

Trabajo Práctico N°1

Haz Láser

Objetivos del trabajo

- Aplicación del método de la matriz ABCD.
- Caracterización de un haz láser continuo de baja potencia.
- Obtención y procesamiento de imágenes.
- Familiarización con métodos para ajustar datos experimentales a curvas arbitrarias.
- Obtención de parámetros a partir de curvas experimentales.
- Adecuación del tamaño y colimación de un haz láser usando lentes.

Condiciones de entrega

- Fecha: viernes 10 de mayo 2021.
- Modo: informe formato digital PDF a través del campus virtual de la materia.
- Cantidad máxima de páginas: 10 (sin incluir el script del algoritmo).

Enunciado

En este trabajo se busca estudiar parámetros característicos de un haz láser continuo de baja potencia y obtener un haz colimado y del tamaño deseado a través del uso de lentes. Para ello se deberá tener bien claros los siguientes conceptos: la aproximación paraxial, el método matricial para la óptica con la matriz ABCD y las características de un haz láser gaussiano (TEM_{00}).

Los cálculos y simulaciones a realizar se basan en mediciones de un láser de laboratorio. El archivo con las mediciones está disponible en la aula virtual de la materia.

Para realizar y analizar las simulaciones se sugiere el uso de programas de análisis numérico como por ejemplo *GNU Octave* o *MATLAB*®.

Para la confección del informe se recomienda leer *¿Cómo se evalúa un informe de laboratorio?*, disponible en el aula virtual de la materia.

1. Arreglos ópticos usando la matriz ABCD

Se desea adecuar el tamaño de un haz láser para introducirlo en una fibra óptica multimodo que posee un núcleo de $50\ \mu\text{m}$ de diámetro ubicada a no más de 10 mm del arreglo óptico. Por lo tanto, la configuración óptica debe reducir y colimar el haz láser para que coincida con el tamaño del núcleo de la fibra óptica. La configuración óptica debe estar basada en lentes comerciales y su diseño se debe realizar usando la matriz ABCD. Ejemplo de fabricantes y vendedores son: *Thorlabs*, *Edmund Optics*, *Ophir Optics* y *Eksma Optics*.

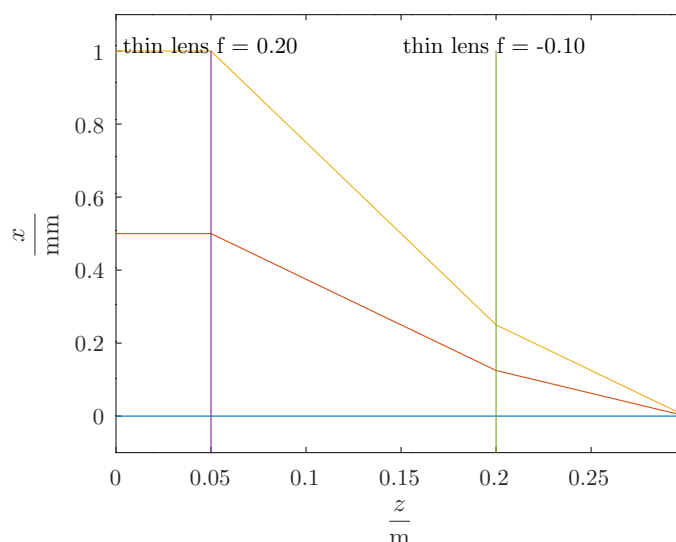


Figura 1: Trazado de rayos para una lente plano-convexa (200 mm) colocada a 5 cm respecto al origen del eje óptico y luego una lente plano-cóncava (−100 mm) dispuesta a 15 cm de la primera.

Como primera aproximación, se debe considerar al haz láser como un conjunto de rayos paralelos al eje óptico. De esta forma, se pueden utilizar los conceptos de óptica geométrica y matriz ABCD¹. En la aproximación paraxial, un arreglo óptico que enfoque y colime un haz de luz implica que los rayos de salida salen paralelos (colimación) y a una menor altura respecto del eje óptico (enfocar). También cabe recordar que el determinante de la matriz ABCD de la configuración óptica debe ser unitario y que la convención del signo del foco para lentes convergentes (plano-convexas) y divergentes (plano-cóncavas) es positivo y negativo, respectivamente.

El arreglo óptico debe estar compuesto solo por dos lentes. Las distancias focales de las lentes utilizadas y sus posiciones relativas deben ser determinadas por el/la estudiante. Asimismo, la primera lente debe ubicarse a 50 mm del láser. Se recomienda utilizar lentes esféricas delgadas con diámetros mucho mayores al diámetro del haz láser.

La separación de las lentes y las distancias focales de las mismas deben determinarse mediante la matriz ABCD. Para esto se debe calcular la matriz correspondiente al arreglo de lentes con su camino intermedio, es decir el producto de las 4 matrices: camino de 50 mm, lente 1, camino entre lentes, lente 2. Teniendo la matriz total del arreglo, la cual dependerá de las distancias focales y la separación de las lentes, se pueden obtener las restricciones necesarias para obtener un haz colimado con el tamaño requerido. Primero se debe aplicar la restricción de la colimación, y con esto se obtiene la relación entre las posiciones de las lentes. Si se ingresa un rayo con ángulo nulo se debe obtener un rayo también con ángulo nulo. De esa forma, se obtiene la restricción para el parámetro C de la matriz ABCD de la configuración óptica o matriz resultante. Luego, se debe determinar la “amplificación”, que depende del parámetro A de la matriz resultante. Usando la restricción de la distancia entre lentes obtenida antes, se puede llegar a la relación entre las alturas de los rayos. Con estas restricciones se puede elegir los mejores arreglos de lentes para obtener los resultados deseados.

Algo muy importante a tener en cuenta es que **los valores de las distancias focales o radios de curvatura de la lentes deben ser valores estándar** y se tiene que aclarar en el informe las características de las lentes elegidas para realizar el arreglo óptico: fabricante, forma (esférica,

¹ver clase *Cavidades ópticas*

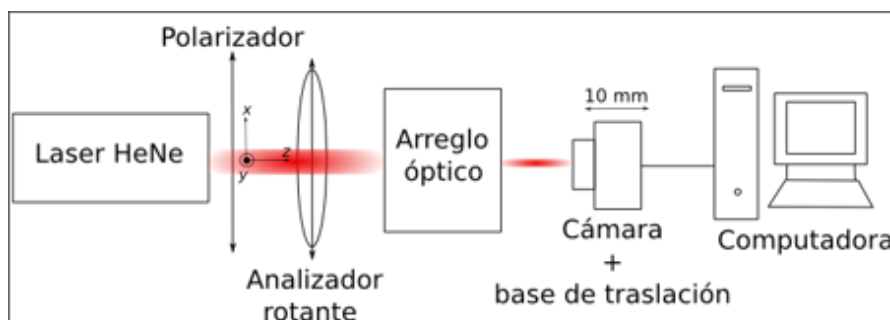


Figura 2: Arreglo experimental para la caracterización de un haz láser.

plano-convexa, plano-cóncava, etc.), radio de curvatura, distancia focal, diámetro, recubrimiento anti-reflectante, entre otras.

Determinada la configuración óptica, en el informe se debe presentar: el desarrollo llevado a cabo para obtenerla, las lentes elegidas para cada caso, la matriz ABCD resultante y un diagrama del trazado de rayos. Para el diagrama, utilizar como altura del rayo un valor arbitrario pero útil para verificar los cálculos. Se recomienda usar 1 mm. En la figura 1 se presenta un ejemplo del trazado de rayos para una lente de distancia focal de 200 mm y otra de -100 mm, separadas 15 cm, con una altura del rayo arbitraria de 1 mm y 0,5 mm. Las líneas verticales en las posiciones 5 cm y 20 cm representan a las lentes delgadas. Cabe destacar que con este arreglo no se logra a la salida un haz colimado ni tampoco el tamaño requerido.

Para verificar el comportamiento del arreglo óptico calculado se puede utilizar el paquete *optics* de *Octave*. Éste tiene una función para realizar el trazado de rayos en base a la matriz ABCD de una configuración óptica determinada.

2. Medición de un haz láser gaussiano

Se tiene un láser continuo cuyo medio activo es una mezcla de gases He-Ne que emite un haz gaussiano ($w_0 < 1$ mm) con una longitud de onda principal de emisión $\lambda_0 = 632,8$ nm. Este láser fue utilizado en el arreglo experimental que se presenta en la figura 2. El haz láser es seguido por dos componentes denominados polarizador y analizador rotante. El primero permite seleccionar una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico del haz. Por otro lado, el analizador, permite ajustar la intensidad luz. El arreglo óptico está compuesto por dos lentes para lograr los anchos de haz deseados. Finalmente, una cámara CMOS montada sobre una base de traslación, se encarga de detectar el haz resultante. En la figura 2 también se muestra el sistema de referencia de donde se aprecia que se ha adoptado el eje z como eje óptico y que el origen de coordenadas coincide con el dispositivo láser. Para verificar que el haz está colimado, se realizaron mediciones en distintas posiciones 300 mm, 305 mm y 310 mm usando la base de traslación para mover la cámara.

Se realizó la medición sin poner ninguna lente en el arreglo óptico (haz en espacio libre). Las imágenes resultantes se encuentran en el archivo `mediciones_tp1_1C2021.zip` disponible en el aula virtual de la materia que contiene 3 imágenes obtenidas en las posiciones indicadas más arriba.

- `haz_300mm.jpg`
- `haz_305mm.jpg`
- `haz_310mm.jpg`

A partir de estas mediciones se debe obtener el tamaño del haz láser en el origen de coordenadas.

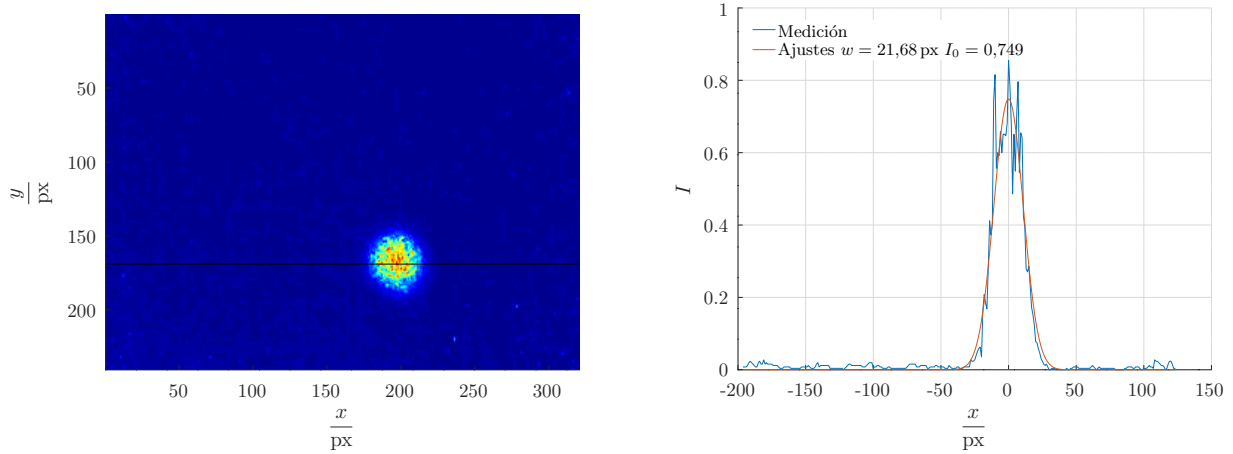


Figura 3: Izq: imagen del haz convertida a una escala de falso color. La línea negra horizontal es la posición elegida para el ajuste. Der: intensidad del haz en la posición elegida y su correspondiente ajuste.

3. Obtención de parámetros a partir de las mediciones

Para realizar los ajustes hay una gran cantidad y diversidad de herramientas, donde el/la estudiante es libre de elegir. Ésta elección debe ser explicitada y justificada en el informe. Suponiendo que el haz generado por el láser es gaussiano², se propone un método para obtener la intensidad y “radio” del haz de las imágenes captadas. Esta consta de la realización de ajustes en el eje x para diferentes valores de y y viceversa usando las siguientes ecuaciones:

$$I(x, y_b, z_a) = I_0 \exp \left[\frac{-2(x^2 + y_b^2)}{w_{x,b,a}^2} \right] \quad (1)$$

y

$$I(x_b, y, z_a) = I_0 \exp \left[\frac{-2(x_b^2 + y^2)}{w_{y,b,a}^2} \right] \quad (2)$$

donde $w_{x,b,a}$ es el w correspondiente al corte en y_b , a la distancia z_a del origen y sobre el eje x , de forma similar, $w_{y,b,a}$ corresponde al corte x_b , a la distancia z_a y sobre el eje y .

Se presenta un ejemplo en la figura 3. A la izquierda se puede observar la imagen en un falso color junto con el corte sobre el que se realiza el ajuste para un determinado y_b . En la derecha se presenta el perfil de intensidad sobre el eje x junto con el ajuste realizado. Todo para una distancia z_a determinada respecto al origen de coordenadas (láser He-Ne).

Cabe notar que en la figura 3 se sitúa el origen del eje sobre el que se realiza el ajuste. En este caso se desplazó los valores de las mediciones para que estén centradas en $x = 0$ para poder utilizar (1). Si no se realiza este desplazamiento se debe agregar un parámetro más al ajuste que contemple la posición del haz.

Es importante destacar que el ajuste sobre el eje x puede no ser igual al ajuste sobre el eje y , ya sea por errores en la medición, errores en el ajuste, diferencias en el haz (no es perfectamente simétrico) y otros factores a estudiar por el/la estudiante. En ese caso, debe quedarse con el promedio de ambos valores.

Para realizar los ajustes se recomienda convertir las imágenes a escala de grises para facilitar el procesamiento. Para el cálculo del ancho se puede utilizar la función `fminsearch` o `fmins`, esta última

²ver clase *Modos EM transversales*

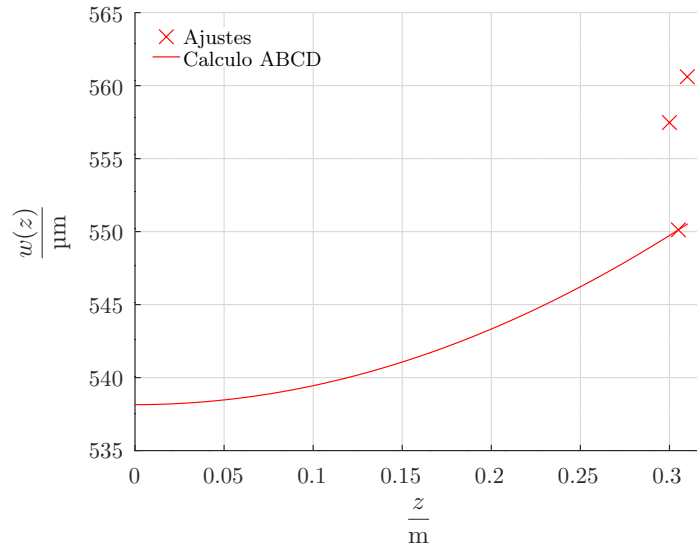


Figura 4: Parámetro w del haz gaussiano en función de la posición para un camino libre y valores de ajustes realizados en las posiciones de las mediciones.

perteneciente al paquete `optim`. En ambos casos se debe minimizar una función de error cuadrático medio entre los valores de la medición y los correspondientes a la función gaussiana que describe la intensidad del haz.

Sabiendo que en la cámara cada pixel mide $(20 \pm 2)\mu\text{m}$ se debe calcular el ancho del haz en cada uno de los casos medidos, siendo este $2w$.

En esta sección también es importante cuantificar la precisión del ajuste a fin de establecer el error de la suposición de que el haz tiene un perfil espacial gaussiano. Para esto se debe calcular el error de los ajustes en el eje x y en el eje y respecto al valor adoptado de w en esa posición de z para cada ajuste realizado.

4. Comportamiento del haz gaussiano

Para estudiar el comportamiento del haz gaussiano, lo primero que se debe realizar es determinar el parámetro w_0 que lo caracteriza. Para esto se utilizan los ajustes realizados a las mediciones y el conocimiento de como varía el ancho de un haz gaussiano en función de la posición³, es decir

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

donde

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda_0}. \quad (4)$$

Se debe calcular el valor de w_0 a partir de los w correspondientes a los ajustes del camino libre. Este valor de w_0 será utilizado para todos los cálculos restantes. Los pasos para obtenerlo deben estar en el informe. También se debe calcular el error entre los 3 valores respecto al valor medio ya que se supone que el haz está colimado.

Habiendo obtenido w_0 es posible estudiar que sucede con el haz gaussiano cuando usamos el arreglo óptico implementado en la sección 1. Es importante recordar que el láser genera un haz y

³ver clase *Modos EM transversales*

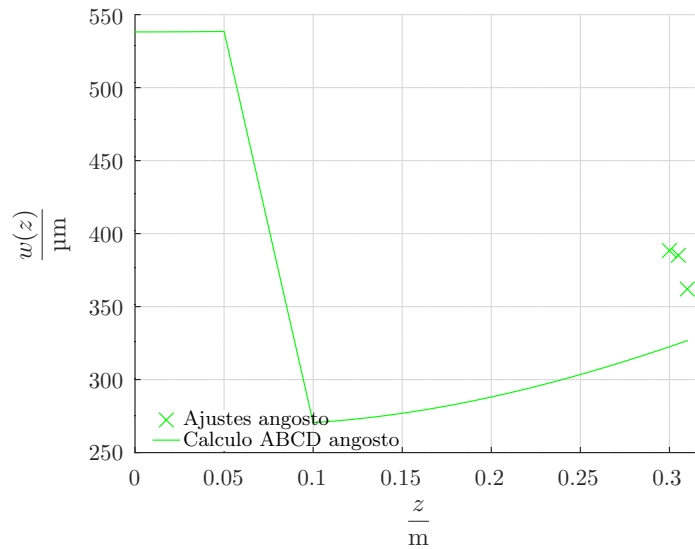


Figura 5: Parámetro w del haz gaussiano en función de la posición para un camino con arreglo óptico que reduce el diámetro y los valores de ajustes realizados en las posiciones de las mediciones.

no un rayo. Éste tiene un ancho y un radio de curvatura que varía en el espacio y sus parámetros dependen de la longitud de onda. Por lo tanto, no alcanza solo con utilizar la matriz ABCD, es también necesario hacer uso del parámetro gaussiano q ,⁴

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda_0}{\pi w^2(z)}. \quad (5)$$

Mediante este parámetro y la matriz ABCD se puede calcular el ancho del haz en cada punto, como así también el radio de curvatura,

$$\frac{1}{q_s} = \frac{C + D \left(\frac{1}{q_e} \right)}{A + B \left(\frac{1}{q_e} \right)} \quad (6)$$

donde los subíndices s y e notan salida y entrada, respectivamente. Cabe recordar que en $z = 0$ el radio de curvatura tiende a infinito, por lo tanto $\frac{1}{q_e}$ es imaginario puro.

Calculando la matriz ABCD correspondiente al avance del haz sobre el eje z , con un paso determinado, se puede obtener el parámetro q en todos esos puntos. Tomando la parte imaginaria de q se puede despejar el parámetro w del haz. Realizando estos cálculos para el camino libre se puede ver como se ensancha el haz a medida que avanza sobre el eje óptico z . Los resultados obtenidos deben ser los mismos que evaluar (3) en esos valores de z . En la figura 4 se observa el parámetro w de un haz gaussiano en función de la posición y los valores correspondientes a los ajustes realizados en la sección anterior.

Habiendo verificado el algoritmo en espacio libre, se puede calcular q para el arreglo de lentes de la sección 1. El procedimiento es: 1) aplicar la matriz ABCD obtenida en la sección 1 y determinar el parámetro q a la entrada de la fibra, o sea, a 10 mm del arreglo óptico; 2) tomar la parte imaginaria y despejar el ancho o parámetro w del haz; y 3) tomar la parte real y despejar el radio de curvatura. Establecer si se cumplen los objetivos y en el caso de que no se cumplan, realizar los cambios necesarios en el arreglo óptico para que así sea. Todo este desarrollo debe estar explicitado en el informe.

Se debe realizar un diagrama con la evolución del parámetro w del haz a lo largo del camino óptico para el arreglo de lentes. En el mismo gráfico se deben incluir los anchos correspondientes a

⁴ver clase *Modos EM transversales*

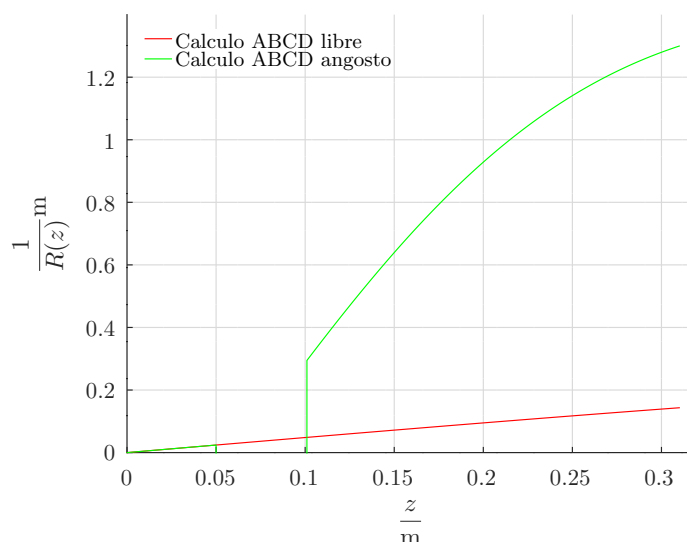


Figura 6: Inversa del radio de curvatura en función de la posición para un camino libre (línea roja) y otro con un arreglo óptico que reduce el diámetro del haz (línea verde).

los ajustes realizados. Un ejemplo de lo pedido se presenta en la figura 5. Asimismo, se debe realizar un diagrama con la evolución de la inversa del radio de curvatura del haz. Se debe prestar atención dentro del arreglo ya que este parámetro toma valores mucho mayores que en el camino libre. En estos casos, se debe ajustar la escala para que estos queden fuera del gráfico y permitan la visualización del resto de los valores, como se observa en la figura 6.

5. Detalles sobre el Informe

5.1. Resumen del trabajo

El trabajo deberá estar encabezado por un breve resumen que detalle su contenido (objetivos, lo realizado, resultados y conclusiones). El resumen debe ser escrito de forma tal de despertar el interés y la curiosidad del/la lector/a por el trabajo.

5.2. Desarrollo

En el informe debe estar incluido:

- El análisis de la elección de las lentes para obtener el arreglo óptico para introducir el haz láser en la fibra óptica.
- La matriz ABCD correspondiente al arreglo óptico y su respectivo trazado de rayos.
- Los anchos resultantes de los ajustes de las mediciones.
- El parámetro q correspondiente al haz láser y el parámetro correspondiente al arreglo óptico implementado.
- Análisis de la aplicación del arreglo óptico al haz láser medido.

Las figuras que no deben faltar en el informe son:

- El trazado de rayos del arreglo óptico para obtener el haz enfocado y colimado.

- Los tres ajustes del w del haz con las imágenes de las mediciones. En las imágenes de las mediciones se debe marcar la posición del ajuste. En las figuras de los ajustes se debe presentar los valores utilizados para el ajuste y la curva de ajuste correspondiente con sus parámetros.
- El cálculo del w del haz en función de la posición.
- El cálculo de la inversa del radio de curvatura en función de la posición.

5.3. Análisis y comparación de los resultados

Todo resultado presentado en el informe debe estar analizado. Se deben comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante la simulación.

Los gráficos deben ser claros y bien diseñados. Debe analizarse si los resultados son compatibles o no. De existir diferencias, éstas deben ser cuantificadas y deben presentarse posibles explicaciones para estas diferencias.

En todos los gráficos debe figurar una leyenda indicando a qué corresponde cada curva o nube de puntos y los parámetros usados para la simulación de la misma.

5.4. Conclusiones

El informe debe culminar con las conclusiones, que deben ser breves y conceptuales. Deben estar focalizadas en los objetivos que se cumplieron en el trabajo y eventualmente en resultados interesantes adicionales que se hubieran obtenido.

6. Sugerencias

- Para el desarrollo de este trabajo se recomienda utilizar el tutorial de uso de *Octave* disponible en la página web del desarrollador.
- Prestar especial atención a las unidades utilizadas para los cálculos.
- Las imágenes de las mediciones convertirlas primero a escala de grises y luego a double con las funciones del paquete `image`.
- Calcular el parámetro w_0 a partir de la medición del camino libre que mejor se adapte a los anchos que se obtienen con los arreglos y las demás mediciones.