



LACYQS

Laboratorio Nacional de Sistemas
de Concentración Solar y Química Solar

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar. Segunda Etapa.

Informe Medición de Temperatura de no contacto en una superficie receptora de un alto flujo radiativo concentrado

Responsable técnico: Dr. Claudio A. Estrada Gasca

Elaborado por:

UNAM: Carlos A. Pérez Rábago.

Extracto:

En este informe se presentan los resultados de la campaña experimental para la medición de la temperatura de una superficie expuesta a radiación altamente concentrada en el HoSIER. Con ello se busca conseguir una metodología de medición de la temperatura de no contacto sin que esta se vea sobreestimada producto del efecto de la radiosidad de la propia superficie.



Tabla de contenido

1	Introducción.....	3
2	Análisis teórico.....	6
2.1	Radiosidad	6
2.2	Energía emitida	7
2.3	Pirómetro y determinación del Factor de Corrección de la ϵ	8
3	Diseño experimental	9
3.1	Arreglo experimental	9
3.2	Metodología experimental	11
4	Resultados experimentales y su análisis	13
4.1	Medición de temperatura a través de una ventana vacía.....	13
4.2	Medición de temperatura a través de una ventana PYREX®	18
4.3	Medición de temperatura a través de una ventana de cuarzo.....	22
5	Conclusiones	26
6	Referencias	27

1 Introducción

La medición de la temperatura en el interior de los reactores y/o receptores en sistemas termoquímicos, que emplean radiación solar altamente concentrada, es fundamental para determinar las eficiencias termodinámicas de los receptores, o bien, es imprescindible para conocer las cinéticas de los procesos termoquímicos que ocurren en los reactores. Habitualmente estas mediciones se realizan con transductores de contacto, como es el caso de termopares o bien PT100. Sin embargo, esto resulta sumamente complejo, en primer lugar porque los niveles de temperaturas en los que operan los receptores solares resultan ser por encima de 1000 °C, o bien en los procesos de reducción-oxidación ocurren a temperaturas por encima de los 1500 °C, lo que resulta complicado medir de forma directa con los termopares o PT100 y solo se podrán conseguir un conjunto muy pequeño de puntos de medición y dependerán de la accesibilidad que se tenga para colocar un termopar, por otra parte, dependiendo del tipo de termopar puede ser o no reactivo a los procesos que estén ocurriendo y con ello se puede contaminar el propio proceso. En segundo lugar, si se intenta realizar la medición de las temperaturas con dispositivos de no contacto, como es el caso de los pirómetros y/o cámaras termográficas, la medición se ve sobre estimada ya que estos dispositivos van a medir la temperatura de las superficies a través de la energía emitida por la misma, así como la reflejada, esta última es la aportación que sobrestima dicha medición.

Una alternativa para realizar la medición de la temperatura en el interior de un reactor y/o receptor en el HoSIER, a través de la técnica de no contacto, empleando la obturación del atenuador, se puede realizar la medición casi instantánea después que se corta la radiación solar incidente, cerrando el atenuador, realizar la medición de no contacto e inmediatamente después volver a abrir el atenuador en el mismo porcentaje de apertura en el que se encontraba antes de la medición. Sin embargo, con esta técnica solo se tendría la medida de la temperatura puntual e instantánea (en el caso del pirómetro) o del mapa de temperaturas instantáneo (en el caso de toma de imágenes con cámara termográfica), por otra parte, se corre el riesgo, en el caso de que el experimento tenga una inercia térmica muy pequeña, el proceso de cerrado y apertura del atenuador perturbe

considerablemente el estado transitorio del mismo y las mediciones que se hagan de la temperatura sean mucho menores a las del estado estable. El tiempo de cerrado del 100% a 0% del atenuador es de 1.8 segundos y la apertura del 0% a 100% es de 2.3, es decir el tiempo de medición de la temperatura cerrando y abriendo el atenuador se tiene que realizar en un tiempo aproximado de 5 segundos, esperando que la inercia térmica del receptor sea tal que esta perturbación no afecte significativamente en el proceso, cosa muy complicada cuando los reactores o receptores son relativamente pequeños.

Por otra parte, es bien sabido que, la atmósfera cambia significativamente la magnitud y la distribución espectral y direccional de la radiación solar antes de que ésta llegue a la superficie terrestre. Por lo tanto, la radiación es atenuada y dispersada al atravesar las distintas capas atmosféricas. Esto es debido a la absorción, dispersión y reflexión de la radiación solar constituyentes atmosféricas. Estos fenómenos se producen principalmente en la atmósfera superior (estratosfera), con su fina capa de ozono (O_3), y la baja atmósfera (troposfera), en la que se originan las formaciones de nubes y se manifiestan las diferentes condiciones climáticas. El efecto de absorción espectral por los gases atmosféricos O_3 , H_2O , O_2 y CO_2 se muestra en la curva espectral de la figura 1.

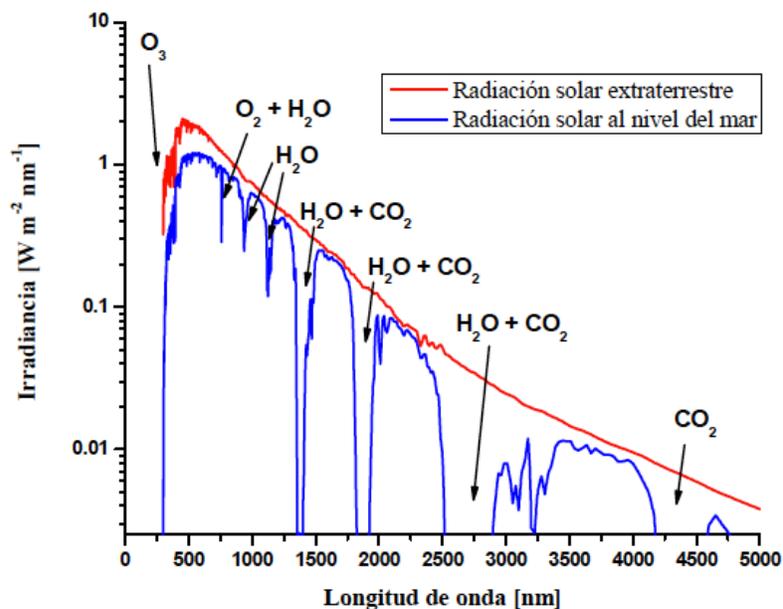


Figura 1: Principales bandas de absorción atmosférica.

Considerando que las tres bandas espectrales elegidas para realizar una medición de temperatura sin que se vea afectada por la radiación son las bandas de absorción atmosférica que están contenidas entre los 1500 y los 5000 nm . Estas bandas se centran en torno a las longitudes de onda de 1900, 2700 y 4300 nm y son debidas al H_2O y CO_2 atmosféricos para las dos primeras bandas y el CO_2 atmosférico para la tercera, como se observa en la figura 2.

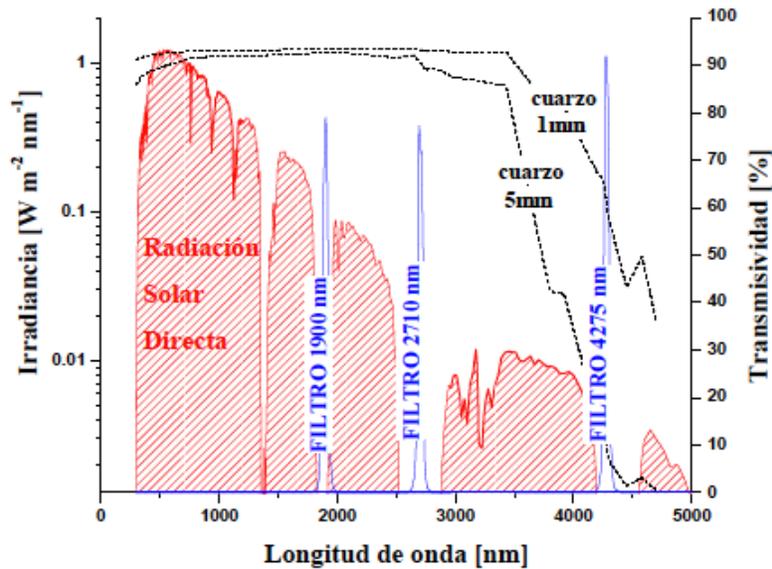


Figura 2: Transmisividad de los filtros propuestos centrados en las bandas de absorción atmosférica.

Sin embargo, debido a que el pirómetro con el que se contaba para esta campaña experimental, es un pirómetro de la marca *Omega modelo 83708*, con un rango de medición de 600 a 3000 $^{\circ}C$ y con una respuesta espectral de 780 a 1060 nm , Lo que implica que no abarca ninguna de las tres bandas de absorción atmosférica, y por otro lado, no se contaba con ninguno de los tres filtros antes mencionados. Por ello, se procedió a realizar la medición de la temperatura de la superficie receptora de un flujo altamente concentrado, considerando la sobrestimación de la temperatura producto de la energía reflejada por la misma y realizar una cuantificación de cuanto sería el incremento en la medición en función de la temperatura real de dicha superficie. Por otra parte, aprovechando el enfriamiento de la superficie receptora en el instante inmediato a que se

corta el flujo radiativo se realizó un comparativo entre la medición de pirómetro y la del termopar de pared colocado justo en el centro de la placa receptora y que se podría considerar que ambas mediciones serán muy próximas entre sí. Para ello es importante hacer un análisis de la radiosidad y conseguir determinar la contribución de la componente de reflectividad de la medición de la temperatura.

2 Análisis teórico

Para entender el proceso de medición de no contacto, es importante conocer los procesos de transferencia de calor radiativo que ocurren entre el receptor de la radiación, al cual se desea conocer su temperatura, y el dispositivo que realizará la medición de la temperatura de no contacto, que puede ser un pirómetro o bien una cámara termográfica. Para el caso de las superficies receptoras de radiación y que se desea conocer su temperatura, es importante conocer el proceso de radiosidad.

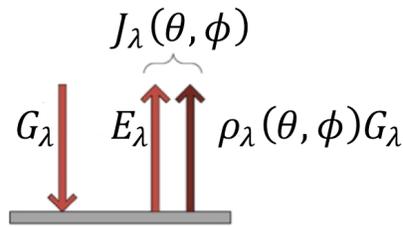
2.1 Radiosidad

Si se desea considerar el flujo radiativo total, espectral o no, que sale de una superficie, suma de lo emitido y reflejado, para un ángulo sólido, puede ser utilizar el término radiosidad espectral, J_λ , que se define como la emitancia direccional más la fracción de irradiancia que la superficie refleja del entorno en la misma dirección:

$$J_\lambda(\theta, \phi) = E_\lambda(\theta, \phi) + \rho_\lambda(\theta, \phi)G_\lambda$$

La radiosidad resulta del efecto conjunto de la radiación emitida por una superficie determinada E_λ , y la radiación refleja $\rho_\lambda G_\lambda$, ambas componentes son funciones del ángulo de la superficie. Así, el efecto de ambos efectos, la radiación de la superficie total se define como:

$$J_\lambda(\theta, \phi) = \frac{d^2\Phi}{dAd\omega\cos\theta}$$



Si la temperatura de la superficie se mide, a través de instrumento de no contacto, y este se encuentra en equilibrio térmico con el entorno (el flujo radiativo incidente es constante y el receptor se encuentra en estado estable) se puede considerar que la energía reflejada por la superficie también es constante y la diferencia de las temperaturas medida con dicho instrumento (T_p) y la temperatura medida con un instrumento de contacto (por ejemplo con un termopar) T_w , el cual nos proporciona la medida real de la temperatura de dicha superficie. Cabe mencionar que dicha diferencia estará en función de la energía incidente en el receptor y por tanto de la temperatura de referencia, la cual se puede considerar como la temperatura de la superficie T_w .

$$\Delta T(G_\lambda) = (T_p - T_w)$$

Con lo que se puede considerar que esta diferencia de temperaturas es producto de la energía reflejada por la superficie, es decir entre mayor sea la energía reflejada, mayor va a ser la diferencia entre ambas mediciones y por tanto a su temperatura de referencia.

$$\Delta T(T_w) = f(\rho_\lambda(\theta, \phi)G_\lambda)$$

2.2 Energía emitida

En el caso que el flujo radiativo incide G_λ sea igual a cero, es decir en el instante siguiente a que se corta el flujo radiativo incidente en la superficie receptora, se podría considerar que la radiosidad de la superficie es igual a la energía emitida por la misma.

$$J_\lambda(\theta, \phi) = E_\lambda(\theta, \phi)$$

Por lo tanto, la energía emitida se puede suponer como la emitida por un cuerpo gris. La ley de *Stefan-Boltzmann* establece que un cuerpo emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura,

$$q = \varepsilon\sigma T_w^4$$

Donde epsilon (ϵ) es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \epsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende marcadamente del material de la superficie y de su acabado, de la longitud de onda, y de la temperatura de la superficie.

Esta energía puede ser medida a través de un instrumento llamado pirómetro y con ello inferir el valor de la temperatura conociendo los valores de la emisividad de la superficie.

2.3 Pirómetro y determinación del Factor de Corrección de la ϵ

Un pirómetro es un dispositivo capaz de medir la temperatura de una superficie sin necesidad de estar en contacto con esta. El término se suele aplicar a aquellos instrumentos capaces de medir temperaturas superiores a los 600 °C. Uno de los pirómetros más comunes es el *pirómetro de emisión*, que se utiliza para determinar la temperatura a partir de la medición de la radiación emitida (q) por una fuente de referencia calibrada.

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{q}{\epsilon\sigma}}$$

La cual está en función de la emisividad de la superficie ϵ y la constante de *Stefan-Boltzmann* σ . Si la temperatura de misma superficie se pudiera medir a través de otro instrumento, como por ejemplo, un termopar que me permita conocer con cierta certeza la temperatura de la misma superficie, se podría calibrar el valor de la emisividad de la superficie para esa temperatura y la cual llamaremos ϵ_1 .

$$\epsilon_1 = \frac{(T_w)^4 \sigma}{q}$$

Por otra parte, si se fija la emisividad del pirómetro en uno, la variación de la misma ϵ_2 se puede determinar en función a la temperatura medida por el mismo instrumento y se expresaría como

$$\epsilon_2 = \frac{(T_p)^4 \sigma}{q}$$

Si se considera, que el flujo de energía radiativo emitido por la superficie (q) es el mismo para ambas mediciones, se podría considerar un factor de corrección de la emisividad de la superficie ($F.C.\varepsilon$) en función de la temperatura de la superficie (T_w), el cual se puede determinar como un cociente entre ambas emisividades.

$$F.C.\varepsilon(T) = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Con lo cual se puede, definir al $F.C.\varepsilon$ como un cociente a la cuarta potencia, entre la lectura de la temperatura del pirómetro y la temperatura de la superficie medida con un termopar. Cabe señalar que para toda la experimentación es necesario establecer la emisividad del pirómetro como un valor unitario, el cual será ajustado con este factor, en función de la temperatura.

$$F.C.\varepsilon(T) = \left(\frac{T_p}{T_w}\right)^4$$

Es importante señalar, que para determinar $F.C.\varepsilon$ es necesario que la radiación reflejada por la superficie sea igual a cero. Es decir esta determinación se tiene que realizar en el instante siguiente a que cierra la entrada de radiación incidente en la superficie receptora que se está evaluando.

3 Diseño experimental

El diseño de este experimento consistió en un arreglo experimental que permite realizar la misma medición de la temperatura del centro de la placa receptora, tanto con termopar por la parte posterior a la superficie receptora y como con pirómetro con la medición por la parte frontal, así como las mediciones de las condiciones de operación en las que se realizó la experimentos. Por otra parte, se definió una metodología experimental que permitió hacer el análisis comparativo entre ambas mediciones de temperatura para distintas condiciones de operación, colocando entre la placa receptora y el concentrador diferentes tipos de ventanas.

3.1 Arreglo experimental

El experimento consistió en colocar una placa de acero al carbón sin ningún tipo de recubrimiento de 10 x 10 cm y un espesor de 6 mm, como superficie receptora, con una

emitancia (ϵ) integrada en todo el espectro de 0.92 a temperatura de 25 °C. A dicha placa de acero se le realizó una perforación de 3 mm de diámetro y una profundidad de 5 mm, a la cual se colocó un termopar tipo “K” calibre 26, con lo que se dejó una pared de tan solo 1 mm de espesor entre la superficie receptora y la cabeza del termopar. Por lo tanto, la lectura de dicho termopar se podría considerar similar, o muy próxima a la temperatura superficie del centro de la placa receptora. Por otra parte, se monta a una distancia de 2 m frente a la placa receptora, sobre el eje focal del HoSIER un pirómetro, como se muestra en la figura 3. con las especificaciones que se muestran en la tabla 1. Entre la placa receptora y el pirómetro se colocaron, a una distancia de 15 cm frente a la placa receptora, tres tipos diferentes de ventanas:

- a) ventana vacía
- b) ventana de cuarzo de 5 mm de espesor
- c) ventana con vidrio PYREX® de 4 mm de espesor

Cabe mencionar que las dimensiones de dichas ventanas a pesar que fueron distintas, se verifico que ninguna de ellas fuera lo suficientemente pequeña para presentar algún tipo de obstrucción del cono de concentración del HoSIER y esto afectará en la radiación incidente.

Tabla 1: Especificaciones del Pirómetro

PIROMETRO OMEGA	
MODEL:	83708
RANGE:	600-3000 °C
F.O.V. RATIO:	180:1
SPECT. RESP.	0.78-1.06 μm
SERIAL NO.	005731-1
ANALOG OUTPUT	1 mV/°C

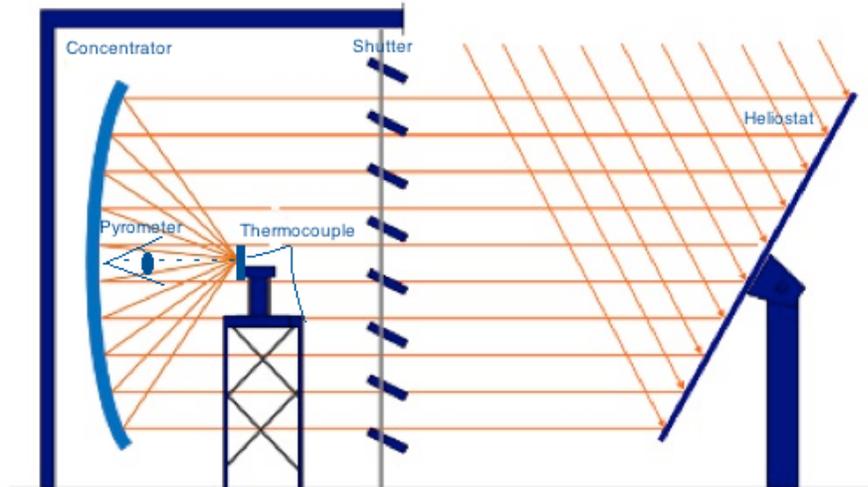


Figura 3: Esquema experimental de la medición de la temperatura con pirómetro.

Tanto la lectura del termopar de la placa (T_w), como del pirómetro (T_p) se conectaron al sistema de adquisición de datos del HoSIER. Por otra parte se integraron a esta adquisición de datos el porcentaje de apertura del atenuador ($\% Shutter$) y el valor de la radiación directa (I_d) medida por la estación meteorológica. Las lecturas de estas cuatro variables se sincronizaron para ser capturadas con una periodicidad de 1 segundo a lo largo que duro todas las pruebas.

Es importante mencionar que para conseguir el estado estable en las pruebas, fue fundamental monitorear que la posición del spot concentrado no tuviera fluctuaciones ni en intensidad, ni en posición. Para esto fue muy importante integrar en el sistema de seguimiento del heliostato, la retroalimentación con la mirilla y con ello se consiguió que el spot permaneciera en su posición con una variación menor a 2 mm a lo largo de las 2 horas que duraron las pruebas [Pérez-Enciso et al., 2012]

3.2 Metodología experimental

Para realizar los experimentos, se estableció la siguiente metodología experimental:

1. Se estableció como condiciones de operación adecuadas, una radiación directa (I_d) mayor a 650 W/m^2 la cual requería ser constante por un periodo mayor a 15 minutos, con ello se pudo conseguir que la placa receptora llegará al estado estable.
2. Se realizó la adquisición simultaneas de T_w , T_p , $\%Shutter$ e I_d con una frecuencia de captura de 1 segundo.
3. Para todas las pruebas, se fijó el objetivo del pirómetro al centro de la placa, garantizando que ambos instrumentos estuvieran midiendo el mismo punto.
4. Se procedió a realizar la apertura del atenuador empezando por 5% y se permaneció con esta apertura, hasta que la temperatura de la placa receptora llegó al estado estable. Cabe mencionar que gracias a pruebas anteriores y a conocer los valores de la radiación directa, fue fácil alcanzar la temperatura de estancamiento deseada fijando la apertura del atenuador.
5. Ya que se alcanzó el estado estable, se cerró el atenuador de manera súbita (en menos de 2 segundos) y se continuó midiendo los valores de T_w y T_p para con ello determinar el F.C.ε.
6. Se esperó a que la temperatura placa fueran mucho menor a $600 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura en la cual el pirómetro sale de su rango de operación.
7. Una vez que la placa receptora se encontraba a una temperatura relativamente baja (menor a $400 \text{ }^\circ\text{C}$) se volvió a abrir el atenuador pero esta vez con un porcentaje 5% mayor a la prueba anterior. Con ello se consiguieron incrementos de temperatura de 50 a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ dependiendo de las condiciones de radiación incidente.

8. Se consiguieron temperaturas de 700 a 1200 °C con incrementos de 50 a 100 °C, se buscó que las condiciones de la superficie fueran similares para todas las pruebas, sin embargo, se fue observando que para temperaturas mayores a 900 °C, la placa presentaba un descrapela miento el cual suponemos cambió sus propiedades de emisividad.

4 Resultados experimentales y su análisis

Los experimentos se realizaron en tres días distintos, buscando que todas las pruebas se realizaran en torno al medio día solar para conseguir un flujo radiativo lo más constante posible. Para cada día se realizó con una ventana distinta, iniciando sin ventana (ventana vacía), posteriormente con PYREX® y por último con cuarzo.

4.1 Medición de temperatura a través de una ventana vacía

En los experimentos de medición de temperaturas sin ventana, o ventana vacía, se hicieron 11 pruebas de 700 a 1250 °C, de las cuales las primeras cuatro, se hicieron variando el porcentaje apertura del atenuador para conseguir el estado estable, sin embargo, en estas pruebas debido a que la radiación incidente fue variando en función del porcentaje de apertura del atenuador, durante toda la prueba, no fue posible estimar su componente de reflectividad de la medición de temperatura con el pirómetro para estas pruebas. Para los experimentos del 6 al 8, que van de 1000 a 1070 °C, las condiciones de radiación fueron muy estables y se consideraron mediciones muy consistentes, como se observa en la figura 4.

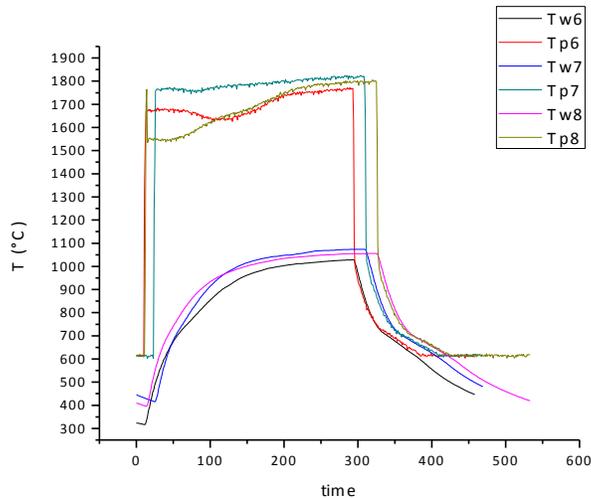


Figura 4: Temperaturas de pared T_w y del pirómetro T_p sin ventana para las pruebas 6, 7 y 8

Las pruebas experimentales se realizaron con una I_d de 879 a 918 W/m^2 , lo cual garantizó que a lo largo de cada una de las pruebas, las variaciones en la radiación reflejada fueran mínimas. Por otra parte, se estableció la apertura del atenuador normalizada a 1000 W/m^2 de radiación incidente, esto para observar que los incrementos de temperatura eran proporcionales a la apertura del atenuador normalizada, como se observa en la tabla 2.

Tabla 2: Resumen de los resultados experimentales con ventana vacía

#	Shutter (%)	I_d (W/m^2)	Shutter normal 1000 W/m^2	T_w ($^{\circ}C$)		T_p ($^{\circ}C$)		$\Delta T = T_p - T_w$ ($^{\circ}C$)	
					σ		σ		σ
10	9	879	7.9	803.4	1.6	1482.9	5.1	679.5	5.9
9	10	904	9.0	912.2	1.3	1595.8	4.2	683.6	4
8	14	889	12.4	1054.7	0.7	1795.8	5	741.1	4.8
7	14	900	12.6	1070.7	2.6	1815.2	5.2	744.6	4.1
6	13	912	11.9	1023.2	3.5	1760.2	6.3	737	4
5	11	918	10.1	1001.6	3.4	1706	3.4	704.3	2.9

En este experimento se consiguieron incrementos de temperatura de 803 a 1070 $^{\circ}C$, las otras pruebas no fueron consideradas debido a que por el calentamiento por arriba de

1100 °C en la superficie se produjeron oxidaciones que cambiaron sus propiedades de emisividad. En la figura 5 se muestra el comportamiento de calentamiento de la placa receptora, así como su tiempo de respuesta (τ). En esta prueba se observa que el tiempo de respuesta es alrededor de 67 segundos, con lo que se determinó que la duración de las pruebas requiere ser mayores a 3 minutos.

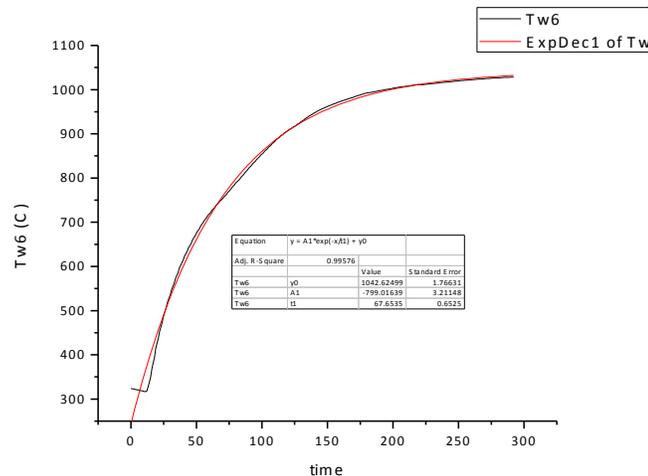


Figura 5: Tiempo de respuesta del receptor, para exp. 6 con ventana vacía.

En la tabla 2 se muestran los valores de la diferencia entre la temperatura, en estado estable, obtenidas con el pirómetro y la temperatura de la superficie. Esta diferencia se da en presencia de la radiación incidente y se analiza en función de la propia temperatura de dicha superficie. En la figura 6 se observa que el comportamiento de las diferencias de mediciones entre el pirómetro y el termopar se incrementa de forma lineal al incrementarse la temperatura de la superficie, la cual está en función a la energía incidente en ella. Es decir a mayor energía incidente es mayor la contribución de la energía reflejada por la superficie y por tanto es mayor la sobre estimación de la medición del pirómetro.

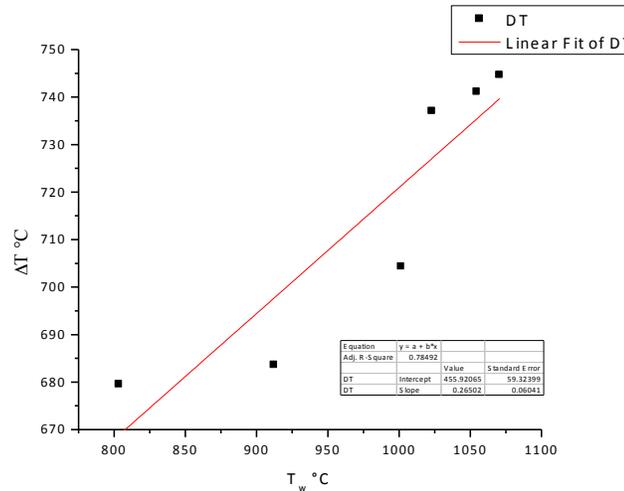


Figura 6: Diferencia de temperaturas (ΔT) en función de la temperatura de la superficie T_w (ventana vacía)

En la figura 7 se puede observar el comportamiento de medición de temperatura con el pirómetro, donde se observa que dicho incremento se da en función a la cuarta potencia, debido al incremento en la energía emitida por la pared ya que la energía reflejada permaneció constante (chechar los buenos niveles de radiación que se tuvieron para esta prueba).

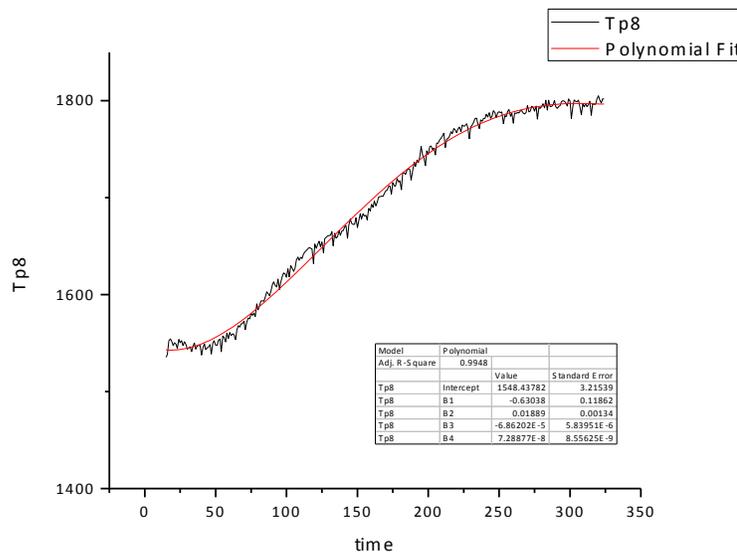


Figura 7: Incremento de la medición de la temperatura con el pirómetro para la prueba 8 (ventana vacía)

Para determinar el factor de corrección de la emisividad de la superficie ($F.C.\epsilon$) en la etapa de enfriamiento, un instante después de que se corta el suministro del flujo radiativo

altamente concentrado, cerrando el atenuador del HoSIER, se analiza las diferencias que existen entre las mediciones con el pirómetro y el termopar, y se observa que en el instante de cierre del atenuador la temperatura medida con el pirómetro es un poco menor, es decir que el F.C.ε es un poco mayor a la unidad, y al llegar a los 745°C ambas temperaturas son iguales, es decir un F.C.ε igual a 1, donde la emisividad del pirómetro es la misma que la de la superficie. Por último, se observa que para temperaturas entre 745° y 600°C (rango de operación del pirómetro). El F.C.ε es menor a la unidad, lo que implica que la emisividad real es inferior a la establecida en el pirómetro. En la figura 8 se muestra el comportamiento de enfriamiento de la placa, medido tanto con el pirómetro (T_p) y con el termopar (T_w), en el mismo grafico se observa el comportamiento del F.C.ε a lo largo del tiempo.

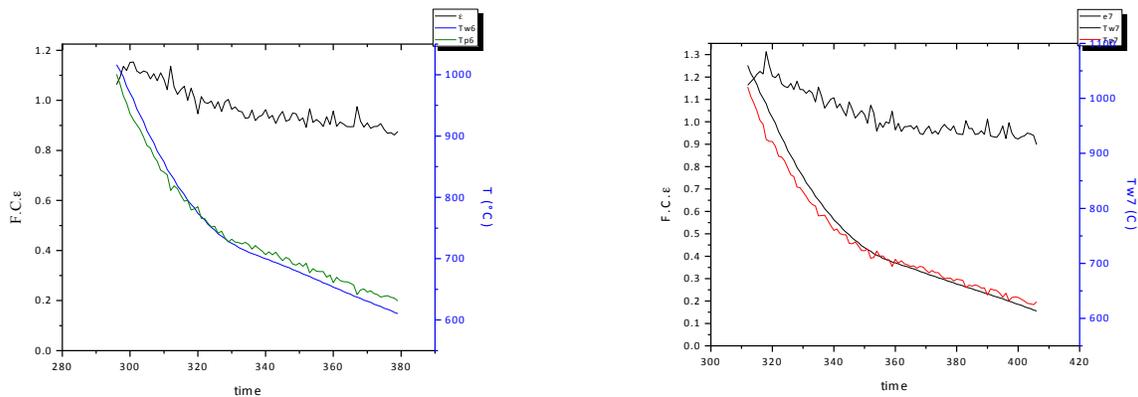


Figura 8: Enfriamiento y comportamiento del F.C.ε para la prueba 6 y 7

En la figura 9 se muestra el comportamiento del F.C.ε en función de la temperatura para tres pruebas distintas, en este grafico se puede observar que a mayor temperatura de pared, mayor será el F.C.ε y para los tres experimentos la tendencia es la misma, aunque existen ciertas diferencias, las cuales se debe a que para la prueba 6 la temperatura de estancamiento fue de 1070 °C (la mayor para estas pruebas) mientras que para la prueba 1023 °C. Esto establece un punto de referencia distinto para ambos valores.

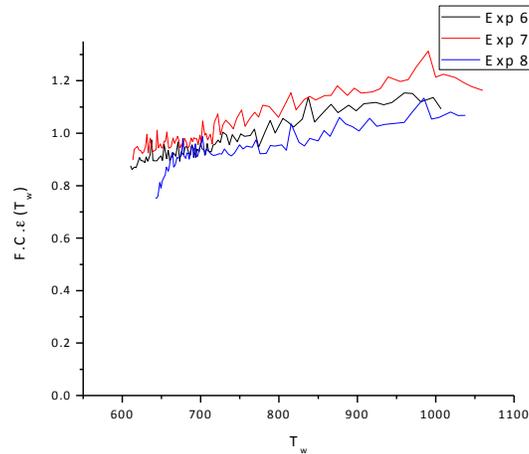


Figura 9: Comportamiento del F.C.ε en función de la temperatura de pared, para los exp. 6,7 y 8

4.2 Medición de temperatura a través de una ventana PYREX®

En los experimentos de medición de temperaturas con ventana PYREX®, se hicieron 9 pruebas de 850 a 1032 °C, de las cuales las cuatro últimas, se hicieron a temperaturas por encima de 1100 °C lo que degradó la superficie y los resultados no fueron consistentes. Por otra parte, las condiciones de radiación incidente fueron constantes entre 800 y 850 W/m² para las primeras cinco pruebas, no así para las últimas. En la figura 10 se muestran los resultados para las primeras cinco pruebas, donde se consiguieron incrementos de temperatura de entre 75 y 100 °C.

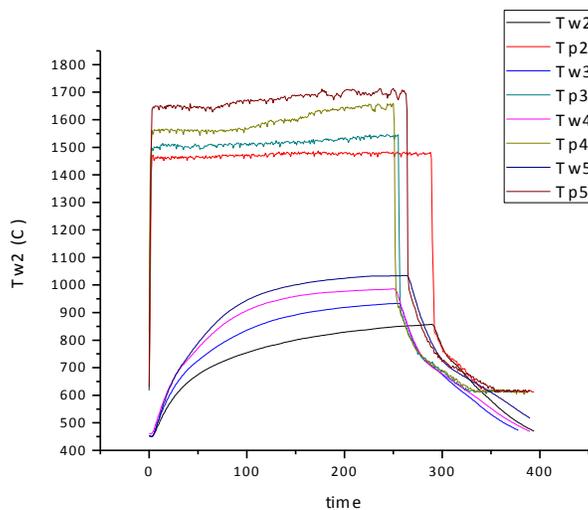


Figura 10: Temperaturas de pared T_w y del pirómetro T_p con ventana PYREX para las pruebas 2,3,4 y 5

En la tabla 3 se muestra el resumen de los datos experimentales colocando enfrente del receptor una ventana de PYREX®. En esta tabla se muestra que se iniciaron las pruebas con una apertura del 10% y se concluyó con una apertura del 16%, sin embargo al normalizar esta apertura a 1000 W/m^2 se obtuvo que la mayor apertura fue de tan solo 12.9%. Para este experimento se observó que las diferencias de temperatura entre el pirómetro y el termopar (ΔT), se pueden considerar constantes entre un valor de $630 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ y no se ve con claridad la contribución de la radiación reflejada como en el experimento anterior.

Tabla 3: Resumen de los resultados experimentales con ventana PYREX

#	Shutter (%)	I_d (W/m^2)	Shutter normal 1000 W/m^2	T_w		T_p		$\Delta T = T_p - T_w$	
					σ		σ		σ
2	10	854	8.5	851.4	3.3	1477.6	4.2	626.14	6
3	11	843	9.3	928.5	3.5	1538.8	5	610.3	4.1
4	14	826	11.6	982.6	1.9	1647.6	7.3	665	7.1
5	16	808	12.9	1032.7	1	1696.7	9	664	9

En la figura 11 se muestra el comportamiento de calentamiento de la placa receptora, así como su tiempo de respuesta (τ). En esta prueba se observa que el tiempo de respuesta es alrededor de 60 segundos, con lo que se determinó que la duración de las pruebas requiere ser mayores a 3 minutos. Cabe mencionar que los tiempos de respuesta con la ventana de PYREX y sin ella fueron muy similares para casi todas las pruebas.

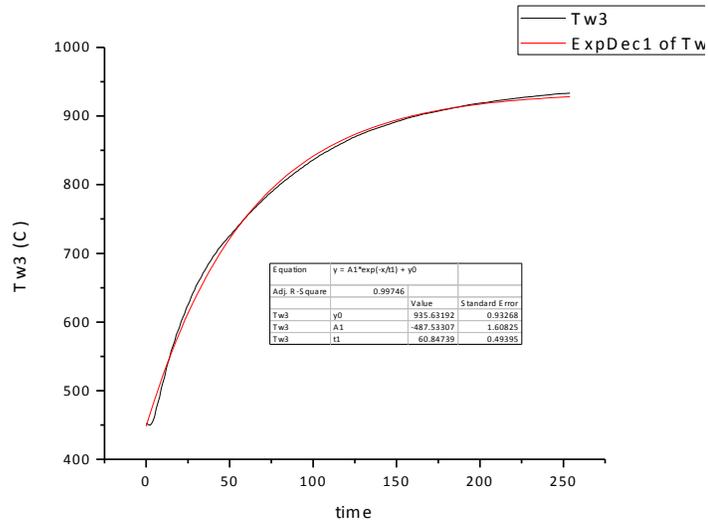


Figura 11: Tiempo de respuesta del receptor, para exp. 3 con ventana PYREX

En la figura 12 se puede observar el comportamiento de medición de temperatura con el pirómetro, donde se observa que dicho incremento se da en función a la cuarta potencia, debido al incremento en la energía emitida por la pared ya que la energía reflejada permaneció constante (chechar los buenos niveles de radiación que se tuvieron para esta prueba)

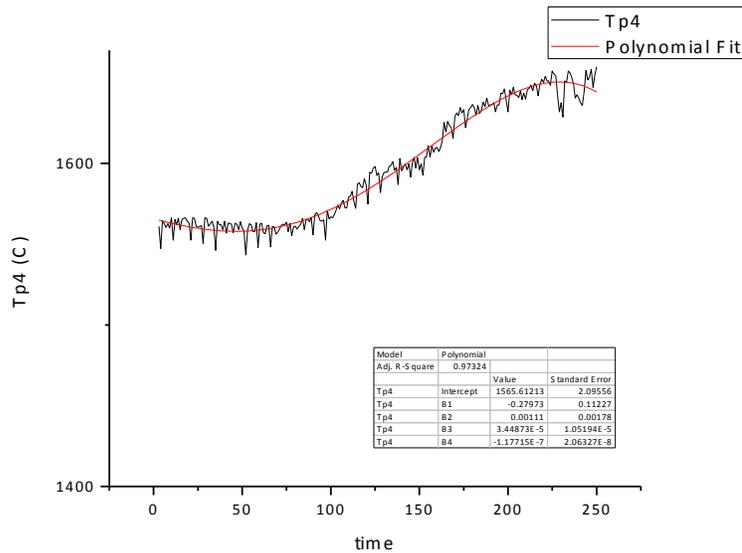


Figura 12: Incremento de la medición de la temperatura con el pirómetro para la prueba 4 (ventana PYREX)

Para determinar el factor de corrección de la emisividad de la superficie ($F.C.\varepsilon$) en la etapa de enfriamiento, se analiza las diferencias que existen entre las mediciones con el pirómetro y el termopar, y se observa que en el instante de cierre del atenuador la temperatura medida con el pirómetro es un poco menor, es decir que el $F.C.\varepsilon$ es un poco mayor a la unidad, y nuevamente al llegar a los 745°C ambas temperaturas son iguales como se observa en el caso de la ventana vacía, es decir a esta temperatura el $F.C.\varepsilon$ es igual a uno, donde la emisividad del pirómetro es la misma que la de la superficie. Por último, se observa que para temperaturas entre 745° y 600°C (rango de operación del pirómetro). El $F.C.\varepsilon$ es menor a la unidad, lo que implica que la emisividad real es inferior a la establecida en el pirómetro. En la figura 13 se muestra el comportamiento de enfriamiento de la placa, medido tanto con el pirómetro (T_p) y con el termopar (T_w), en el mismo grafico se observa el comportamiento del $F.C.\varepsilon$ a lo largo del tiempo.

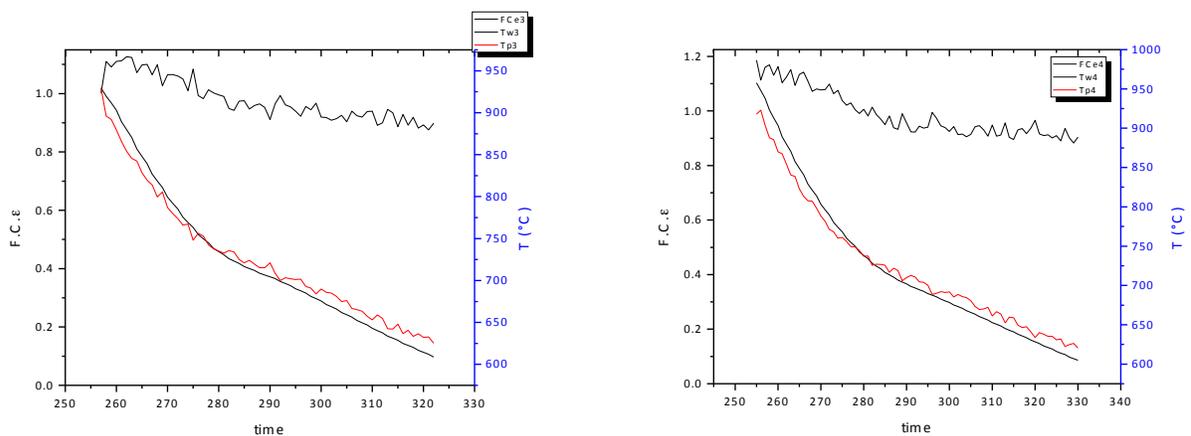


Figura 13: Enfriamiento y comportamiento del $F.C.\varepsilon$ para la prueba 6 y 7

En la figura 14 se muestra el comportamiento del $F.C.\varepsilon$ en función de T_w para tres pruebas distintas, en este grafico se puede observar que a mayor temperatura de pared, mayor será el $F.C.\varepsilon$ y para los tres experimentos la tendencia es la misma, presentando una mayor repetitividad que el caso cuando se empleó la ventana vacía. Cabe recordar que las diferencias entre las mediciones con pirómetro y con termopar fueron muy similares, y esto hace que el punto de referencia para ambos caso sea el mismo.

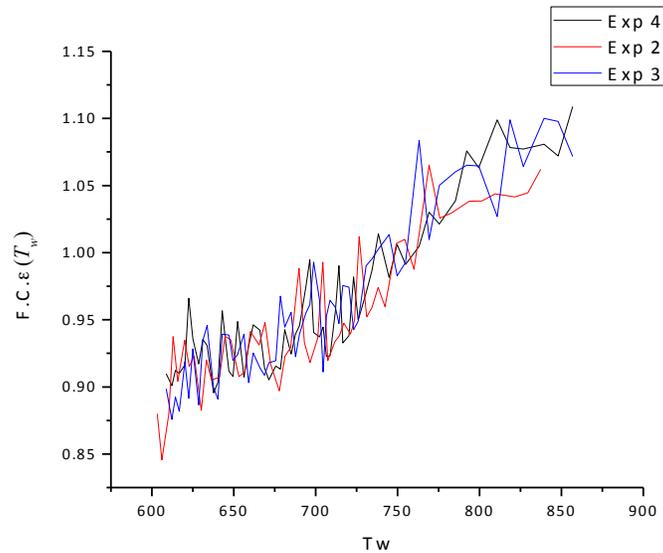


Figura 14: Comportamiento del F.C.ε en función de T_w , para los exp. 2,3 y 4 (ventana PYREX)

4.3 Medición de temperatura a través de una ventana de cuarzo

En los experimentos de medición de temperaturas con ventana PYREX[®], se hicieron 11 pruebas de 837 a 930 °C. Por otra parte, las condiciones radiación incidente fueron constantes entre 565 y 651 W/m² para las primeras ocho pruebas, no así para las últimas donde la radiación bajo demasiado que dificultó su operación. En la figura 15 se muestran los resultados para cuatro pruebas, donde se consiguieron incrementos de temperatura de 50 °C entre una prueba y otra.

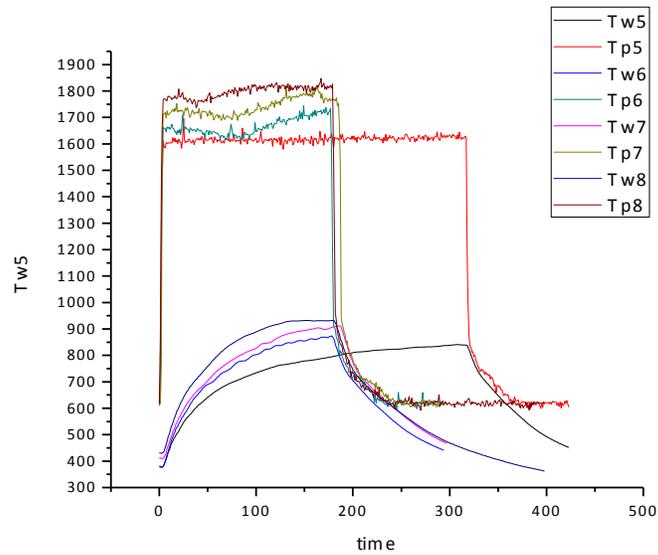


Figura 15: Temperaturas de pared Tw y del pirómetro Tp con ventana Cuarzo para las pruebas 5,6,7 y 8

En la figura 16 se muestra el comportamiento de calentamiento de la placa receptora, así como su tiempo de respuesta (τ). En esta prueba se observa que el tiempo de respuesta es alrededor de 57 segundos, con lo que se determinó que la duración de las pruebas requiere ser mayores a 3 minutos. Cabe mencionar que los tiempos de respuesta con la ventana de PYREX y sin ella fueron muy similares para casi todas las pruebas.

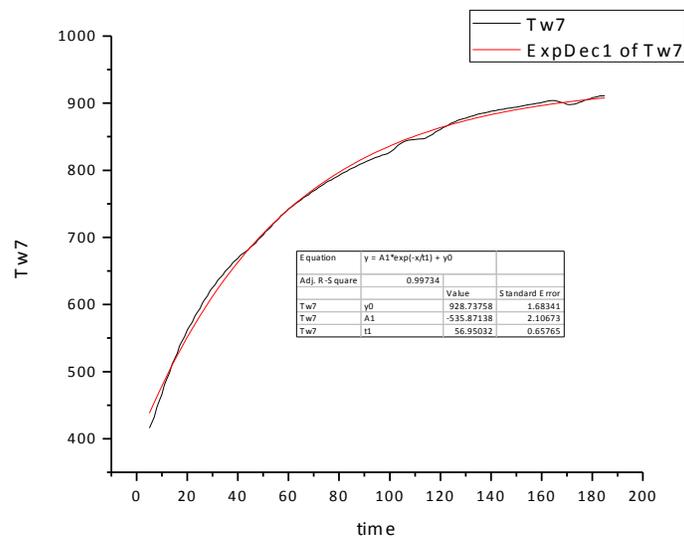


Figura 16: Tiempo de respuesta del receptor, para exp. 7 con ventana cuarzo

En la tabla 4 se muestra el resumen de los datos experimentales colocando enfrente del receptor una ventana de cuarzo. Aquí se puede observar que se iniciaron las pruebas con una apertura del 14% y se concluyó con una apertura del 22%, sin embargo al normalizar esta apertura a 1000 W/m^2 se obtuvo que la mayor apertura fue de tan solo 12.4%. En la figura 17 se observa que el comportamiento de las diferencias de mediciones entre el pirómetro y el termopar se incrementa de forma lineal al incrementarse la temperatura de la superficie, la cual está en función a la energía incidente en la placa receptora. Es decir a mayor energía incidente es mayor la contribución de la energía reflejada por la superficie y por tanto es mayor la sobre estimación de la medición del pirómetro. Esto se debe a que el cuarzo es casi transparente al espectro en el que está midiendo el pirómetro, como se observa en la figura 2.

Tabla 4: Resultados experimentales con ventana de cuarzo

#	Shutter (%)	I_d (W/m^2)	Shutter normal 1000 W/m^2	T_w		T_p		$\Delta T = T_p - T_w$	
					σ		σ		σ
5	14	651	9.1	837	2.8	1626.6	7.8	789.6	7.9
6	17	636.7	10.8	863.5	4.8	1715.7	10.2	852.2	8.4
7	19	602.8	11.5	903.4	3.9	1776.9	17.7	873.5	18.8
8	22	565.9	12.4	930.9	0.5	1814.3	10.2	883.4	10.3

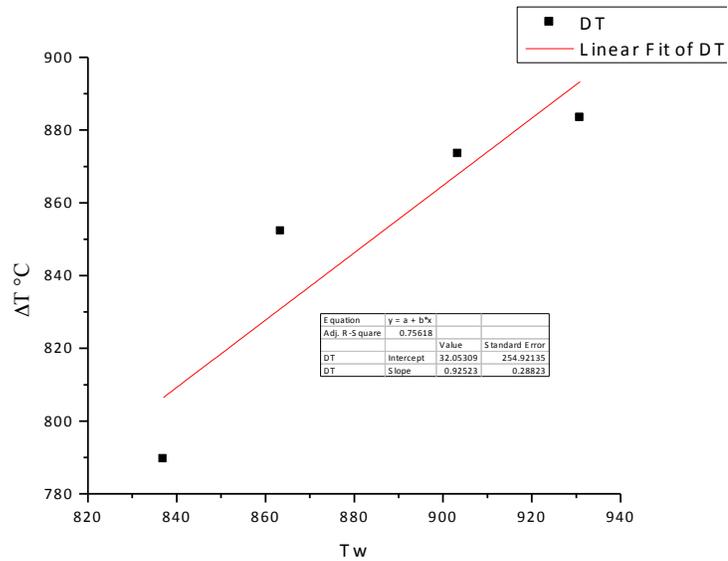


Figura 17: Diferencia de temperaturas (ΔT) en función de la temperatura de la superficie T_w (ventana cuarzo)

En la figura 18 se muestra el comportamiento del F.C. ϵ en función de T_w para tres pruebas distintas, en este grafico se puede observar que el F.C. ϵ es prácticamente constante para los tres caso con un nivel de incertidumbre muy grande (± 0.2). Sin embargo, se puede considerar que el F.C. ϵ está en torno a los 0.9.

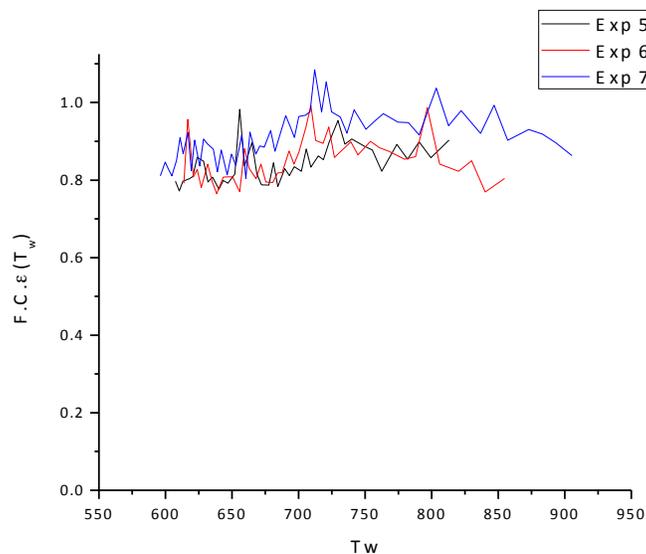


Figura 18: Comportamiento del F.C. ϵ en función de T_w , para los exp. 5,6 y 7 (ventana cuarzo)

5 Conclusiones

En las pruebas con ventana vacía y ventana de PYREX se observó que la medición del pirómetro incrementaba su temperatura en par de segundos, sin embargo, conforme la placa incrementaba su temperatura, la lectura del pirómetro se incrementa en una función a la cuarta potencia, producto de la contribución de la energía emitida por la placa. En el caso de los experimentos con ventana de cuarzo no se pudo apreciar el mismo fenómeno debido a que este experimento se realizó con condiciones de radiación relativamente bajas.

El tiempo de respuesta de todos los experimentos, sin importar el tipo de ventana que se empleó y la potencia suministrada fue de 60 segundos. Lo que implica que las condiciones en el entorno experimental fueron relativamente constantes. Ya que el coeficiente de pérdidas fue equivalente para todas las pruebas.

Para los experimentos con ventana vacía y con ventana de cuarzo, se observó que la diferencia entre la medición con pirómetro y con termopar ΔT , tenía un incremento proporcional al incremento de la temperatura de la pared, esto debido a que tanto para la ventana vacía como para la ventana de cuarzo ambas ventanas son completamente transparentes a las longitudes de onda en las que mide el pirómetro. En el caso de la ventana PYREX esta ΔT se pueden considerar constantes entre un valor de 630 ± 25 °C y no se ve con claridad la contribución de la radiación reflejada como en los casos anteriores, esto se puede deber a que el PYREX no es completamente transparente a las longitudes de onda en las que mide el pirómetro.

Para los experimentos con ventana vacía y PYREX el F.C. ϵ en función de T_w se observa que a mayor temperatura de pared, mayor será el F.C. ϵ y para los tres experimentos la tendencia es la misma, presentando una mayor repetitividad que el caso cuando se empleó la ventana vacía. Por otra parte se observa que a la temperatura de 745°C tanto la

temperatura del pirómetro como la del termopar se igualan. Lo que nos dice que para esta temperatura la emisividad de 0.9 que es la que tiene el pirómetro es la misma.

6 Referencias

Aitor Marzo Rosas, Medida de temperatura en entornos de radiación solar concentrada Tesis doctora, 2012, Universidad de Almería España.

Alonso Elisa, Carlos Pérez-Rábago, José Gonzalez-Aguilar and Manuel Romero, 2012, "Thermal Performance and Residence time distribution Determination in a Solar Reactor for Chemical Kinetics", SolarPACES 2012 Symposium, Marrakech, Morocco.

Pérez-Enciso R., E. Brito-Bazan, C. A. Arancibia-Bulnes, D. Riveros-Rosas, C. A. Perez-Rábago, J.J. Quiñones, C. A. Estrada, "Correction of the Concentrated Sunlight Spot's Drift of the CIE-UNAM Solar Furnace", 2012, SolarPACES 2012 Symposium, Marrakech, Morocco.