccionando entre ellas, donde la línea punteada roja indica las fuerzas de cohesión entre ellas. (b) Adición de moléculas de surfactante, donde la cabeza polar interrumpe la red de enlaces de hidrógeno en la interfaz agua-aire, disminuyendo las fuerzas cohesivas responsables de la tensión superficial.

Así, la disminución de la tensión superficial con la adición de surfactantes a la solución acuosa ocurre en varias etapas, bien descritas en la literatura [52–56]: inicialmente, en soluciones con bajas concentraciones de tensoactivo, la tensión superficial cae rápidamente al incrementarse la concentración, debido a la absorción creciente de moléculas surfactantes en la interfaz agua-aire; después, cerca de la concentración micelar crítica (CMC), la superficie queda saturada y el descenso se estabiliza, esto debido al exceso de surfactante que comienza a formar estructuras supramoleculares (micelas) en la fase acuosa (bulto), sin afectar más la tensión superficial. La estructura de la micela es esquematizada en la Figura 2.9. Una gráfica del comportamiento de la tensión superficial respecto a la concentración puede observarse en la Figura 2.7, así como un diagrama de la interacción de los tensoactivos con el agua puede apreciarse en la Figura. 2.8.

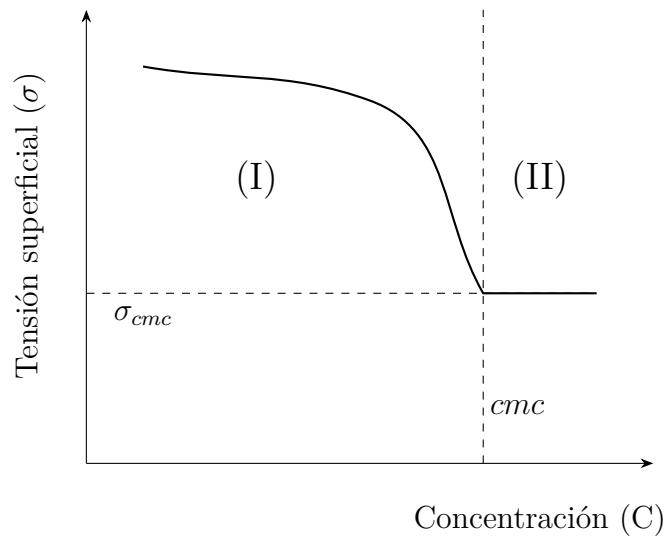
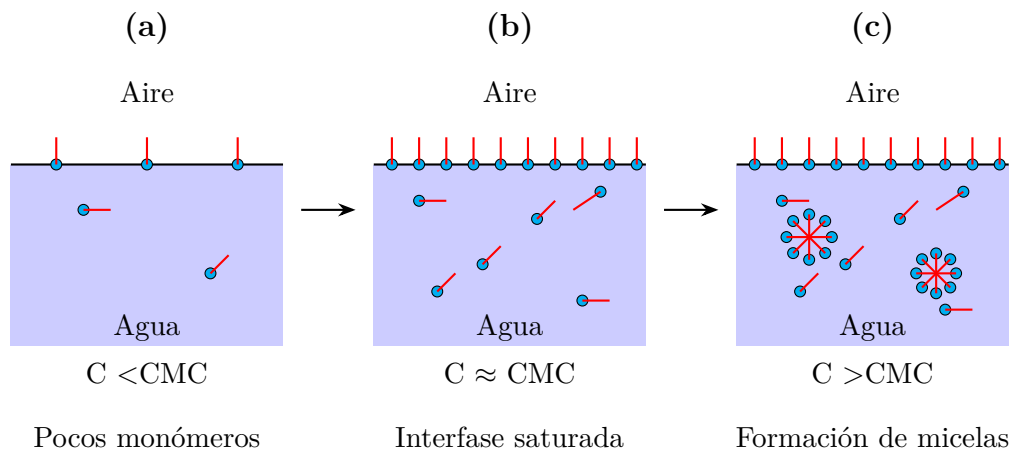


Figura 2.7: Representación esquemática del cambio típico de la tensión superficial σ conforme incrementa la concentración C de surfactante en una solución acuosa. La región (I) la tensión superficial decae conforme la concentración aumenta. En la región (II), una vez que se llega a la CMC la tensión superficial permanece constante.



CMC = Concentración Micelar Crítica

Figura 2.8: Evolución de la concentración de surfactante: desde monómeros dispersos hasta la formación de micelas por encima de la CMC.

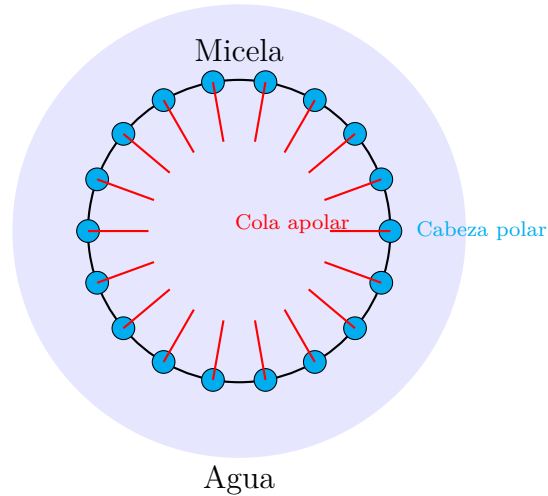


Figura 2.9: Representación esquemática de una micela formada por surfactantes en solución acuosa.

2.3. Emisividad de película dependiente de su espesor

La radiación térmica es un proceso que depende principalmente de las características superficiales del objeto, su estructura topográfica, color (superficies con colores oscuros, en general, presentan mayores emisividades que las de colores claros, aunque el color no tiene influencia directa en el rango LWIR). La emisividad también depende del material del objeto y su temperatura; además de los ya mencionados, la emisividad es influenciada por factores externos, como capas delgadas de polvo, óxido, agua o cualquier material que modifique las características superficiales del objeto.

La medición de la emisividad tiene una dependencia en la dirección y ángulo de medición (en superficies no Lambertianas) junto con la transparencia del cuerpo medido. Así, para películas delgadas, la emisividad varía con procesos que modifican la transparencia del cuerpo, por ejemplo, ganancia de masa (crecimiento de películas) o pérdida de masa (evaporación).

La energía emitida puede incluir emisión del propio cuerpo, re-emisión debido a la absorción previa desde otro objeto, transmisión cuando permite que la radiación pase a través de él y reflexión de la radiación que proviene de objetos que rodean al cuerpo bajo estudio. No obstante, solo una pequeña parte del volumen debajo de la superficie contribuye significativamente al espectro emitido; esta porción de volumen es definido como espesor crítico (t_{cr}).

El espesor crítico es un criterio de discriminación para el comportamiento de la emi-

sividad de una película. Cuando el espesor de la película es mayor o igual que el espesor crítico, la emisividad de esta es comparable a la del cuerpo en bulto o lo suficientemente grueso para evitar transmisión; por otro lado, cuando el espesor de la película es menor que el espesor crítico, la emisividad medida no obedece el comportamiento clásico de la teoría de radiación de cuerpo negro.

Para describir el comportamiento de la emisividad en estos casos, se han usado dos métodos, llamados método indirecto y método directo [21, 57–61]. El método indirecto hace uso de la primera ley de la termodinámica y asume que la ley de radiación térmica de Kirchhoff se cumple para cada diferencial de volumen que conforma la película, lo cual solo es válido en condiciones de equilibrio térmico. Asumiendo que la muestra es iluminada por una fuente externa a ella, se llega a la conclusión de que la emisividad (ε) es matemáticamente igual a la absorptividad (α) y tiene una expresión que depende de la reflectividad (ρ) y transmitividad (τ) de la película ($\varepsilon(T) = \alpha(T) = 1 - \rho(T) - \tau(T)$) [21, 62].

Por otro lado, el método directo propuesto por McMahon [61] divide la totalidad del volumen de la película en elementos radiantes que interactúan entre sí para cada uno contribuir a la energía emitida fuera de la película. Para realizar el análisis del aporte de estos elementos radiantes, se realizó una adaptación de la explicación de [63], considerando un elemento de volumen, inmerso en un medio (m_i), como una fuente de radiación térmica a una temperatura T . Para esta porción de volumen (dV) la radiación es emitida en todas direcciones en el semi hemisferio orientado hacia el punto de observación. O puede decir simplemente: en el emisferio formado alrededor del volumen dV . Si se considera una radiación normal, sea dS un elemento de superficie a una distancia r de dV . De esta forma, sobre dS incide una onda emitida desde dV , como se observa en la Figura 2.10.

Si consideramos la onda emitida con un ángulo perpendicular a la superficie $\theta = 0$, entonces el campo eléctrico $E(y)$ de la onda propagada en dirección $\vec{r}$ se escribe como en la ecuación (2.3.1), con I_i la intensidad de la onda emitida por dV y $\hat{n}_i$ el índice de refracción complejo del medio. Dado esto, la energía $W_i(h)$ emitida por el medio en dirección de $\vec{r}$ es proporcional a la ecuación (2.3.2). La superficie recibe la misma energía desde la dirección $\vec{r}$ que de la dirección $-\vec{r}$, por lo que la superficie se comporta como la fuente de un *Cuerpo Negro*, (BB). Por tanto, se tiene que $W_i = W_{BB}$.

$$E(y) = I_i e^{i\omega t} e^{-i\hat{n}_i \frac{2\pi y}{\lambda}} \quad (2.3.1)$$

$$W_i(h) = \int_{-\infty}^0 |E(y)|^2 dy = \int_{-\infty}^0 I_i^2 e^{\frac{-4\pi y k_i}{\lambda}} dy = \frac{\lambda I_i^2}{4\pi k_i} \quad (2.3.2)$$

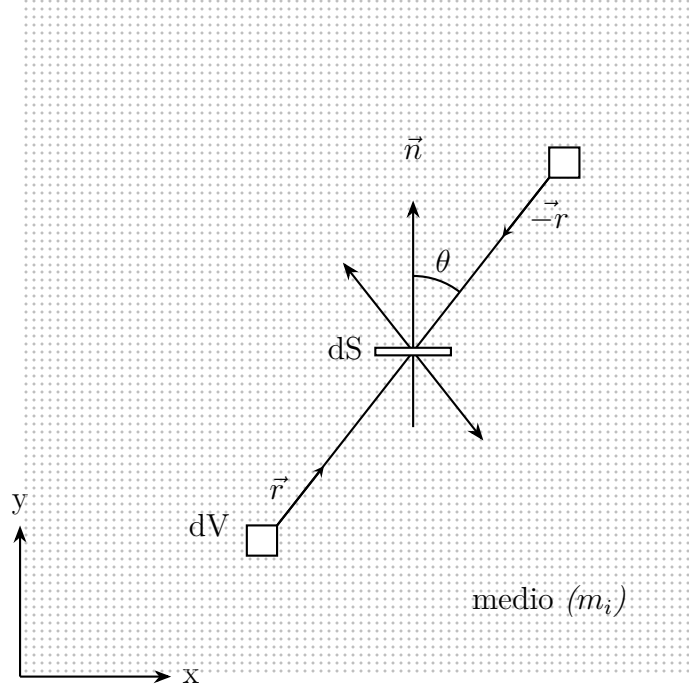


Figura 2.10: Superficie dS en el medio (m_i) . Cada uno de los lados de la superficie dS recibe la misma radiación de dos diferenciales de volumen inmersos en el medio (m_i) . Esquema adaptado de [63].

En el caso de encontrar un cambio de medio, donde una superficie dS se encuentra en la interfase entre un medio m_i y un medio m_j y ésta recibe una onda emitida desde un dV inmerso en el medio m_i y transmite una onda hacia el medio m_j , la descripción de la energía emitida por esta superficie dS , cambia tal como sucede con la refracción de la luz debido al cambio del índice de refracción. Si se emite una onda con energía W_{BB} desde dV , ésta se ve descompuesta en una onda reflejada (E^r) dentro del medio m_i y una onda transmitida (E^t) al medio m_j . Debido al cambio de índice de refracción en la interfaz m_i/m_j , el coeficiente de transmisión de esta onda puede ser descrito a su vez, en términos de los índices de refracción, gracias a las ecuaciones de Fresnel [64], cuya simplificación (para $\theta = 0$) se puede apreciar en las ecuaciones (2.3.3) y (2.3.4). Un diagrama de este proceso se puede apreciar en la figura 2.11.

$$t_{i/j} = \frac{2\hat{n}_i}{\hat{n}_i + \hat{n}_j} \quad (2.3.3)$$

$$r_{i/j} = \frac{\hat{n}_i - \hat{n}_j}{\hat{n}_i + \hat{n}_j} \quad (2.3.4)$$

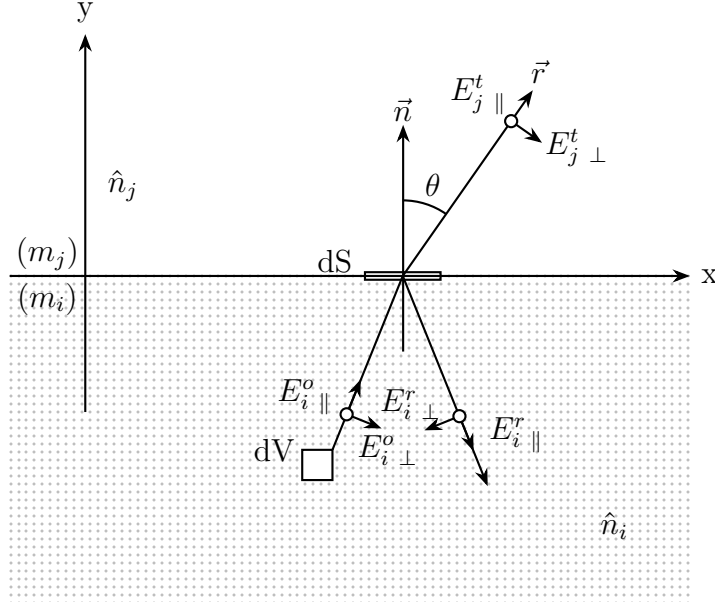


Figura 2.11: Superficie dS en la interfase entre el medio (m_i) y medio (m_j) , donde E^o, E^r, E^t corresponden a las ondas generadas, reflejadas y transmitidas, respectivamente. Los índices i, j indican la pertenencia al medio m_i o m_j y $\parallel, \perp$ a la componente paralelo o perpendicular de la onda generada en dV . Esquema adaptado de [63].

Así, para calcular la energía emitida hacia el medio m_j , se utiliza la expresión de la ecuación (2.3.5), donde $E_i^t = t_{i/j} E_i$, por lo que a partir de las ecuaciones (2.3.5), (2.3.2) y (2.1.5), se calcula la emisividad $\varepsilon_{i/j}$ [63]:

$$W_i(h) = \int_{-\infty}^0 |E_i^t(y)|^2 dy = \frac{\lambda I_i^2}{4\pi k_i} |t_{i/j}|^2 \quad (2.3.5)$$

$$\varepsilon_{i/j} = \Re\left(\frac{\hat{n}_j}{\hat{n}_i}\right) |t_{i/j}|^2 = \frac{4n_i}{(n_i + n_j)^2 + (k_i + k_j)^2} \quad (2.3.6)$$

Para el caso en que la película tenga un espesor menor a t_{cr} , su emisividad puede ser asociada a la emisividad de cada diferencial de volumen (dV) que conforma el cuerpo completo de la película, donde dV actúa como un radiador Planckiano bajo las mismas condiciones de temperatura [65].

La energía total emitida es calculada al integrar la contribución de cada elemento a lo largo y ancho de la película. Sin embargo, en esta primera propuesta, no se toma en cuenta la posible interferencia que se da entre la energía emitida cuando el grosor de la película sea equiparable a la longitud de onda emitida. Esta problemática ha sido abordada por Pigeat et al. [63] modificando el modelo propuesto por McMahon, al aplicar un método

de división de amplitud para considerar la interferencia generada por la luz emitida por los elementos radiantes.

Método directo: Modificación de Pigeat

Para tomar en cuenta la contribución del sustrato, Pigeat hace una modificación del modelo de McMahon, donde propone que la emisividad de la película es resultado de la suma de las contribuciones de la emisividad del sustrato donde se deposita la película y la emisividad propia del material de la película. Cada una de estas, a su vez, depende de la superposición de múltiples reflexiones internas y transmisión de ondas electromagnéticas generadas por la película. Las componentes de estas ondas tienen amplitudes y fases que son resultantes de las interacciones dadas al pasar por las interfases que conforman la película. El proceso se ilustra en las Figuras 2.12 y 2.13, donde se muestra cómo la emisividad de un elemento de volumen del sustrato y de la película, es transmitida y absorbida por los diversos medios. Así, Pigeat propone que la emisividad (de un sistema de tres medios, sustrato, película y ambiente) adquiere la siguiente forma [63]:

$$\varepsilon(h) = Re \left(\frac{\hat{n}_1}{\hat{n}_2} \right) \frac{4\pi k_2}{\lambda I_2^2} W_{21/(3)}(h) + Re \left(\frac{\hat{n}_1}{\hat{n}_3} \right) \frac{4\pi k_3}{\lambda I_3^2} W_{3/(2)/1}(h), \quad (2.3.7)$$

donde el primer sumando de la ecuación (2.3.7), corresponde a la emisividad de la película ($\varepsilon_P(h)$) y la segunda parte a la del sustrato ($\varepsilon_S(h)$). En estas expresiones, $j=1,2,3$, hace referencia al medio: ambiente, película y sustrato respectivamente, y $\hat{n}_j$ es el índice de refracción complejo en el j -ésimo medio, definido como $\hat{n}_j = n_j - ik_j$, con k_j el coeficiente de extinción, que cuantifica la atenuación de la onda debido a la absorción del medio durante la propagación.

De manera análoga, los coeficientes I_j son la intensidad de la onda emitida por el elemento de volumen dV en la película ($j=2$) o sustrato ($j=3$) y λ es la longitud de onda de la radiación. La notación j/i es usada para expresar el efecto cambio en una propiedad debido al paso de la onda por la interfaz entre los medios j e i . Las expresiones $W_{i/j/k}(h)$ son proporcionales a la energía emitida asociada al campo eléctrico, cuya expresión se describe en las ecuaciones (2.3.8) y (2.3.9) para la energía del sustrato y la película respectivamente [63], donde $|E_y|^2 = E_y E_y^*$.

$$W_{3/(2)/1}(h) = \int_{-\infty}^0 |E_3(t, y, h)|^2 dy. \quad (2.3.8)$$

$$W_{21/(3)}(h) = \int_0^h |E_2^1(t, y, h) + E_2^2(t, y, h)|^2 dy. \quad (2.3.9)$$

La ecuación (2.3.10) describe el campo emitido por un diferencial de volumen en el sustrato [66], un diagrama de este proceso puede ser apreciado en la Figura 2.12.

$$E_3(t, y, h) = \{I_3 e^{i\omega t} t_{(2)/1} t_{(3)/1} e^{-i\hat{n}_3 y \frac{2\pi}{\lambda}}\} \left\{ \sum_{j=0}^{+\infty} (r_{(2)/1} r_{(2)/3})^j e^{-i\hat{n}_2 h \frac{2\pi}{\lambda} (2j-1)} \right\}. \quad (2.3.10)$$

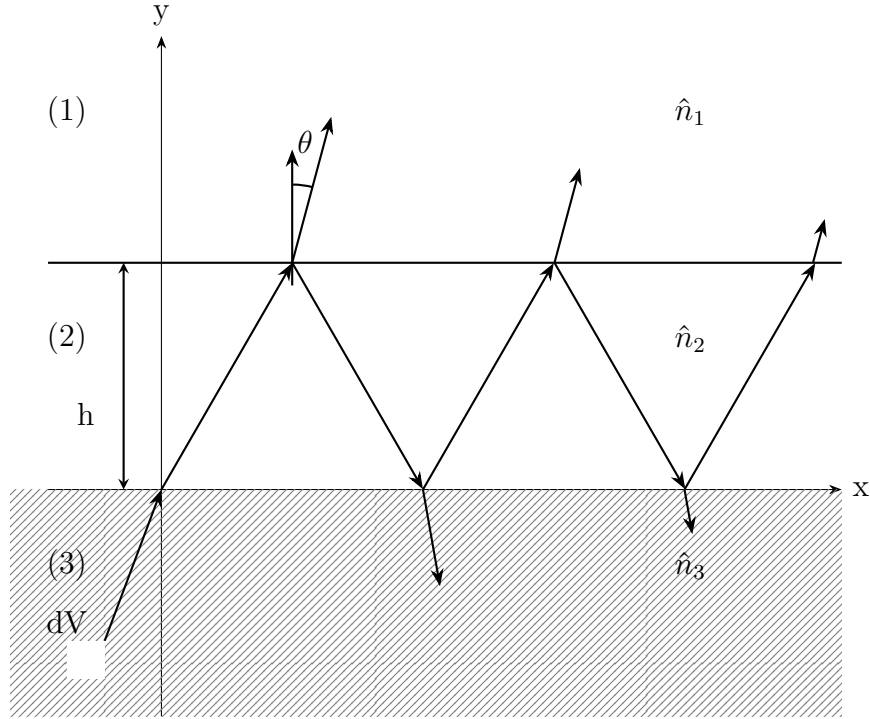


Figura 2.12: Diagrama de la radiación emitida por una porción del volumen del sustrato (3) hacia la película (2) y el medio (1). Esquema adaptado de [63].

Para la película, los campos a considerar son los expresados en las ecuaciones (2.3.11) y (2.3.12)

$$E_2^1(t, y, h) = \{I_2 e^{i\omega t} t_{(2)/1} e^{-i\hat{n}_2(h-y) \frac{2\pi}{\lambda}}\} \left\{ \sum_{j=0}^{+\infty} (r_{(2)/1} r_{(2)/3})^j e^{-i\hat{n}_2 h \frac{2\pi}{\lambda} 2j} \right\} \quad (2.3.11)$$

$$E_2^2(t, y, h) = \{I_2 e^{i\omega t} t_{(2)/1} r_{(2)/3} e^{-i\hat{n}_2(h-y) \frac{2\pi}{\lambda}}\} \left\{ \sum_{j=0}^{+\infty} (r_{(2)/1} r_{(2)/3})^j e^{-i\hat{n}_2 h \frac{2\pi}{\lambda} 2j} \right\} \quad (2.3.12)$$

La Figura 2.13 ilustra la interacción del campo con la película.

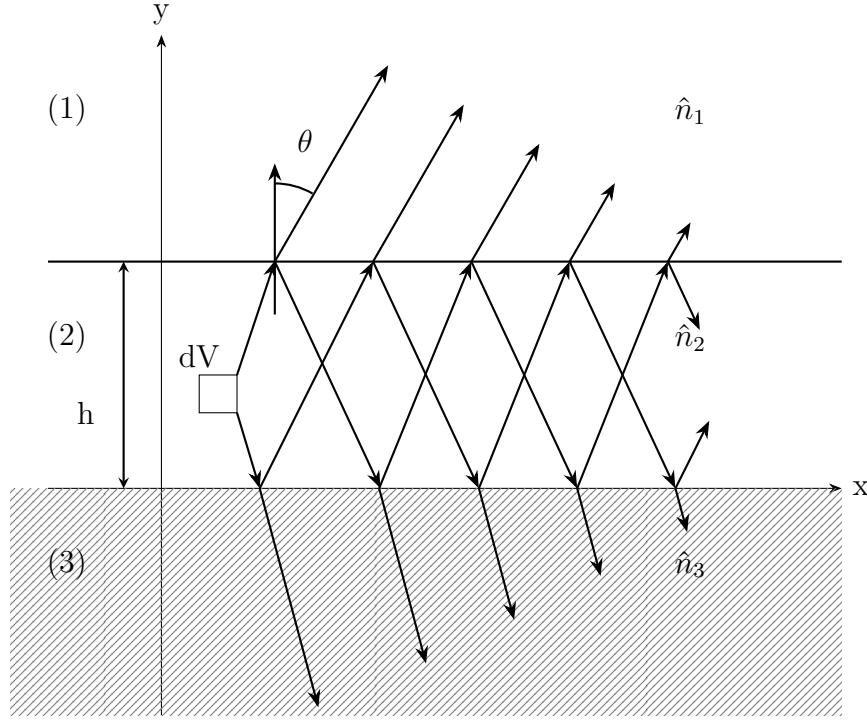


Figura 2.13: Diagrama de la radiación emitida por una porción del volumen de la película (2) hacia el medio (1) y las reflexiones internas.

Dado que la integral sobre y que aparece en las ecuaciones (2.3.8) y (2.3.9) solo operan sobre el paréntesis que multiplica a la sumatoria, tanto en la ecuación (2.3.10), la ecuación (2.3.11) y para la ecuación (2.3.12), al operar, la emisividad del sustrato y de la película se ven simplificadas como se muestran en las ecuaciones (2.3.13) y (2.3.14), respectivamente.

$$\varepsilon_S(h) = \Re\left(\frac{\hat{n}_1}{\hat{n}_3}\right) |t_{21}t_{32}|^2 \left(e^{-2\frac{2\pi}{\lambda}k_2h} \left| \sum_{j=0}^{+\infty} (r_{(2)/1}r_{(2)/3})^j e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}\hat{n}_22jh} \right|^2 \right) \quad (2.3.13)$$

$$\varepsilon_P(h) = \Re\left(\frac{\hat{n}_1}{\hat{n}_2}\right) |t_{21}(1+r_{23})|^2 \left((1 - e^{-2\frac{2\pi}{\lambda}k_2h}) \left| \sum_{j=0}^{+\infty} (r_{(2)/1}r_{(2)/3})^j e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}\hat{n}_22jh} \right|^2 \right) \quad (2.3.14)$$

Estas ecuaciones al tomar los límites cuando $h \rightarrow 0$ y $h \rightarrow \infty$ coincide con los valores encontrados con el método indirecto:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \varepsilon_S = \varepsilon_o \quad (2.3.15)$$

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \varepsilon_S = 0 \quad (2.3.16)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \varepsilon_P = 0 \quad (2.3.17)$$

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \varepsilon_P = \varepsilon_f \quad (2.3.18)$$

Con los valores de $\varepsilon_o = \varepsilon_{31} = \frac{4n_3}{(n_3+n_1)^2+(k_3+k_1)^2}$ y $\varepsilon_f = \varepsilon_{21} = \frac{4n_2}{(n_2+n_1)^2+(k_2+k_1)^2}$, siendo estas, aproximaciones de McMahon para sistemas duales. Un ejemplo del comportamiento de la emisividad bajo el modelo de Pigeat puede apreciarse en la Figura 2.14.

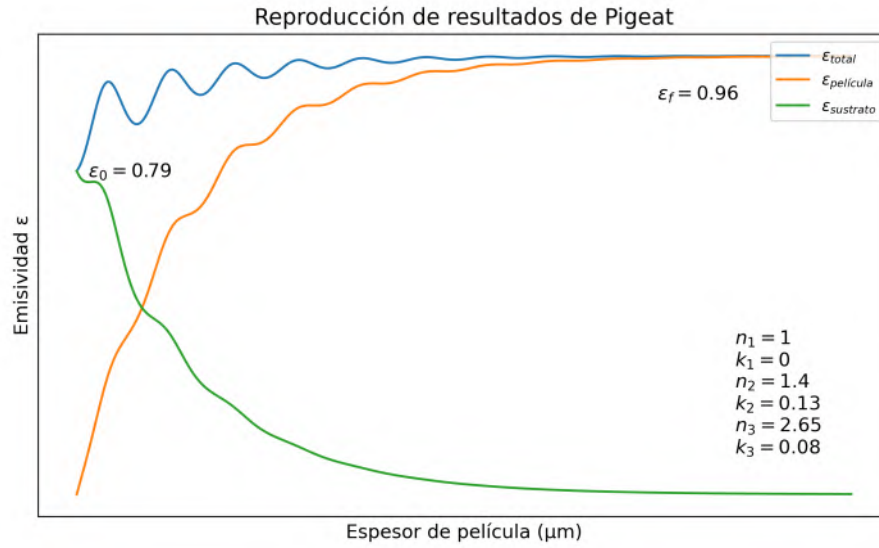


Figura 2.14: Reproducción del resultado de Pigeat [63], donde la emisividad del sustrato disminuye asintóticamente a cero y la emisividad de la película aumenta asintóticamente a la emisividad del bulto cuando $h \rightarrow \infty$.

Capítulo 3

Metodología experimental

En este capítulo se presentan los arreglos experimentales implementados para estudiar el comportamiento térmico del proceso de evaporación de una película de $\approx 200\mu\text{m}$ y la identificación de la transición de fase en función de la temperatura a concentración constante mediante termografía infrarroja.

3.1. Arreglo de termografía infrarroja

3.1.1. Configuración general

El montaje experimental se organiza físicamente en cuatro zonas (Figura 3.1), separadas para minimizar acoplamientos térmicos indeseados. En la Tabla 3.1 se enlistan las características de los elementos del arreglo.

- **Zona A:** Cámara infrarroja *Xenics Gobi+ 640* con lente de 18 mm de distancia focal y anillo compensador, montada a una distancia de 13 cm y alineada con $\theta \simeq 0^\circ$ respecto al plano de la muestra.
- **Zona B:** Placa caliente, porta-muestras (formado por vidrio tratado + cinta de fibra de vidrio de $200\mu\text{m}$ de espesor con perforaciones de 7 mm de diámetro) y prisma de piedra volcánica usada como referencia tipo cuerpo negro para compensar la deriva térmica de la cámara de infrarrojo utilizada (bloque gris en la zona B de la Figura 3.1).
- **Zona C:** Electrónica del control térmico (módulo Peltier, dos termistores NTC de $100\text{ K}\Omega$, circuito PID y bucle de fluido de intercambio térmico).

- **Zona D:** Pre-calentador de la solución para evitar choques térmicos al transferir la muestra.

Tabla 3.1: Componentes principales del arreglo termográfico implementado.

Módulo	Modelo/ Especificación	Función	Parámetros clave
Cámara IR	Xenics Gobi+ 640	Detección	8–14 μm , NETD < 50 mK
Control de temperatura de la muestra	Arduino Mega 2560	Control	PID, Temperatura
Pre-calentador	Arduino Mega 2560	Control	PID, Temperatura

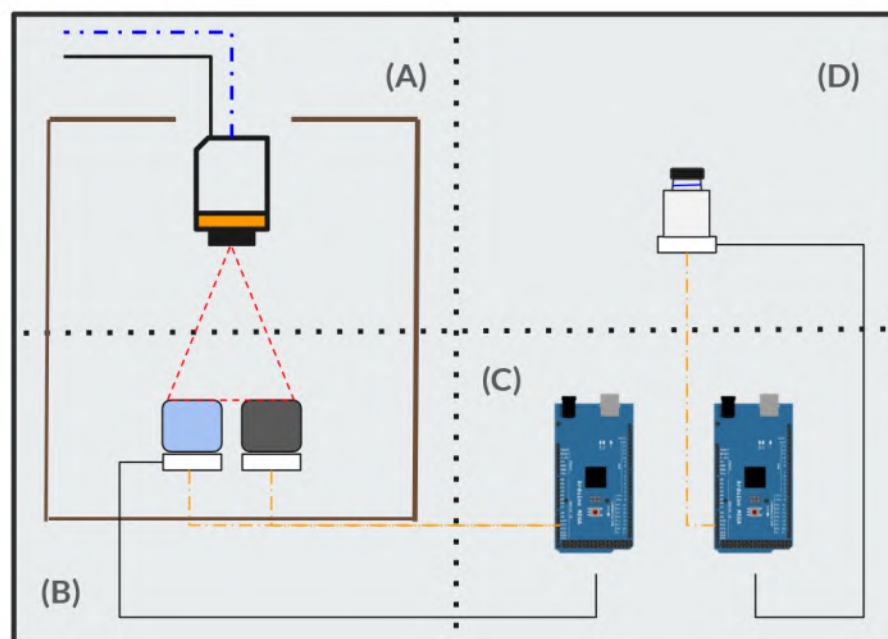


Figura 3.1: Diagrama esquemático de la configuración del banco termográfico con las cuatro zonas principales etiquetadas como (A), (B), (C), (D).

Los experimentos se realizaron en una habitación cerrada, cuya temperatura y humedad se controlaron a lo largo del estudio. Adicionalmente, el arreglo experimental se colocó dentro de un contenedor para evitar reflexiones de señales térmicas no relacionadas con el experimento. Las posibles corrientes de aire por convección natural o forzada dentro de

este contenedor se consideraron despreciables.

3.1.2. Especificaciones técnicas y calibración

A continuación, se describen los detalles técnicos, limitaciones y calibraciones del equipo usado. Empleando la nomenclatura antes mencionada (denotada por zonas), en la Tabla 3.2 se enlistan y describen los componentes según su zona.

Se verificó que el control de temperatura fuera adecuado para cada medición, el cual fue diseñado e implementado logrando una precisión de $\pm 0.01^\circ\text{C}$

3.1.3. Preparación de sustrato y proceso de depósito de muestra

El sustrato sobre el cual serán depositadas las muestras, consistió de un portaobjetos de vidrio que fue tratado hidrofílicamente de acuerdo con los siguientes dos pasos:

- Paso 1: Tratamiento con solución piraña
 - Se preparó 60 mL de solución piraña de acuerdo a la Ref. [67] y en la cual se sumergió el sustrato (portaobjetos) durante 15 minutos.
 - Se enjuagó el sustrato en dos vasos de precipitado con agua desionizada (DI), pasando 5 minutos en el primer frasco, 5 minutos en el segundo y nuevamente 5 minutos en el primer vaso. Por último se secó con aire comprimido.
- Paso 2: Tratamiento con 3-Mercaptopropyl)trimethoxysilane
 - Se preparó una solución 4 mM de 3-Mercaptopropyl)trimethoxysilane en 40 mL de alcohol isopropílico grado reactivo.
 - Se sumergió el sustrato en la solución durante 60 minutos.

El procedimiento descrito arriba crea una superficie hidrofílica como puede ser observado por el menisco formado al depositar una gota de agua sobre un sustrato tratado (ver Figura 3.2).

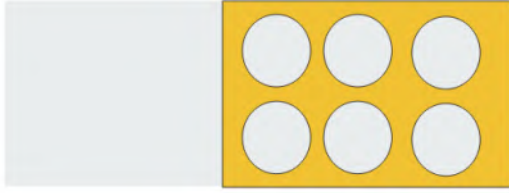


Figura 3.2: Ángulo de contacto de $\approx 18^\circ$ formado por 1 mL de agua sobre el sustrato tratado.

Tabla 3.2: Componentes del sistema experimental con sus especificaciones y rangos de trabajo.

Zona	Componente	Especificaciones	Rangos
A	- Xenics Gobi+ 640	- microbolómetro (a-Si) - # pixeles 640 x 480 - pixel pitch 17 micro - NETD 55 mK a 30°C con lente de F/1 - Operabilidad de pixeles > 99 %	- Banda espectral 8-14 - 16 bits de resolución - Calibración de fábrica
	- Lente Xenics CN 4101-01	- 25 mm - F1	- Plano focal de 10-14 cm
B	- Porta muestras	- Superficie hidrofílica (ángulo de contacto $\sim 18^\circ$) - 6 sitios de deposición de muestras - Capa hidrofóbica delimitadora de muestra	- Volumen por sitio $\sim 7 \mu\text{l}$
	- Placa caliente/control temperatura	- Peltier TEC 12715 - Termistor NTC 100k - Control PID ajuste Lambda	- Variaciones de temperatura $\pm 0.01^\circ\text{C}$ - Resolución de 24 bits
C	- Arduino MEGA 2650	- ATmega2560 - 54 (de los cuales 14 proveen salida PWM) pines digitales de entrada/salida	- 8 bits de resolución escritura PWM
	- Driver BTS 7960	- Voltaje de alimentación (potencia): 5.5V-27V DC	- Corriente nominal 43A (20A recomendada)
	- ADS 1220	- Medición diferencial	- Canales con corriente constantes en rango de 50 - 1500 mA
D	- Baño térmico	- Peltier TEC 12715 - Termistor NTC 100k	- Variaciones de temperatura ± 0.01
		- Control PID ajuste Lambda	- Resolución de 24 bits

Una vez terminado el tratamiento del portaobjetos de vidrio, una cinta de fibra de vidrio con recubrimiento de PTFE con 200 μm de espesor [68] es usada para delimitar seis cavidades circulares de 7 mm de diámetro. La realización de 6 perforaciones en la cinta fue para evaluar la repetibilidad en el experimento. Las perforaciones de la cinta actúan como contenedores que permiten fijar el espesor de la película, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.3a, mientras que en la Figura 3.3b se aprecia una fotografía de su implementación experimental.



(a)

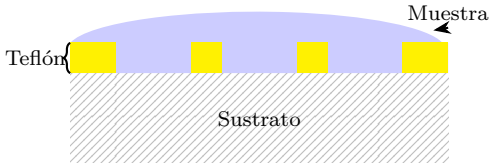
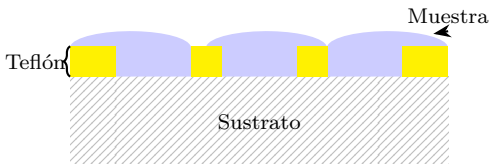
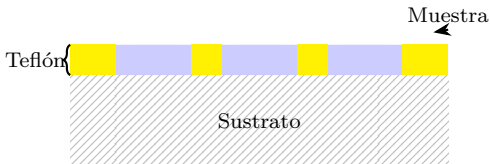


(b)

Figura 3.3: (a) Diagrama esquemático del portaobjetos con la configuración de cavidades construidas en la cinta PTFE. (b) Fotografía del portamuestras montado en el arreglo experimental.

Para el proceso del depósito de la muestra líquida, se hizo uso de la capacidad hidrofóbica del PTFE y del tratamiento hidrofílico del sustrato, siguiendo los pasos descritos en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Procedimiento para la preparación del sustrato: pasos, descripción y guía visual.

Paso	Descripción	Guía gráfica
I	■ Con una micropipeta se toma 500 μL de la solución. ■ Se deposita la muestra sobre el sustrato procurando cubrir los seis sitios, como se muestra en el diagrama de la Figura 3.4.	 Figura 3.4: Diagrama esquemático del depósito de la muestra sobre el sustrato. Vista lateral.
II	■ Retirar cuidadosamente el exceso de líquido con una micropipeta. (Figura 3.5).	 Figura 3.5: Diagrama del resultado del primer retiro del exceso de muestra.
III	■ Retirar el excedente con micropipeta de 10 μL hasta eliminar el menisco. (Figura 3.6).	 Figura 3.6: Diagrama del resultado del segundo retiro de muestra, donde se obtiene una superficie "plana" del líquido.

3.2. Preparación de soluciones de tensoactivo

Las muestras fueron seleccionadas para estudiar soluciones de dodecil sulfato sódico (SDS) en agua desionizada (DI), estas muestras se clasificaron en dos tipos dependiendo de si su medición sería temperatura constante o no, las muestras que se analizaron a temperatura constante variaron su concentración tomando valores en regiones inferiores y superiores a la concentración micelar crítica (CMC) de 8.6 mM a 35 °C [69]. Los valores de las concentraciones usadas se muestran en la Tabla 3.4.

El SDS (Sigma-Aldrich, L3771) se disolvió en agua DI bajo agitación magnética a

100 rpm durante 5 minutos a 25 °C; se verificó la transparencia y ausencia de espuma visible.

Tabla 3.4: Concentraciones de SDS en agua.

Temperatura	Nombre	Concentración (mM)
Constante	C1	0
	C2	2.311
	C3	4.161
	C4	6.068
	C5	8.033
	C6	10.056
Variable	C7	7.8

3.3. Adquisición y tratamiento de imágenes

3.3.1. Procedimiento de adquisición

El protocolo seguido para realizar la adquisición de las secuencias de imágenes en cada corrida del experimento fue la siguiente:

1. Encendido de PC y cámara.
2. Apertura del software Xeneth 2.8 y selección de la cámara Gobi+ 640, como se muestra en la Figura 3.7.
3. Se eligen los valores de Offset y Ganancia en modo manual.
4. Selección de parámetros de frecuencia de captura, Figura 3.8.
5. Calentamiento de la placa a 35 °C (tiempo aproximado de estabilización de 20 min).
6. Colocación del porta-muestras y depósito de la película.
7. Verificación del control térmico a 35 °C.
8. Ubicación de la cámara a 13 cm, con el eje óptico normal a la superficie.
9. Inicio de la captura de la secuencias de imágenes por 20 minutos, capturando un cuadro o imagen cada 500 ms. La captura de la imagen se sincronizó con la lectura de los termistores.

El software Xeneth 2.8 adquiere imágenes en escala de grises con 16 bits de resolución.

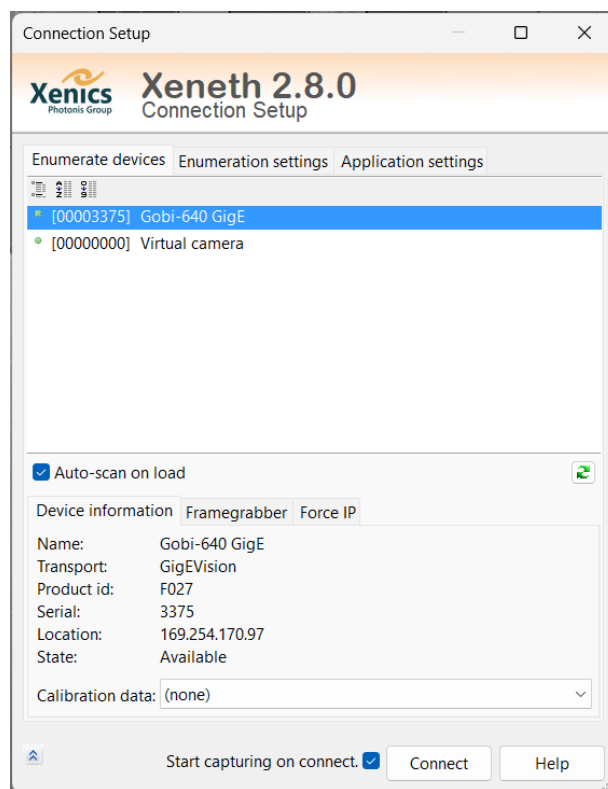


Figura 3.7: Interface para la selección de la cámara Gobi + 640.

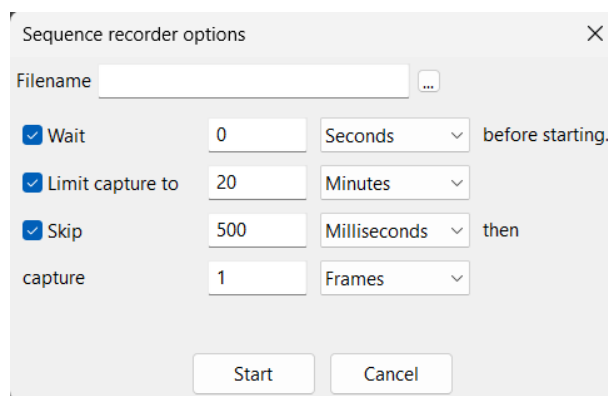


Figura 3.8: Parámetros para ajustar la adquisición de la secuencia de imágenes.

3.3.2. Procesamiento de datos y criterios de análisis

En la Figura 3.9 se presenta una caricatura que representa una imagen visible de la muestra y una imagen termográfica de la misma, donde debido al equilibrio térmico entre el sustrato y la muestra, las imágenes adquiridas necesitan un pre-procesamiento para

compensar su bajo contraste. Este pre-procesamiento se hizo siguiendo el flujo de trabajo descrito de la siguiente manera:

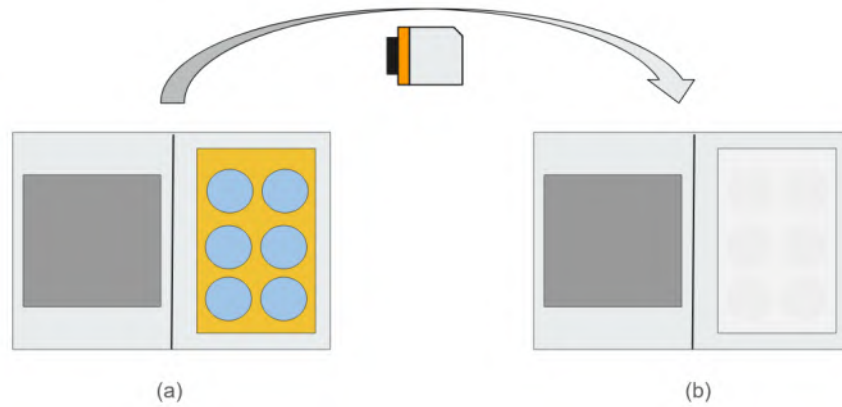


Figura 3.9: Diagrama esquemático del resultado de la captura de imágenes del software Xeneth 2.8. (a) Vista superior del plano de captura en el visible, (b) Vista superior del plano de la energía térmica adquirida por la cámara Gobi + 640.

1. Módulo 0 – Línea temporal

A partir de los metadatos de la imagen capturada, se extrae el tiempo de captura (timestamp). Los valores se almacenan en un archivo llamado `0_time.csv`. Se aplica un criterio de estabilidad lineal a los datos para corroborar que la adquisición sea adecuada y estable, como se muestra en la Figura 3.10.

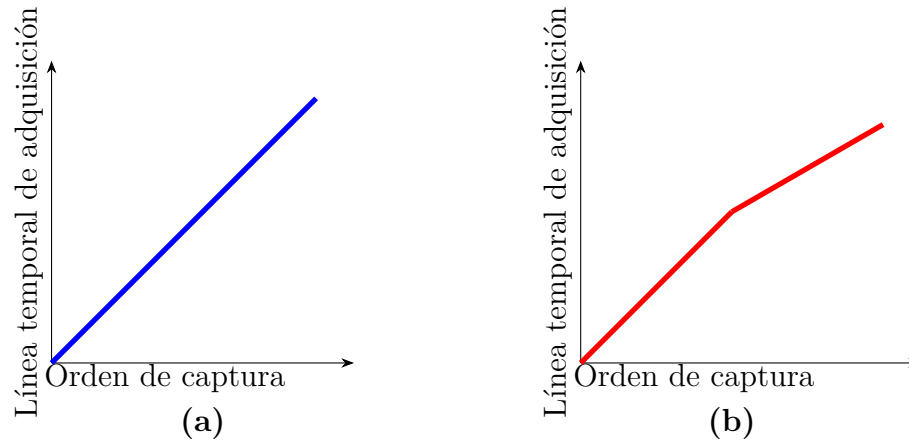


Figura 3.10: Diagrama de estabilidad temporal. Se compara el orden de escritura de las imágenes de 16 bits encontrada desde sus metadatos asociados al tiempo. (a) Comportamiento adecuado de adquisición, (b) comportamiento de adquisición descartado.

2. Módulo 1 – Identificación de RI (Regiones de Interés)

Se duplica la primera imagen de cada corrida y se aplica un algoritmo de realce de contornos (filtrado Sobel [70]) para encontrar los lugares de muestreo. Con las aristas obtenidas se detecta el borde circular de la periferia de la muestra. De esta periferia se calcula el centro de la muestra y las coordenadas de las Regiones de Interés (RI) de área fija. (Ver figura 3.11)

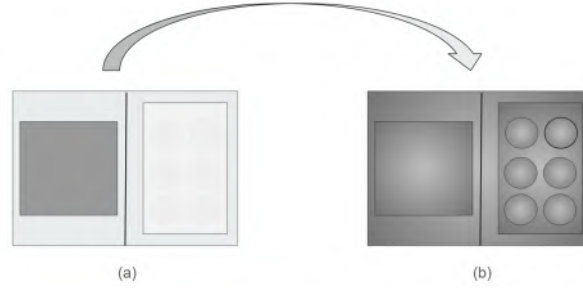


Figura 3.11: Diagrama de funcionamiento de la detección de las RI por medio de algoritmo de detección de bordes. (a) Imagen original a escala de grises de 16 bits, (b) copia de la imagen a la cual se le aplicó el algoritmo de realce de contornos.

3. Módulo 2 – Cuantificación de energía

Con las coordenadas de las RI se calcula la energía promedio en estas regiones (Figura 3.12); se corrige la deriva térmica y se normaliza dividiendo entre la energía promedio de referencia. Los resultados de todas las imágenes se guardan en un archivo CSV asociado a la energía de cada RI.

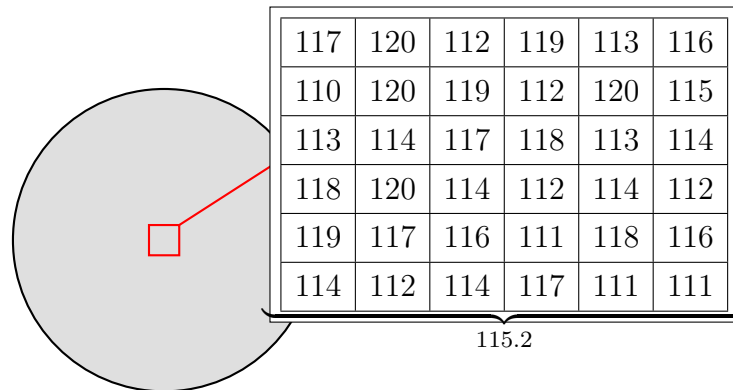


Figura 3.12: Diagrama esquemático de elección del Kernel dentro de la RI, donde se toman los valores asociados a la energía medida.

4. Módulo 3 – Análisis de señal

Se genera un nuevo conjunto de datos de “energía normalizada vs. tiempo” y se aplica un algoritmo de media móvil , tomando un conjunto de tamaño uniforme de 70 elementos [\[71\]](#).

Capítulo 4

Resultados y discusión

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante la investigación. Aunque se decidió no incluir detalles específicos sobre la instrumentación electrónica, el diseño de los arreglos ópticos utilizados y los algoritmos de procesamiento y análisis de imagen desarrollados, es importante mencionar que se requirió de bastante trabajo técnico en el laboratorio para conseguir los resultados aquí presentados.

Una parte fundamental y crucial del trabajo técnico para conseguir una estabilidad térmica de las muestras, fue el diseño y construcción un sistema de control de temperatura basado en un controlador PID. Este sistema requirió el cálculo específico de los coeficientes P, I y D, lo que permitió obtener control y estabilidad térmica en el rango de 10 a 40 °C con una precisión de 0.01 °C.

El desarrollo de este sistema involucró el diseño e implementación de bases adecuadas para garantizar la correcta transmisión de calor entre la placa de calentamiento y la muestra, además del uso de una interfaz previamente elaborada para el control preciso de temperatura del sistema.

Para la adquisición de las imágenes se construyó un arreglo óptico especializado que permite montar la cámara de infrarrojo de manera óptima, evitando reflexiones del entorno y garantizando un enfoque adecuado.

El desarrollo de los contenedores para las muestras líquidas requirió la evaluación de varias alternativas técnicas que incluyeron impresiones en 3D, maquinado con teflón utilizando torno y CNC, y finalmente el uso de cinta de teflón. Después de probar estas alternativas, se determinó que el uso de cinta de teflón, presentado anteriormente, resultó ser la opción más adecuada para los requerimientos del sistema.

Por consiguiente, en este capítulo se presenta únicamente la validación de la técnica desarrollada, el análisis cualitativo de los resultados y la validación del modelo propuesto.

4.1. Determinación de la TMC

Para validar que la técnica de termografía infrarroja tiene la capacidad de percibir cambios de fase, se realizó un experimento utilizando una solución acuosa de SDS al 7.8 mM; la cual tiene su temperatura micelar crítica (TMC) a 25°C [69].

El experimento consistió en analizar una muestra de 1 mL de volumen de la solución de SDS, considerando este volumen como semi-infinito para efectos de pérdida de masa por evaporación. Para llevar a cabo este experimento, se utilizó un arreglo experimental como el descrito en la sección 3.1, modificando el porta-muestra. Este porta-muestras se diseñó para poder contener la muestra de 1 mL. En la Figura 4.2 se puede apreciar un dibujo en CAD del porta-muestras y el arreglo termográfico utilizado para medir la muestra. Se analizó la emisividad de la muestra en un rango de temperaturas de 19 °C a 29 °C, abarcando la TMC reportada.

Para cada medición empleando la cámara térmica, se registró la temperatura de la muestra durante el tiempo de adquisición de las imágenes para corroborar la estabilidad térmica de la misma. Los valores promedios de este registro junto con su variación, se pueden apreciar en la tabla 4.1. Los resultados del control de temperatura se pueden apreciar en la Figura 4.1. El valor del SetPoint se muestra con línea punteada y con círculos el proceso de estabilización de la temperatura empleando un control PID. Dado que las variaciones alrededor del SetPoint son del orden de centésimas de °C, se consideraron despreciables en el proceso de análisis de los datos.

Tabla 4.1: Temperaturas medias de muestreo para muestra de solución acuosa de SDS al 7.8 mM.

Temperatura de Setpoint	Temperatura promedio	Error
19.0	19.00	0.003
21.0	21.00	0.007
23.0	23.00	0.001
24.0	24.00	0.002
25.0	25.01	0.015
26.0	26.00	0.025
28.0	28.00	0.019
29.0	29.02	0.016

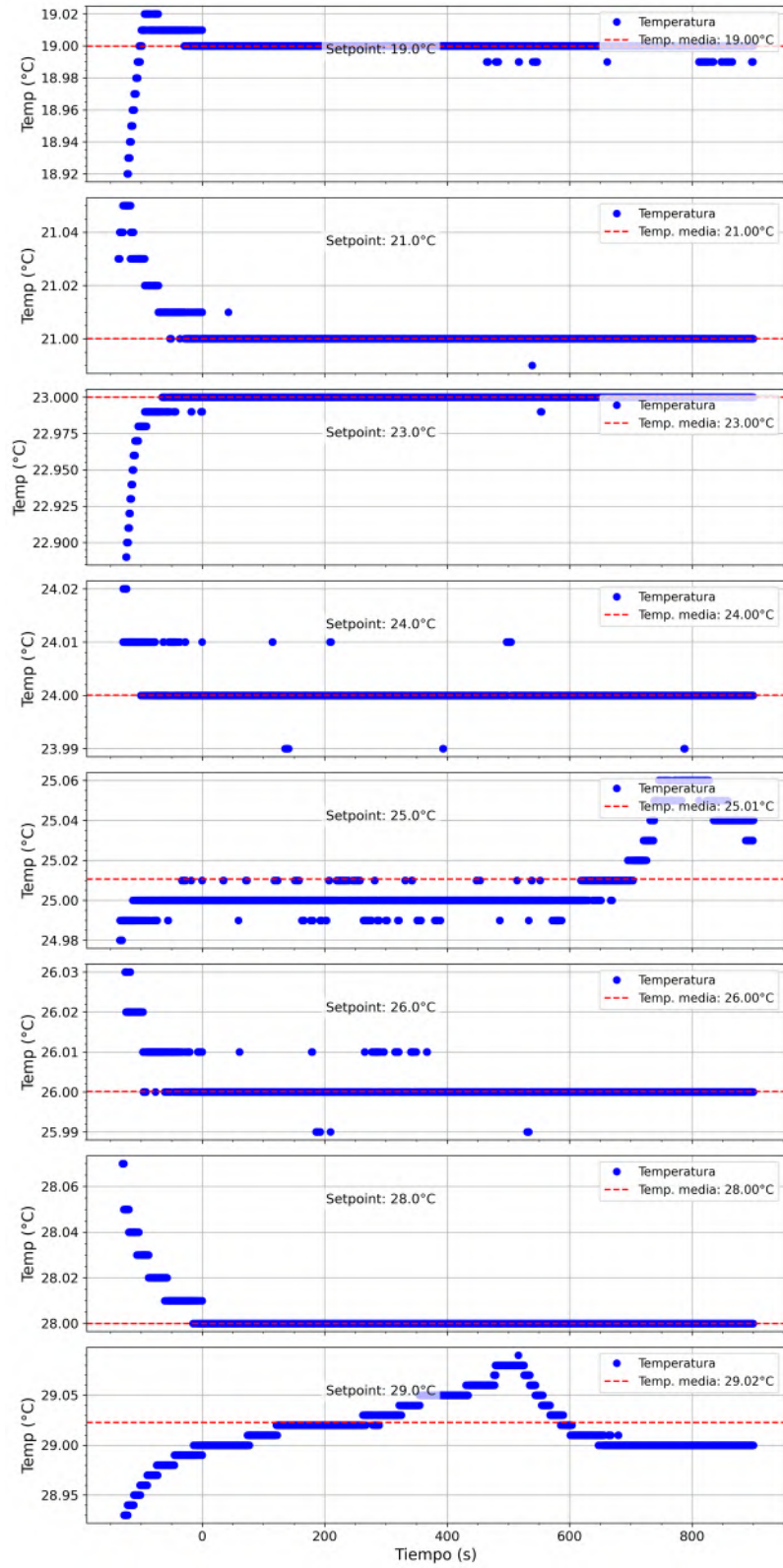
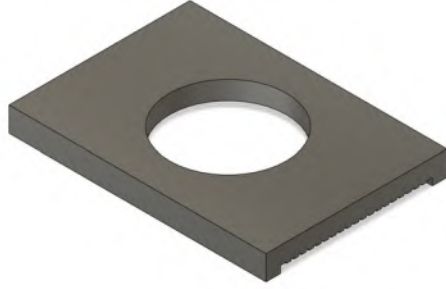


Figura 4.1: Comportamiento térmico de la muestra de SDS a 7.8 mM para las temperaturas de control 19 °C, 20 °C, 21 °C, 23 °C, 24 °C, 25 °C, 26 °C y 29 °C.



(A)



(B)

Figura 4.2: (A) Esquema de porta-muestra de 1 mL diseñado para el experimento. (B) Arreglo experimental con porta-muestras de 1 mL de volumen que contiene la solución acuosa de SDS al 7.8 mM

En la Figura 4.3 se presentan los resultados del experimento para la emisividad relativa en función de la temperatura para la solución de SDS a 7.8 mM.

Como se observa en la Figura 4.3, la emisividad relativa de la muestra cambia respecto a la temperatura siguiendo un comportamiento que hemos modelado con la ecuación (4.1.1), que corresponde a la ecuación sigmoideal de Boltzmann, donde los valores de ε_{min} y ε_{max} son los valores de equilibrio de la emisividad normalizadas con respecto a la emisividad del cuerpo de referencia (ε_C) antes y después de la transición, respectivamente; el valor de T_0 corresponde al punto de inflexión y k es el coeficiente que describe el cambio de emisividad (pendiente) durante la transición.

$$\frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon_C} = \frac{(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})}{1 + \exp(k(T_0 - T))} + \varepsilon_{min} \quad (4.1.1)$$

Ajustando este modelo a los datos experimentales encontramos un valor de $\varepsilon_{min} = 0.53$ para el valor mínimo de emisividad, $\varepsilon_{max} = 1.56$ para el valor máximo, $k = 1.8$ para

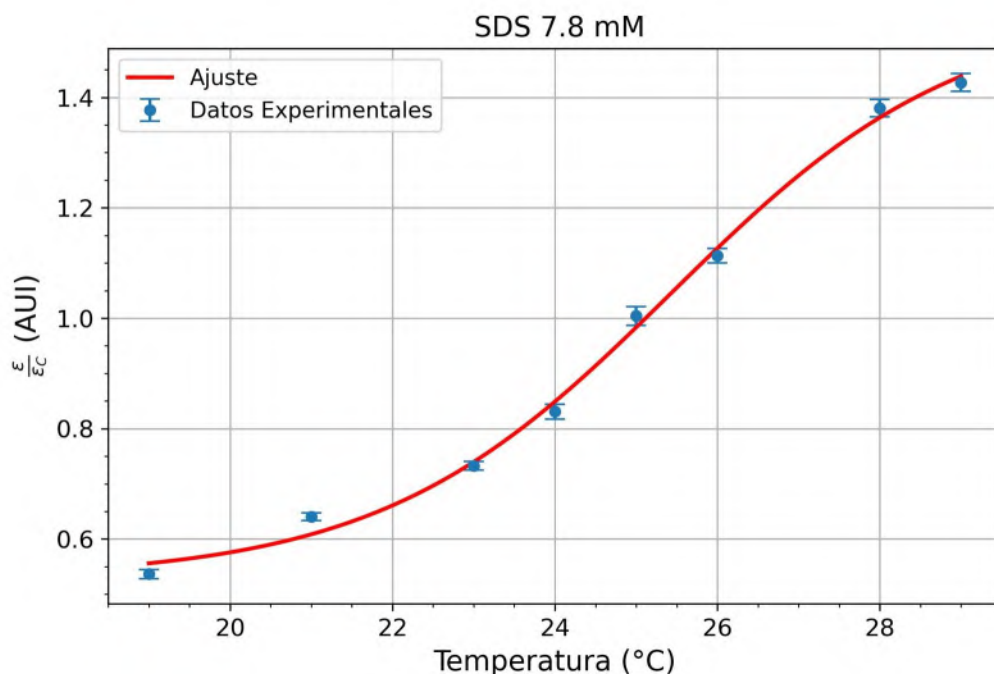


Figura 4.3: Emisividad en función de la temperatura para solución acuosa de SDS a 7.8 mM.

el cambio de emisividad y $T_0 = 25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el punto de inflexión, lo cual se acerca de manera adecuada a la TMC reportada. Aunque no había sido observado anteriormente el cambio de la emisividad térmica de surfactantes en solución, este tipo de comportamiento ya ha sido observado con anterioridad en diferentes variables, tales como el volumen, radio hidrodinámico de agregados y coloración, durante el cambio de fase en diferentes materiales [72,73]. Los resultados demuestran que la técnica propuesta es capaz de detectar el cambio de fase asociado con la formación de micelas en la solución de SDS, validando así su aplicabilidad para el estudio de cambios de emisividad en soluciones de tensoactivos.

4.2. Proceso de evaporación de una película de solución de SDS

Los resultados de la sección 4.1, constituyen una pauta para continuar con la validación de la segunda etapa de investigación de este trabajo, que consiste en los experimentos para medir la emisión de energía térmica de las muestras soluciones de SDS en el rango de concentraciones de 0 mM a 10 mM durante su proceso de evaporación a temperatura constante. Al igual que el experimento anterior, este se realizó controlando la temperatura

a 35 °C durante las mediciones. Un ejemplo del comportamiento típico del control puede ser apreciado en la Figura 4.4.

En la Figura 4.5, se puede apreciar la aplicación del protocolo de deposición de muestra descrito en la Tabla 3.3 de la sección 3.2. Una vez realizado el depósito de la solución en el porta-muestra de una manera satisfactoria, se prosiguió a la captura temporal de las imágenes térmicas durante el proceso de evaporación. Un ejemplo de una captura típica a un tiempo t , se puede apreciar en la Figura 4.6. En la misma figura, se hace una comparación de la imagen original y la imagen a la cual se le ha dado un tratamiento de filtrado para la localización de los sitios de muestreo como se aprecia en la Figura 4.7a, una vez identificados los sitios, se prosiguió a asignar las RI, cuya identificación visual se puede apreciar como rectángulos en la Figura 4.7b.

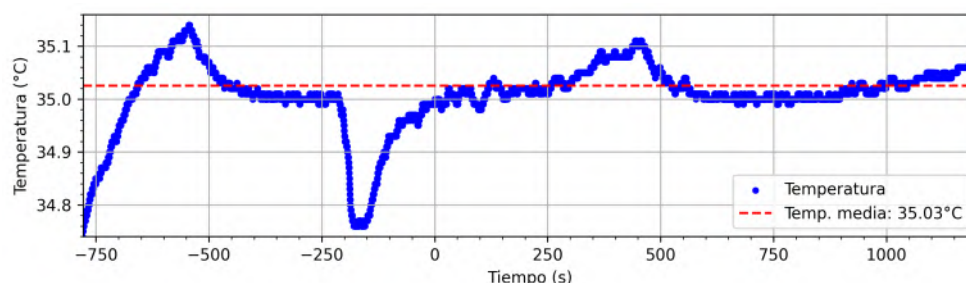


Figura 4.4: Estabilidad de la temperatura de la muestra durante una medición típica.

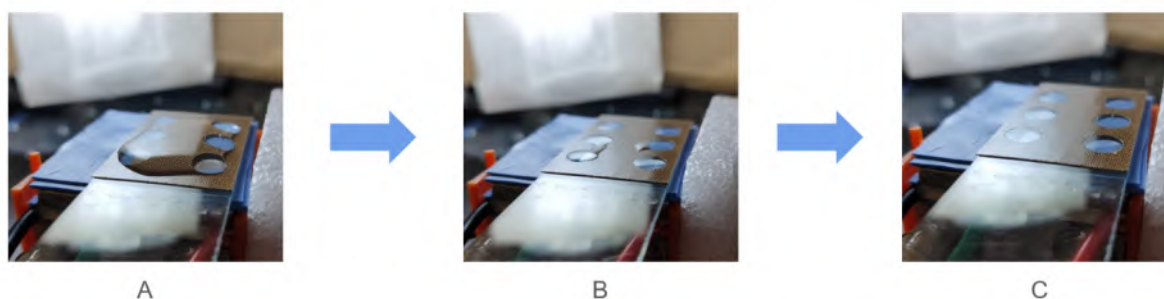


Figura 4.5: Imágenes de aplicación de la muestra sobre el sustrato tratado. A,B y C representan los pasos seguidos según el protocolo 3.3

Un ejemplo de un resultado típico del proceso de evaporación de agua DI para diferentes regiones de interés (RI), puede ser apreciado en la Figura 4.8. Como se puede observar, el comportamiento de la energía térmica de la muestra tiene una fuerte variación oscilatoria en el intervalo de tiempo de 0 ms a aproximadamente 0.4×10^6 ms, mientras que después

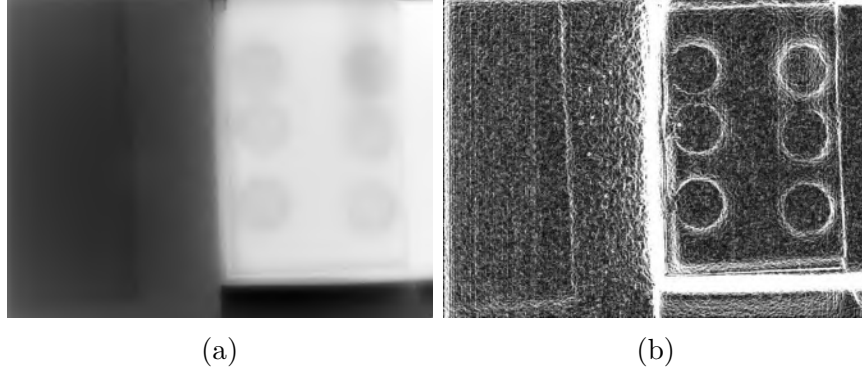


Figura 4.6: Comparativa de las imágenes antes y después de la aplicación del realce de contornos. a) Imagen original en escala de grises de una captura típica. b) Imagen resultado después de aplicar algoritmo de realce de contornos.

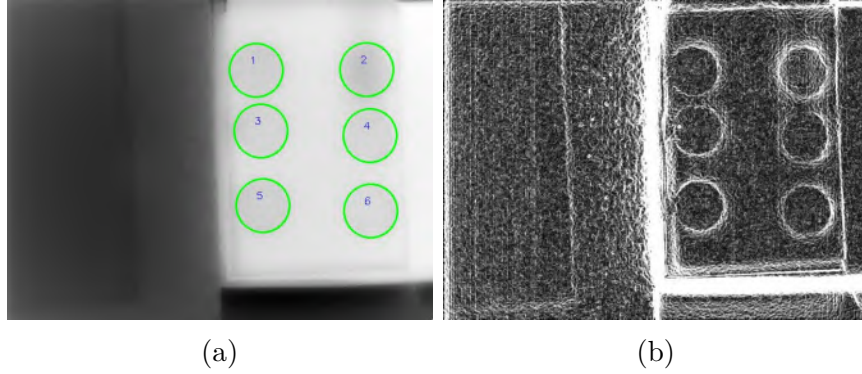


Figura 4.7: Comparación ilustrativa de la localización de los sitios de muestreo (a) y las RI analizadas (b).

de los 0.6×10^6 ms su valor de energía es casi constante. Está región se asoció con la evaporación completa de la muestra.

De los datos desplegados en la Figura 4.8, es difícil establecer un tiempo típico de evaporación de la muestra, por lo que se optó por aplicar dos criterios de detección de tiempo de evaporación. El primero de los criterios fue la identificación visual tras la aplicación del algoritmo de extracción de movimiento *Posy* [74], el cual fue aplicado al video formado por las imágenes tomadas por la cámara IR. Este algoritmo consiste en la inversión, superposición y desfase temporal de los *frames* que componen el video, mediante la aplicación del operador lineal de mezcla:

$$r(x) = (1 - \alpha)s_0(x) + \alpha s_1(x) \quad (4.2.1)$$

donde $r(x)$ es el nuevo valor de pixel después de la aplicación de la transformación; $s_0(x)$ y

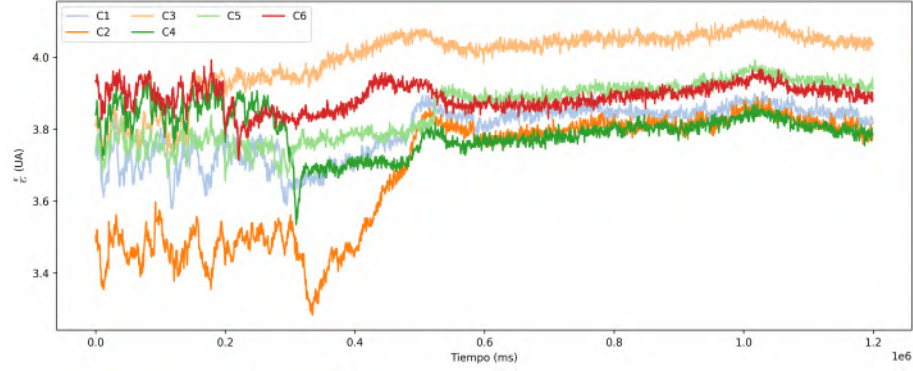
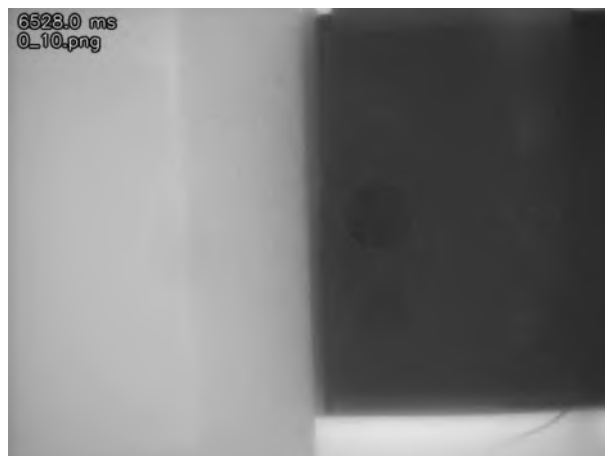


Figura 4.8: Ejemplo de la emisión de una muestra de 0 mM normalizado al cuerpo de referencia registrada en diferentes RI (C1-C6)

$s_1(x)$ son los valores del pixel original de la primera y segunda imágenes respectivamente; $x = (i, j)$ son las coordenadas del pixel a tratar. Así al variar el valor de α entre 0 y 1, se realiza una disolución y cruce temporal entre dos imágenes [75]. Un ejemplo de la aplicación de este algoritmo se muestra en la figura 4.9, donde es posible apreciar el frame y tiempo de captura de la imagen.

El segundo criterio de detección, fue la aplicación de un algoritmo de cálculo de mediana móvil (mencionado en la sección 3.3) y posteriormente el calculo varianza móvil a estos datos, lo cual consiste en aplicar a una ventana finita y pequeña (con respecto al total de datos) el cálculo estadístico mencionado, esto para encontrar el tiempo donde el valor de la variación llega a un mínimo (umbral), este valor umbral fue asignado al valor promedio de los máximos de varianza en los últimos 60 segundos de medición, una vez hecho esto, se asigno el valor de tiempo buscado, al primero de 20 valores consecutivos que cumplan que sean menores o iguales a este valor umbral. El resultado de esta aplicación y su comparación con los datos medidos se pueden observar en las figuras 4.10-4.14, correspondientes a las diferentes concentraciones estudiadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9: Frames extraídos del video tratado con el algoritmo *Posy*. (a) captura antes del secado. (b) captura durante el secado. (c) captura después del secado.

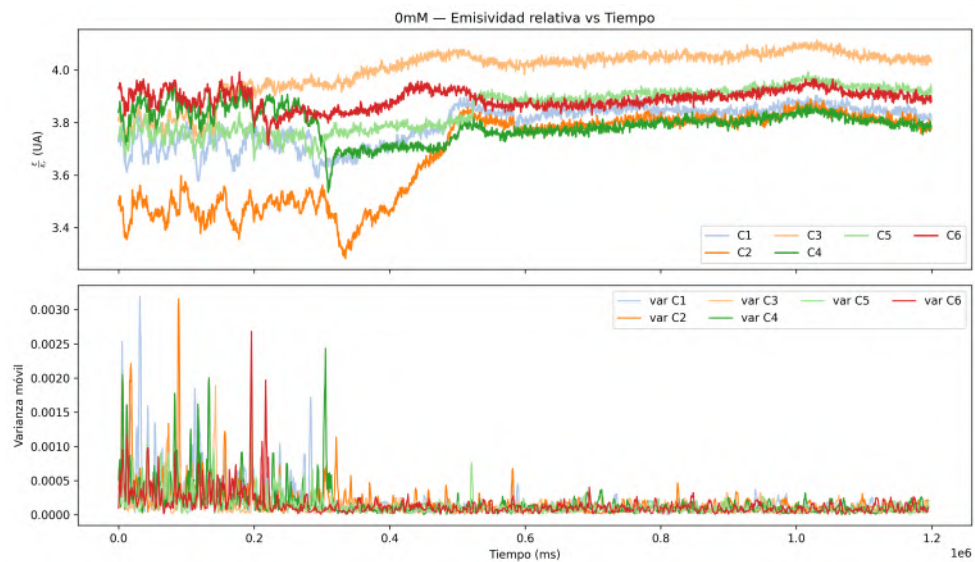


Figura 4.10: Variación de la emisividad relativa de la muestra de solución de SDS al 0 mM en el tiempo

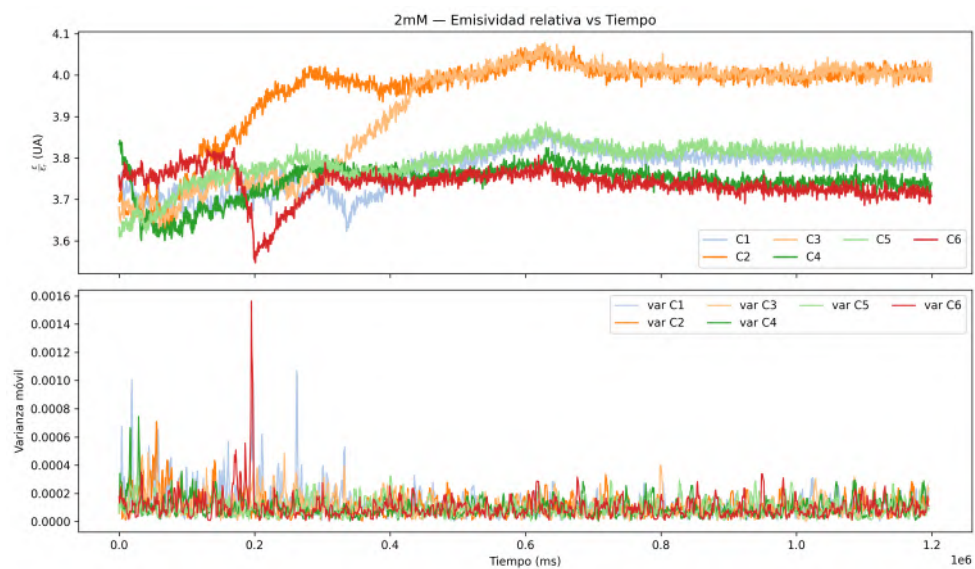


Figura 4.11: Variación de la emisividad relativa de la muestra de solución de SDS al 2 mM en el tiempo



Figura 4.12: Variación de la emisividad relativa de la muestra de solución de SDS al 4 mM en el tiempo

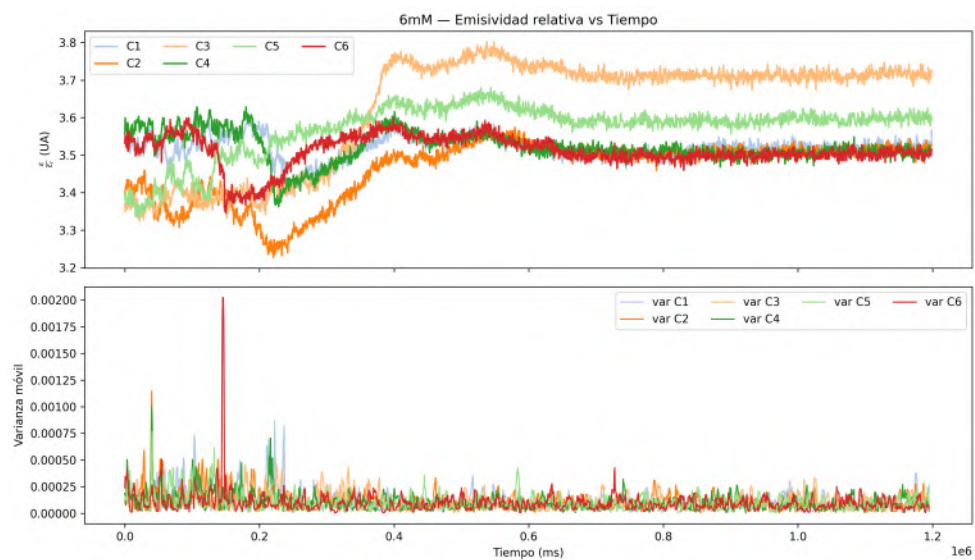


Figura 4.13: Variación de la emisividad relativa de la muestra de solución de SDS al 6 mM en el tiempo

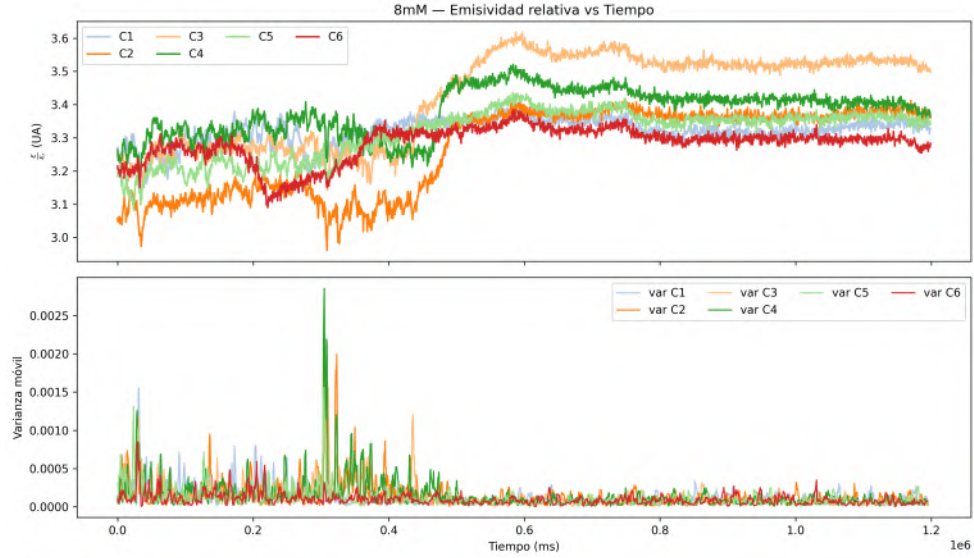


Figura 4.14: Variación de la emisividad relativa de la muestra de solución de SDS al 8 mm en el tiempo

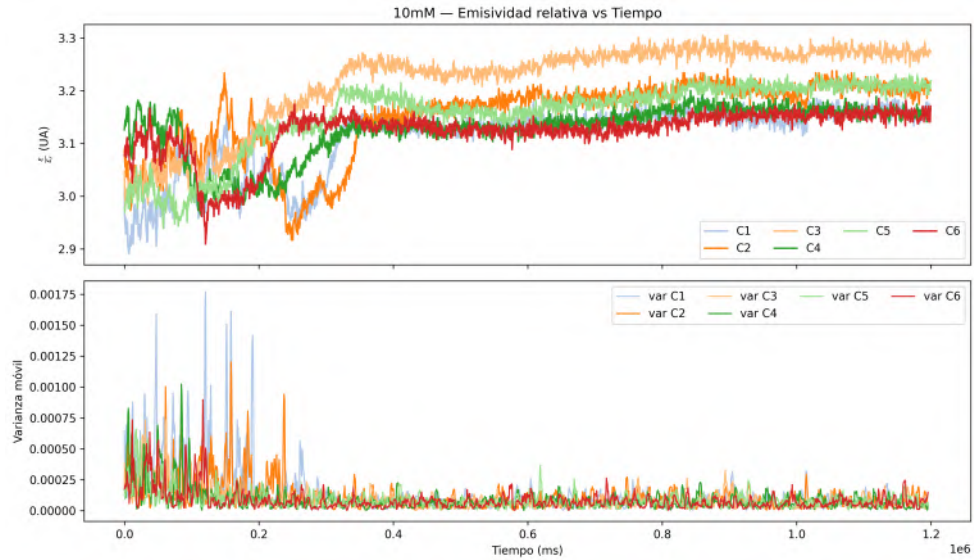


Figura 4.15: Variación de la emisividad relativa de la muestra de solución de SDS al 10 mm en el tiempo

Los tiempos de evaporación calculados según los criterios antes mencionados pueden observarse en la figura 4.16.

Habiendo extraído los valores temporales típicos de evaporación, se prosiguió a evaluar el modelo de cambio de emisividad propuesto en la Sección 2.3 para los valores de emisividad de la concentración de 0 mM. Para esto se propuso un decaimiento lineal en el tiempo para

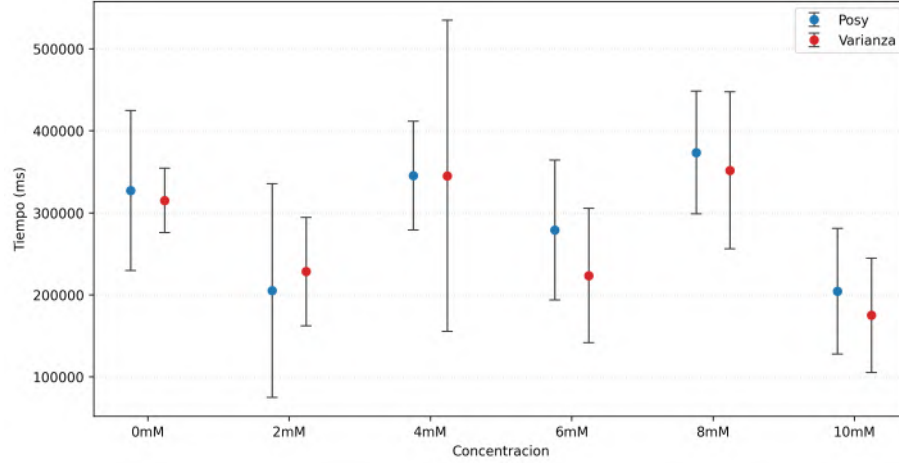


Figura 4.16: Comparación entre los valores temporales obtenidos por el método Posy y el método de Varianza

los valores de espesor de la película. Se utilizó la longitud de onda $\lambda = 9.4$, que corresponde al valor arrojado por la Ecuación 2.1.4 para el valor de temperatura promedio de 35°C a la que se realizó el experimento (Figura 4.4). Se utilizaron los valores de los coeficientes complejos de refracción $n_1 = 1.00026$, $k_1 = 0.0$, $n_2 = 1.2470$, $k_2 = 0.0433$, $n_3 = 2.4645$ y $k_3 = 1.9149$, reportados para el borosilicato, agua y aire [76–80].

Los resultados del comportamiento del modelo para la emisividad del sustrato, la película de solución acuosa de SDS a 0 mM y la emisividad total del sistema de tres medios se pueden apreciar en la Figura 4.17, donde podemos observar que el comportamiento de la emisividad total del sistema (línea azul) inicia en valores de emisividad constantes diferentes de cero, para posteriormente oscilar mientras el valor del tiempo t aumenta hasta el valor de $t = t_c$, donde t_c representa el tiempo medio de evaporación para la muestra. Posteriormente vuelve a tomar valores constantes para valores de $t > t_c$.

Junto con la emisividad total del sistema, podemos observar que el comportamiento de la emisividad del sustrato y de la película siguen comportamientos esperados para el fenómeno de evaporación, donde el aporte de la emisividad de la película (línea verde) domina para valores de $t \approx 0$ y decae con oscilaciones conforme $t \rightarrow t_c$ donde toma el valor de 0, por otro lado, el comportamiento del aporte de la emisividad del sustrato (línea naranja) es nulo para valores de $t \approx 0$ e incrementa con oscilaciones conforme $t \rightarrow t_c$ donde toma un valor constante (bulto) cuando $t = t_c$.

Posteriormente se comparó el comportamiento del resultado de este modelo con los valores experimentales mostrados en la Figura 4.10, esta comparación puede apreciarse en la Figura 4.18. El mismo ejercicio se repitió para el resto de las concentraciones, cuyas

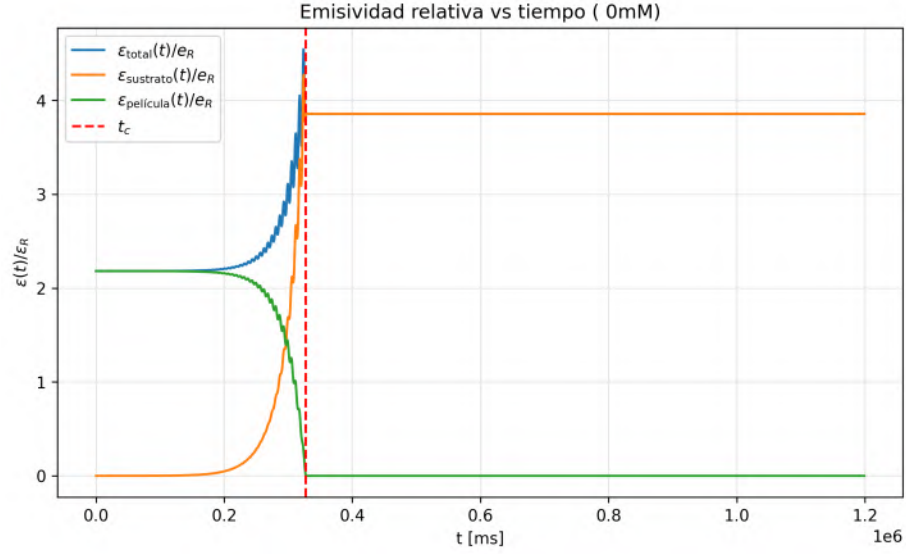


Figura 4.17: Respuesta del modelo de Piaget [63] de la emisividad de la muestra de SDS a 0 mM. La línea sólida azul representa la emisividad total del sistema. La línea sólida naranja representa la emisividad del sustrato. La línea sólida verde representa la emisividad de la película. La línea roja punteada indica el tiempo medio de evaporación de la muestra.

comparaciones pueden verse de la Figura 4.18 a la Figura 4.23.

De los resultados obtenidos, se pudo estimar los valores de emisividad del bulto, tanto de las soluciones acuosas de SDS, como del sustrato una vez evaporada la muestra y los resultados arrojados por el modelo de Piaget discutido en la sección 2.3. El comportamiento de estas emisividades puede apreciarse en la Figura 4.24, donde es posible observar que la emisividad va disminuyendo conforme aumenta la concentración de surfactante, mostrando así que el arreglo experimental desarrollado es capaz de detectar estos pequeños cambios de concentración. También es importante observar que el modelo que mejor ajusta con los datos experimentales, es el que toma en cuenta el sustrato, lo que demuestra que la difusividad de las muestras estudiadas se describe mejor al considerarla como una película delgada.

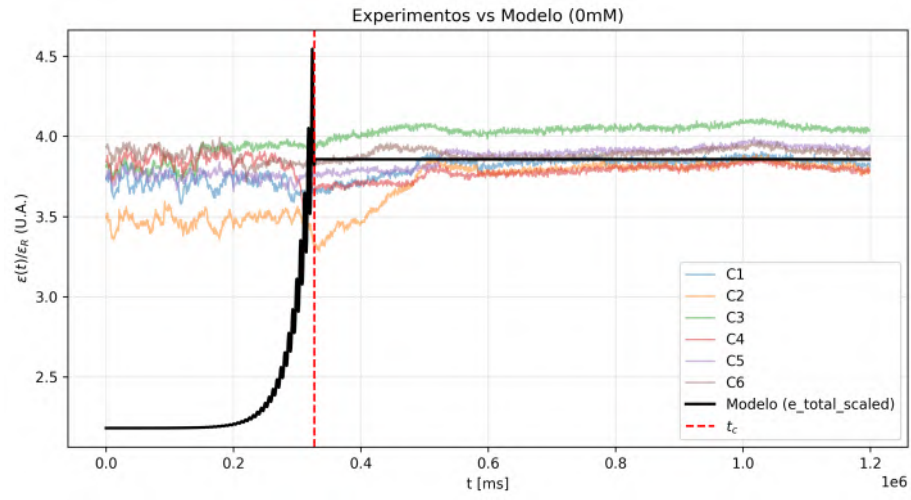


Figura 4.18: Comparación de los resultados del modelo de Piaget y los datos experimentales para la solución acuosa de SDS a 0 mM

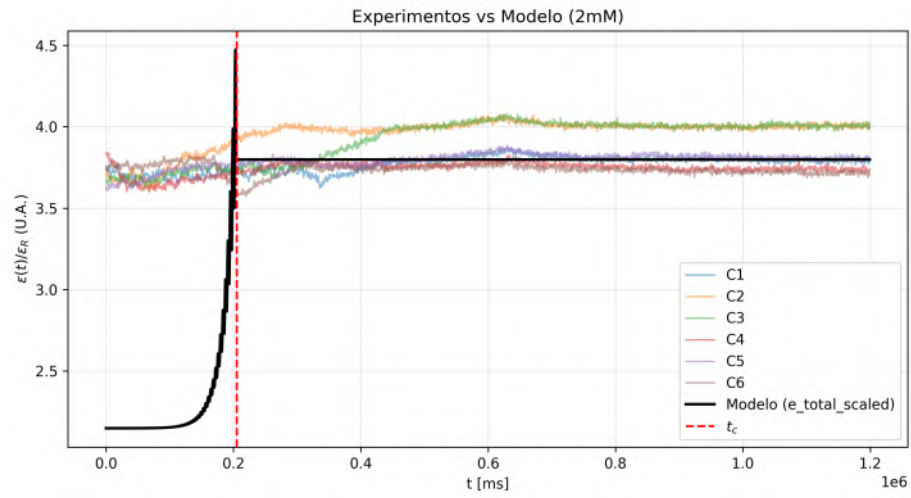


Figura 4.19: Comparación de los resultados del modelo de Piaget y los datos experimentales para la solución acuosa de SDS a 2 mM

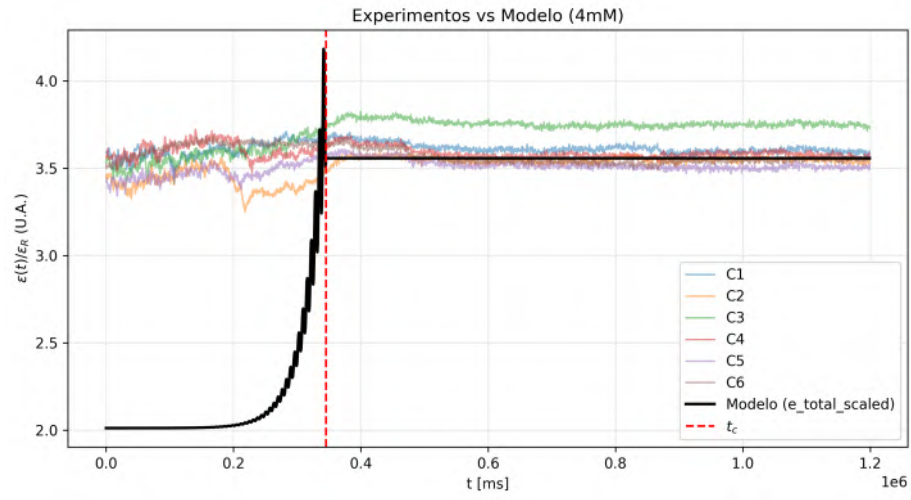


Figura 4.20: Comparación de los resultados del modelo de Piaget y los datos experimentales para la solución acuosa de SDS a 4 mM

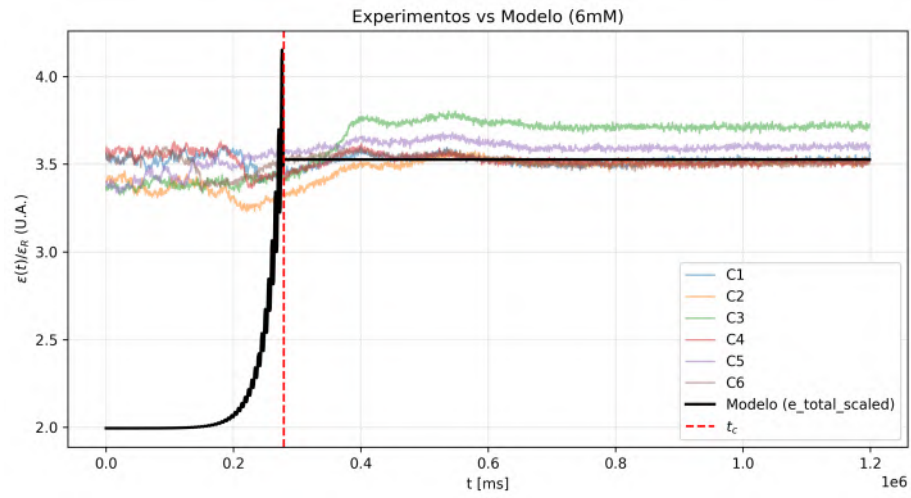


Figura 4.21: Comparación de los resultados del modelo de Piaget y los datos experimentales para la solución acuosa de SDS a 6 mM

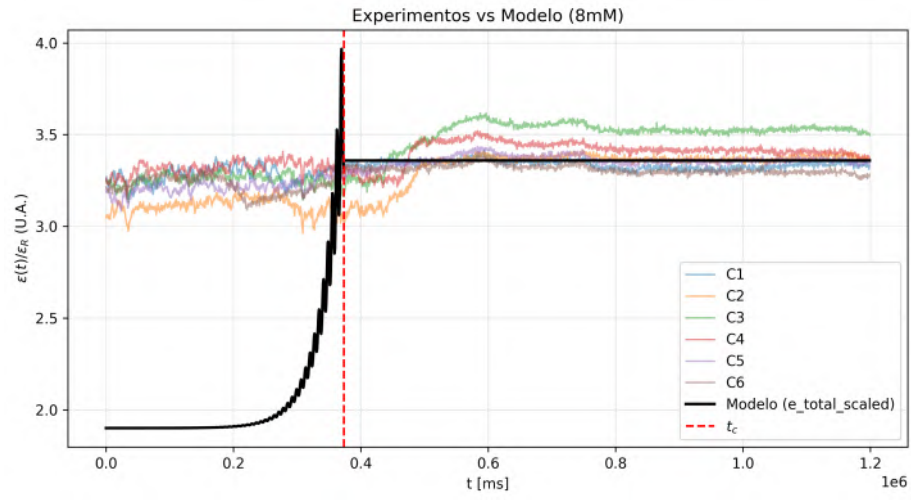


Figura 4.22: Comparación de los resultados del modelo de Piaget y los datos experimentales para la solución acuosa de SDS a 8 mM

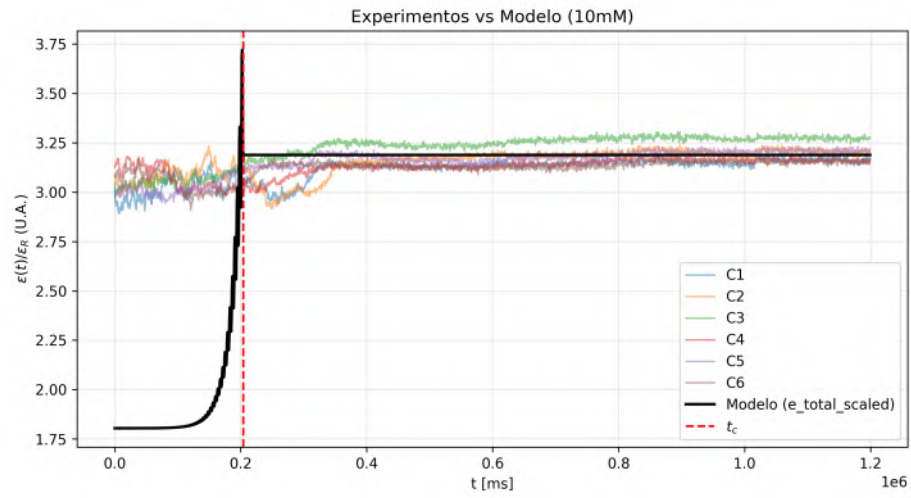


Figura 4.23: Comparación de los resultados del modelo de Piaget y los datos experimentales para la solución acuosa de SDS a 10 mM

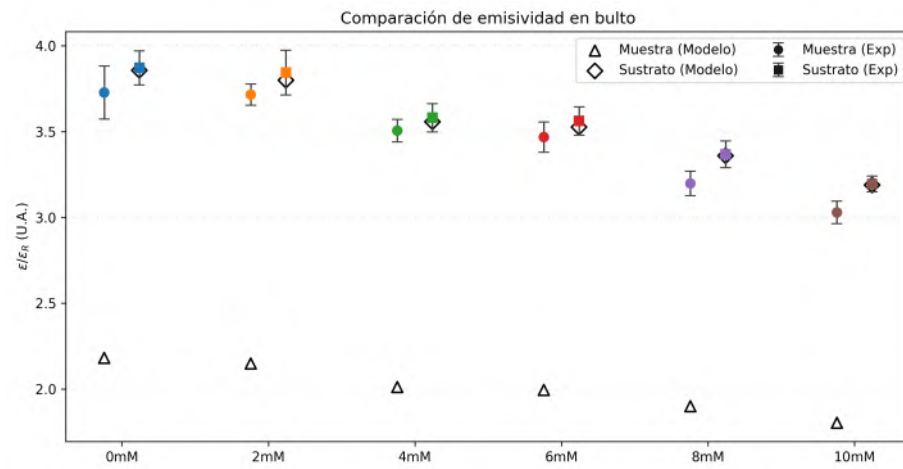


Figura 4.24: Cambio de la emisividad en bulto para las muestras antes de la evaporación y para los sustratos después de la evaporación haciendo la comparación con los valores generados por el modelo.

Capítulo 5

Conclusiones

Este trabajo representó un gran aprendizaje técnico. Instrumentar un control de temperatura que cumpliera con la precisión de regulación similar a la que se tiene en el ojo humano y que pudiera funcionar por largos períodos fue un reto que abarcó varias semanas de trabajo. Al final se logró implementar no solo el sistema de control, sino también una interfaz hombre-máquina que permite definir la temperatura a la cual se desea que el control opere. Este sistema de control es lo suficientemente robusto para compensar cambios de $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, variaciones tan mínimas como las observadas en el cambio de fase de los tensoactivos utilizados.

El desarrollo de los portamuestras adecuados para las soluciones utilizadas requirió un proceso iterativo de múltiples etapas. Inicialmente se exploraron diseños e impresiones en 3D que no lograron cumplir con las especificaciones de altura y uniformidad requeridas. Posteriormente se probaron soluciones de mecanizado con aluminio y teflón en barra utilizando un torno manual, pero tampoco se logró la precisión necesaria. Finalmente, se encontró la solución óptima al utilizar cinta de teflón de $200\text{ }\mu\text{m}$ de espesor y realizar orificios de diámetro controlado mediante sacabocados comerciales.

Paralelo al desarrollo del control de temperatura y la fabricación de los portamuestras, se trabajó en el diseño de un arreglo óptico adecuado para la adquisición de secuencias de imágenes infrarrojas. Este trabajo incluyó la implementación de un soporte especializado para la cámara y la selección de un objeto de referencia con tamaño y características térmicas apropiadas para compensar la deriva térmica de la cámara. Esta compensación resultó fundamental debido a que la adquisición de imágenes requiere de varios minutos, período durante el cual el sistema de compensación interno de la cámara se activa repetidamente.

Una vez obtenidas las primeras imágenes, se desarrollaron algoritmos específicos para su procesamiento. Estos algoritmos fueron diseñados para eliminar inicialmente el efecto de la

deriva térmica y posteriormente realizar una normalización de energías. Esta normalización permite comparar los cambios en la emisión de energía entre muestras con diferentes concentraciones conforme la capa disminuye gradualmente en espesor.

De esta manera se logró establecer que la termografía infrarroja es una técnica aplicable al estudio de soluciones acuosas con elementos similares a los lípidos presentes en la película lagrimal. Estos elementos permiten modificar las propiedades superficiales de las muestras de tal forma que, aunque la temperatura permanezca constante (como ocurre en el ojo humano), la energía emitida varía debido a cambios en la emisividad de la muestra por el adelgazamiento progresivo de la capa a lo largo del tiempo.

También se logró estimar la TMC de una solución acuosa de SDS a 7.8 mM implementando un arreglo experimental con la posibilidad no solo de medir muestras que denominamos en bulto o con espesores que prácticamente impiden la transmisión de energía desde el sustrato donde se coloca la muestra, sino también muestras con espesores $h \approx 0$. En este estudio se ha logrado observar y cuantificar el cambio de fase, y la variación de energía debido al cambio de emisividad de las muestras que simulan los lípidos en la película lagrimal, y aunque aún no se puede estimar con precisión la dinámica de la capa de lípidos en el ojo humano, se deja para un trabajo a corto plazo el lograr un mejor modelo para ello.

Además, se logró estimar la temperatura micelar crítica (TMC) de una solución acuosa de SDS a 7.8 mM mediante la implementación de un arreglo experimental versátil. Este sistema permite medir no solo muestras en bulto, sino también muestras con espesores de unos cuantos micrómetros de espesor.

En este estudio se logró observar y cuantificar tanto el cambio de fase como la variación de energía debida al cambio de emisividad en muestras que simulan los lípidos presentes en la película lagrimal. Aunque aún no es posible estimar con precisión la dinámica completa de la capa lipídica en el ojo humano, se plantea como objetivo a mediano plazo el desarrollo de un modelo más preciso para este propósito.

Bibliografía

- [1] M. Vollmer and K.P. Möllmann. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Wiley, 2017. [2](#)
- [2] Bogdan Bolborea, Cornelia Baeră, Aurelian Gruin, Ana-Cristina Vasile, and Alexandra-Marina Barbu. A review of non-destructive testing methods for structural health monitoring of earthen constructions. Alexandria Engineering Journal, 114:55–81, February 2025. [2](#)
- [3] L. Cristiano. Use of infrared-based devices in aesthetic medicine and for beauty and wellness treatments. Infrared Physics and Technology, 102:102991, November 2019. [2](#)
- [4] D J Watmough, Patricia W Fowler, and R Oliver. The thermal scanning of a curved isothermal surface: implications for clinical thermography. Physics in Medicine and Biology, 15(1):1–8, January 1970. [2](#)
- [5] Oleg Zadorozhnyy, Taras Kustryn, Illia Nasinnyk, Alla Nevska, Olga Guzun, Andrii Korol, and Nataliya Pasyechnikova. Application of smartphone-based infrared thermography devices for ocular surface thermal imaging. Medical Engineering and Physics, 130:104212, August 2024. [2](#)
- [6] Magdalena Jędzierowska, Robert Koprowski, Sławomir Wilczyński, and Dorota Tarnawska. The use of infrared thermal imaging in tonometry with a scheimpflug camera. Journal of Thermal Biology, 96:102823, February 2021. [2](#)
- [7] L. C. Ospina-Restrepo, L. M. Herrera-Velasquez, C. J. Barrera-Causil, H. A. Fandiño-Toro, and L. M. Ramirez-Arbelaez. Thermoregulation of the hand: assessment with infrared thermography, page 725–728. Springer Singapore, 2017. [2](#)
- [8] BOGUSŁAW WICEK, MARIA STRAKOWSKA, GILBERT DE MEY, STANISŁAW MARZEC, and WACŁAW WITTCHEN. Influence of infrared radiation on the

- human skin temperature — experimental data and modeling. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 13(03):1350025, May 2013. [2](#)
- [9] E F J Ring and K Ammer. Infrared thermal imaging in medicine. Physiological Measurement, 33(3):R33–R46, February 2012. [2](#)
- [10] Christine Boué, Francis Cassagne, Chadi Massoud, and Danièle Fournier. Thermal imaging of a vein of the forearm: Analysis and thermal modelling. Infrared Physics and Technology, 51(1):13–20, July 2007. [2](#)
- [11] Carolin Hildebrandt, Christian Raschner, and Kurt Ammer. An overview of recent application of medical infrared thermography in sports medicine in austria. Sensors, 10(5):4700–4715, May 2010. [2](#)
- [12] D. Ratovoson, F. Jourdan, and V. Huon. A study of heat distribution in human skin: use of infrared thermography. EPJ Web of Conferences, 6:21008, 2010. [2](#)
- [13] W. Tasman and E.A. Jaeger. Duane’s Ophthalmology 2009. Lippincott Williams & Wilkins, 2009. [2](#), [3](#)
- [14] Stephen C. Pflugfelder and Michael E. Stern. Biological functions of tear film. Experimental Eye Research, 197:108115, August 2020. [2](#), [3](#)
- [15] Ludwig Boltzmann. Ableitung des stefan’schen gesetzes, betreffend die abhängigkeit der wärmestrahlung von der temperatur aus der electromagnetischen lichttheorie. Annalen der Physik, 258:291–294, 1884. [8](#)
- [16] J. Stefan, K.K.H. Staatsdruckerie, Österreichische Akademie der Wissenschaften, and Academia Austríaca de Ciencias. Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wienn. Aus der k.k. Hof-und Staatsdruckerei, 1879. [8](#)
- [17] G. Kirchhoff. Ueber das verhältniss zwischen dem emissionsvermögen und dem absorptionsvermögen der körper für wärme und licht. Annalen der Physik, 185(2):275–301, January 1860. [8](#)
- [18] M. Planck. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum. 1900. [8](#)
- [19] Joanne C. Zwinkels. Blackbody and Blackbody Radiation, page 1–5. Springer Berlin Heidelberg, 2015. [8](#)

- [20] Victor Saprisky and Alexander Prokhorov. Blackbody Radiometry: Volume 1: Fundamentals. Springer International Publishing, 2020. 9
- [21] Michael F. Modest. Radiative Heat Transfer. Elsevier, 2003. 9, 19
- [22] CODATA Value: Boltzmann constant — physics.nist.gov. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?k>. [Accessed 12-05-2025]. 9
- [23] Kelvin: Boltzmann Constant — nist.gov. <https://www.nist.gov/si-redefinition/kelvin-boltzmann-constant>. [Accessed 21-08-2025]. 9
- [24] Carosena Meola and Giovanni M Carlomagno. Recent advances in the use of infrared thermography. Measurement Science and Technology, 15(9):R27–R58, July 2004. 9
- [25] M. Planck. 2. Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum, pages 107–117. De Gruyter, Berlin, Boston, 1969. 9
- [26] Fei Wang, Jie Sheng, Stefano Sfarra, Yihao Zhou, Lixia Xu, Lixia Liu, Mingjun Chen, Honghao Yue, and Junyan Liu. Multimode infrared thermal-wave imaging in non-destructive testing and evaluation (ndt&e): Physical principles, modulated waveform, and excitation heat source. Infrared Physics and Technology, 135:104993, December 2023. 10
- [27] A Rogalski. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook. Reports on Progress in Physics, 68(10):2267, aug 2005. 11
- [28] E. A. Wachter, T. Thundat, P. I. Oden, R. J. Warmack, P. G. Datskos, and S. L. Sharp. Remote optical detection using microcantilevers. Review of Scientific Instruments, 67(10):3434–3439, 1996. 11
- [29] H. Levinstein and J. Mudar. Infrared detectors in remote sensing. Proceedings of the IEEE, 63(1):6–14, 1975. 11
- [30] C. Meola. Origin and Theory of Infrared Thermography, page 3–28. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS, July 2012. 11, 14
- [31] R. Bhan, R. Saxena, C. Jalwani, and S. Lomash. Uncooled infrared microbolometer arrays and their characterisation techniques. Defence Science Journal, 59(6):580–589, November 2009. 12

- [32] Frank Niklaus, Christian Vieider, and Henrik Jakobsen. MemS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review. In Jung-Chih Chiao, Xuyuan Chen, Zhaoying Zhou, and Xinxin Li, editors, MEMS/MOEMS Technologies and Applications III. SPIE, November 2007. [12](#)
- [33] P.V. Karthik Yadav, Isha Yadav, B. Ajitha, Abraham Rajasekar, Sudha Gupta, and Y. Ashok Kumar Reddy. Advancements of uncooled infrared microbolometer materials: A review. Sensors and Actuators A: Physical, 342:113611, 2022. [12](#)
- [34] YUE Rui-Feng, DONG Liang, and LIU Li-Tian. Integrated a-si:b microbolometer arrays based on improved porous silicon micromachining techniques. Chin. Phys. Lett., 23(5):1331–1334, 2006. [12](#)
- [35] Irene Jiménez-Fortunato, Daniel J. Bull, Ole T. Thomsen, and Janice M. Dulieu-Barton. Quantitative microbolometer-based thermoelastic stress analysis. Optics and Lasers in Engineering, 160:107276, 2023. [12](#)
- [36] F. Kreith and R.M. Manglik. Principles of Heat Transfer. Cengage Learning, 2016. [13](#)
- [37] William M. Kays, Michael E. Crawford, and Bernhard J. Weigand. Convective Heat and Mass Transfer. McGraw-Hill, 4th edition, 2005. [14](#)
- [38] G. M. Miller. Evaporation and boiling heat transfer. Annual Review of Fluid Mechanics, 41:173–197, 2009. [14](#)
- [39] J. M. Krasny. Thermodynamics of phase change at liquid surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer, 45(12):2545–2553, 2002. [14](#)
- [40] Glenn J. Tattersall. Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular Integrative Physiology, 202:78–98, 2016. Ecophysiology methods: refining the old, validating the new and developing for the future. [15](#)
- [41] Raj M. Manglik, Vivek M. Wasekar, and Juntao Zhang. Dynamic and equilibrium surface tension of aqueous surfactant and polymeric solutions. Experimental Thermal and Fluid Science, 25(1–2):55–64, August 2001. [15](#)

- [42] M.J. Rosen, American Chemical Society. Division of Colloid, Surface Chemistry, and American Chemical Society. Meeting. Structure/performance Relationships in Surfactants. ACS symposium series. American Chemical Society, 1984. [15](#)
- [43] Douglas E. Hirt, Robert K. Prud’Homme, Bernard Miller, and Ludwig Rebenfeld. Dynamic surface tension of hydrocarbon and fluorocarbon surfactant solutions using the maximum bubble pressure method. Colloids and Surfaces, 44:101–117, jan 1990. [15](#)
- [44] Chien-Hsiang Chang and Elias I. Franses. Adsorption dynamics of surfactants at the air/water interface: a critical review of mathematical models, data, and mechanisms. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 100:1–45, July 1995. [15](#)
- [45] Wu-Tsann Wu, Yu-Min Yang, and Jer-Ru Maa. Nucleate pool boiling enhancement by means of surfactant additives. Experimental Thermal and Fluid Science, 18(3):195–209, November 1998. [15](#)
- [46] Stoyan I. Karakashev, Anh V. Nguyen, and Jan D. Miller. Equilibrium Adsorption of Surfactants at the Gas–Liquid Interface, page 25–55. Springer Berlin Heidelberg, 2008. [15](#)
- [47] James K. Ferri and Kathleen J. Stebe. Which surfactants reduce surface tension faster? a scaling argument for diffusion-controlled adsorption. Advances in Colloid and Interface Science, 85(1):61–97, February 2000. [15](#)
- [48] U Shavit. The role of dynamic surface tension in air assist atomization. International Journal of Multiphase Flow, 22:139, December 1996. [15](#)
- [49] Carla Jimena Guzman-Valencia, Jorge Toriz-Salinas, Hugo Espinosa-Jimenez, Ana Beatriz Salazar-Arriaga, José L. López-Cervantes, and Hector Dominguez. Understanding the surface tension reduction of the water/air interface due to the synergistic effect of the sds-ctab mixture: A molecular dynamics simulation study. Molecular Physics, 122(19–20), July 2024. [16](#)
- [50] Bronisław Jańczuk, Anna Zdziennicka, Katarzyna Szymczyk, and Maria Luisa González-Martín. Prediction of aqueous solution surface tension of some surfactant mixtures and composition of their monolayers at the solution—air interface. Colloids and Interfaces, 5(4):53, December 2021. [16](#)

- [51] Xin Nan Song, Ju Lei Jin, Yu Wang, and Xiang Long Li. Experimental study on the thermal stability of surfactant aqueous solutions. Advanced Materials Research, 926–930:119–123, May 2014. [16](#)
- [52] Sergei F. Burlatsky, Vadim V. Atrazhev, Dmitry V. Dmitriev, Vadim I. Sultanov, Elena N. Timokhina, Elena A. Ugolkova, Sonia Tulyani, and Antonio Vincitore. Surface tension model for surfactant solutions at the critical micelle concentration. Journal of Colloid and Interface Science, 393:151–160, March 2013. [16](#)
- [53] Milton J Rosen and Xi Yuan Hua. Dynamic surface tension of aqueous surfactant solutions. Journal of Colloid and Interface Science, 139(2):397–407, October 1990. [16](#)
- [54] Chuangye Wang and Harald Morgner. The dependence of surface tension on surface properties of ionic surfactant solution and the effects of counter-ions therein. Phys. Chem. Chem. Phys., 16(42):23386–23393, September 2014. [16](#)
- [55] D. R. Otis, E. P. Ingenito, R. D. Kamm, and M. Johnson. Dynamic surface tension of surfactant ta: experiments and theory. Journal of Applied Physiology, 77(6):2681–2688, December 1994. [16](#)
- [56] Xiaonan Wang, Shujie Yuan, and Bingyou Jiang. Wetting process and adsorption mechanism of surfactant solutions on coal dust surface. Journal of Chemistry, 2019:1–9, October 2019. [16](#)
- [57] L. P. Wang, S. Basu, and Z. M. Zhang. Direct measurement of thermal emission from a fabry–perot cavity resonator. Journal of Heat Transfer, 134(7), May 2012. [19](#)
- [58] ROBERT GARDON. The emissivity of transparent materials. Journal of the American Ceramic Society, 39(8):278–285, August 1956. [19](#)
- [59] Raakesh Raman and Alok Thakur. Emissivity of homogeneous thin films. Thin Solid Films, 87(2):101–112, January 1982. [19](#)
- [60] Raakesh Raman and Alok Thakur. Thermal emissivity of materials. Applied Energy, 12(3):205–220, November 1982. [19](#)
- [61] H. O. McMahon. Thermal radiation from partially transparent reflecting bodies. Journal of the Optical Society of America, 40(6):376, June 1950. [19](#)
- [62] John R. Howell, M. Pinar Menguc, and Robert Siegel. Thermal Radiation Heat Transfer. CRC Press, September 2010. [19](#)

- [63] P. Pigeat, D. Rouxel, and B. Weber. Calculation of thermal emissivity for thin films by a direct method. Physical Review B, 57(15):9293–9300, April 1998. [19](#), [20](#), [21](#), [22](#), [23](#), [25](#), [50](#)
- [64] E. Hecht and J.M.N.V. Rebordão. Óptica. Manuais universitários. Fundação Calouste Gulbenkian. Serviço de Educação, 1991. [20](#)
- [65] Sheila Edalatpour, Sheila Edalatpour, Mathieu Francoeur, and Mathieu Francoeur. Size effect on the emissivity of thin films. Journal of Quantitative Spectroscopy Radiative Transfer, 2013. [21](#)
- [66] Valeri P. Tolstoy, Irina V. Chernyshova, and Valeri A. Skryshevsky. Handbook of Infrared Spectroscopy of Ultrathin Films. Wiley, May 2003. [23](#)
- [67] G. Lara. Compilación de recetas químicas. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2013. [Accessed 07-04-2025]. [28](#)
- [68] Vitriflon. TELAS, CINTAS Y BANDAS:CINTAS CON ADHESIVO SILICON Y ACRILICO. Tetraflon. [30](#)
- [69] Yubaraj Ghimire, Sharmila Amatya, Sujit Kumar Shah, and Ajaya Bhattarai. Thermodynamic properties and contact angles of ctab and sds in acetone–water mixtures at different temperatures. SN Applied Sciences, 2(7), June 2020. [31](#), [38](#)
- [70] OpenCV: Image Gradients — docs.opencv.org. https://docs.opencv.org/4.x/d5/d0f/tutorial_py_gradients.html. [Accessed 21-08-2025]. [35](#)
- [71] Charles C. Holt and Chris Chatfield. Forecasting: Principles and Practice. Oxford University Press, Oxford, 2nd edition, 2004. [36](#)
- [72] Adriana L. Navarro-Verdugo, Francisco M. Goycoolea, Guillermo Romero-Meléndez, Inocencio Higuera-Ciapara, and Waldo Argüelles-Monal. A modified boltzmann sigmoidal model for the phase transition of smart gels. Soft Matter, 7(12):5847, 2011. [41](#)
- [73] Martina Viková and Michal Vik. Transition temperature of color change in thermochromic systems and its description using sigmoidal models. Materials, 16(23):7478, December 2023. [41](#)

- [74] kjkoster. posy-motion-extraction. <https://github.com/kjkoster/posy-motion-extraction>, 2025. GitHub Repository, version latest, accessed 2025. 43
- [75] szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. — szeliski.org. <https://szeliski.org/Book/>, 2022. [Accessed 18-08-2025]. 44
- [76] RefractiveIndex.INFO - Refractive index database — refractiveindex.info. <https://refractiveindex.info/>. [Accessed 20-08-2025]. 49
- [77] S.I. Popova, T.S. Tolstykh, and V.T. Vorobev. Optical characteristics of amorphous quartz in the 1400 - 200 cm⁻¹ region. Opt. Spectrosc., 33:444–445, 01 1972. 49
- [78] George M. Hale and Marvin R. Querry. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region. Appl. Opt., 12(3):555–563, Mar 1973. 49
- [79] Richard J Mathar. Refractive index of humid air in the infrared: model fits. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 9(5):470–476, April 2007. 49
- [80] Michael Polyanskiy. refractiveindex.info-scripts. <https://github.com/polyanskiy/refractiveindex.info-scripts>, 2023. Accessed: 2025-08-20. 49

Pedro Emigdio García González

Análisis termográfico del proceso de evaporación en soluciones de tensoactivos hacia nuevas técnicas

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:486708832

Fecha de entrega

25 ago 2025, 6:59 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

25 ago 2025, 7:20 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Análisis termográfico del proceso de evaporación en soluciones de tensoactivos hacia nuevas téc....pdf

Tamaño del archivo

12.8 MB

73 páginas

15.600 palabras

83.665 caracteres

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión

Programa educativo	Maestría en Ciencias en el Área de Física	
Título del trabajo	Análisis termogravimétrico del proceso de evaporación en soluciones de tensoactivos hacia nuevas técnicas no invasivas para la caracterización de materiales biológicos.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Pedro Emigdio García González	04505826@umich.mx
Director	Pablo Martínez Torres	pablo.martinez@umich.mx
Codirector	Carlos Villaseñor Mora	vimcarlos@ugta.mx
Coordinador del programa	Umberto Cotti Gollini	mae.ciencias.fisica@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	Se usó para sugerir la estructura de los capítulos de la tesis.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	Si	Se uso para sugerir sinónimos en la traducción del resumen para mejorar el abstract.
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Si	Se utilizo para encontrar artículos relacionados al tema de interés para la red de citas
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	Si	Se utilizo para sugerir mejoras en el estilo de las gráficas generadas
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	22 de agosto del 2025, Morelia, Mich.