



# APUNTES ELECTRÓNICOS DE SENSORES NANOESTRUCTURADOS

2019

FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y  
DISEÑO  
CARRETERA TRANSPENINSULAR ENSENADA-  
TIJUANA  
NUMERO 3917, COLONIA PLAYITAS

Ensenada, B.C., C.P. 22860. Teléfono 646-1750744, Fax 646-  
1744333

E-mail: [Jorge.mata@uabc.edu.mx](mailto:Jorge.mata@uabc.edu.mx)

## CONTENIDO

**I. Nombre de la Unidad de aprendizaje: SENSORES NANOESTRUCTURADOS**  
**Clave: 013224**

**Etapas de formación a la que pertenece: TERMINAL**  
**Carácter de la Unidad de aprendizaje: Obligatoria**  
**Requisitos para cursar la unidad de aprendizaje:**

**Formuló: Dr. Jorge Octavio Mata Ramírez y Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez,**

### **II. PROPÓSITO GENERAL DEL CURSO**

El curso de desarrollo de Sensores nanoestructurados brinda las habilidades requeridas para diseñar prototipos y el proceso Nanotecnológico desde su inicio, es decir desde su planteamiento, idea, creación, arranque y operación hasta la concepción de un producto terminado.

La asignatura pertenece a la etapa terminal y requiere los conocimientos y habilidades adquiridas en el curso de ingeniería de nanomateriales, ingeniería de procesos nanotecnológicos, así como la de síntesis y caracterización de nanomateriales, se recomienda previamente los cursos de fundamentos de electrónica, ingeniería de nanomateriales y productos nanoestructurados

### **III. COMPETENCIA DEL CURSO**

Diseñar, analizar e integrar tecnologías nanotecnológicas en forma multidisciplinaria para producir de esta manera sensores y dispositivos nanotecnológicos de vanguardia, y de esta forma atender una necesidad de un proceso, una investigación o algo meramente comercial y contribuir de esta manera al desarrollo tecnológico e industrial de la región y del país, con un compromiso social y respeto al medio ambiente.

### **IV. EVIDENCIA(S) DE DESEMPEÑO**

1. Exposiciones breves en las que se observe la capacidad de integrar los conocimientos adquiridos de manera clara y concreta.
2. Prácticas y Reportes de Laboratorio
3. Proyecto final (Elaboración de un producto mediante procesos nanotecnológicos)

### **UNIDAD 1. SENSORES NANOESTRUCTURADOS: INTRODUCCIÓN**

**Competencias: Entender la importancia del origen fisicoquímico del funcionamiento de un sensor y su aplicación e implicación nanotecnológica.**

### **CONTENIDO TEMÁTICO:**

- 1.1. ¿Que son los sensores?
- 1.2. Historia de los sensores y estado del arte
  - 1.2.1. Introducción y tecnologías
  - 1.2.2. Preparación de sensores
  - 1.2.3. Métodos clásicos para preparar sensores
  - 1.2.4. Preparación de sensores nanoestructurados basados en diferentes materiales
  - 1.2.5. Principales tipos de sensores analógicos
  - 1.2.6. Principales tipos de sensores digitales
  - 1.2.7. Electrodo electrocatalítico
  - 1.2.8. Electrodo con nanopartículas y nanotubos
  - 1.2.9. Electrodo electrocatalítico basado en películas nanoestructuradas
  - 1.2.10. Sensores voltamétricos, impedimétricos y Biosensores
- 1.3. Definiciones y técnicas: Conceptos: sensor, transductor
- 1.4. Características estáticas: Resolución y Exactitud
- 1.5. Sensibilidad y Precisión
- 1.6. Incertidumbre y Selectividad
- 1.7. Curva de calibración
- 1.8. Repetibilidad y Reproducibilidad.
- 1.9. Características dinámicas

## UNIDAD 2. FUNDAMENTOS DE NANO Y MICRO FABRICACIÓN Y EFECTOS DE ESCALANANOTECNOLÓGICOS

Competencias: Estudiar y aprender los fundamentos de la nanofabricación, desde la teoría, entendiendo las limitaciones actuales en la implementación de los nuevos materiales.

### CONTENIDO TEMÁTICO:

- 2.1. Fundamentos de nano y micro fabricación y efectos de escala
  - 2.1.1. Introducción.
  - 2.2. Escalas y micro sensores
  - 2.3. Principios de microfabricación
  - 2.4. Silicio, fotolitografía, deposición, grabado, dopaje
  - 2.5. Sistemas Micro-electro-mecánicos (MEMS)
  - 2.6. Litografía suave
  - 2.7. Biosensores
  - 2.8. Sensores para Microfluidos y sistemas de microanálisis
  - 2.9. Flujos laminares
  - 2.10. Sensores microfluidicos y sensores moleculares

## UNIDAD 3. TIPOS DE SENSORES; TEORIA Y FUNCIONAMIENTO

Competencias: Comprender el mecanismo de acción de un sensor nanotecnológico sus alcances, y sus aplicaciones.

Contenido Temático:

- 3.1. Respuestas electroquímicas

- 3.2. Sensores electroquímicos
- 3.3. Principios de medidas electroquímicas
- 3.4. Aplicaciones nanotecnológicas
- 3.5. Soportes y sustratos
- 3.6. Nanotubos de carbono y sensores de Grafeno
- 3.7. Sensores ópticos
- 3.8. Teoría básica
- 3.9. Espectroscopia de absorción

#### UNIDAD 4. SENSORES Y TRANSDUCTORES A NANOESCALA

Duración: horas 20 HC: 4 HL: 16

Competencias: Entender el funcionamiento de un sensor, así como de todo el proceso nanotecnológico desde origen hasta su funcionamiento

Utilizando herramientas adecuadas, fundamentadas en nanomateriales y soportes adecuados.

Contenido Temático:

- 4.1. Transductores mecánicos
- 4.2. Introducción: Cantiléver, sensores moleculares
- 4.3. Sensores acústicos
- 4.4. Sensores térmicos,
- 4.5. Termopares, termistores,
- 4.6. Sensores de temperatura,
- 4.7. Sensores infrarrojos
- 4.8. Sensores implantables
- 4.9. Sensores biomédicos
- 4.10. Electrónica auxiliar para sensores nanoestructurados
- 4.11. Tarjetas de adquisición de datos
- 4.12. Procesamiento de datos.

#### VI. ESTRUCTURA DE LAS PRÁCTICAS

No.de Práctica

1 Aplicar alguna técnica de fabricación de nanomateriales y las etapas de diseño para crear un producto nanotecnológico.

Sintetizar nanotubos de carbono mediante la técnica de spray pirolisis 26 ml de tolueno, 0.760 gr de ferroceno

tubos de cuarzo, horno, nebulizador. Argón, flujómetro,

2 ELABORACION DE UN SENSOR NANOESTRUCTURADO:

Comprender los principios básicos de los procesos de fabricación de nanomateriales y desarrollar capacidad de análisis y síntesis

Caracterización cristalográfica del material por Rayos X

Uso de Rayos X 4-8 horas

Caracterización del material

Uso del potenciostato

Potenciostato Chi

Depósito de Películas delgadas

sputtering. Blanco de Cu, campana de sputtering

Nanolitografía Oblea de silicio, PMMA alambre de oro, acetona, termoplato, rejilla de cobre, alcohol

3 Elaboración y caracterización un sensor nanoestructurado Desarrollo de la Curva de calibración  
Depende del proyecto a realizar

Nota: Se sugiere realizar al menos dos prácticas de síntesis de materiales, según sea el caso del producto nanotecnológico a desarrollar.

## VII. METODOLOGÍA DE TRABAJO

1. Exposición oral del profesor con medios audiovisuales (computadora y cañón proyector) de temas relacionados
2. Exposiciones cortas por parte de los estudiantes de algunos temas relacionados.
3. Realizar prácticas de laboratorio de algunos temas incluidos en clase.
4. Organizar equipos de trabajo para que realicen un producto desde su creación hasta su producción como proyecto final y que los alumnos realicen una exposición sobre los resultados obtenidos. Los estudiantes tendrán que realizar sus exposiciones según avances programados.
5. Asesoramiento en la realización del proyecto final.

## VIII. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Exposiciones, asistencias, Prácticas y Reportes (acreditación de las prácticas de laboratorio mediante asistencia, elaboración y reporte) Proyecto final: Con base en artículo 76 del Estatuto Escolar de la Universidad, las Unidad de aprendizaje que sean predominantemente prácticas, sí puede ser evaluada mediante la realización de un proyecto. Deben ser claramente expuestos los criterios de evaluación al inicio de clases, incluyendo los porcentajes que serán otorgados por la presentación de avance de proyecto, así como establecer en qué momentos durante el ciclo escolar se realizarán las revisiones. Al aplicar la modalidad de evaluación mediante realización de proyecto, no se aplican exámenes tipo ordinario y extraordinario, la calificación de examen ordinario, se determina por la realización del proyecto y que el alumno cuente con un mínimo de 80% de asistencias. El alumno podrá exentar el curso, si cumple con el criterio de calificación mínima aprobatoria obtenida como resultado de la evaluación durante el período de clases. El profesor deberá conservar evidencias de las revisiones de avance de proyecto.

Exámenes parciales 50%. Tareas y trabajos, bitácora de laboratorio 30%. Exposiciones 20%. Acreditación: Obtener una calificación mínima de 60 en el promedio de los exámenes parciales, de lo contrario presentar un examen ordinario y obtener una calificación mínima de 60. Para presentar el examen ordinario es necesario contar por lo menos con el 80 % de las asistencias.

# Manual de anillos Helmholtz

\*Para poder medir el campo magnético de estas bobinas, se ocupará un gaussímetro.

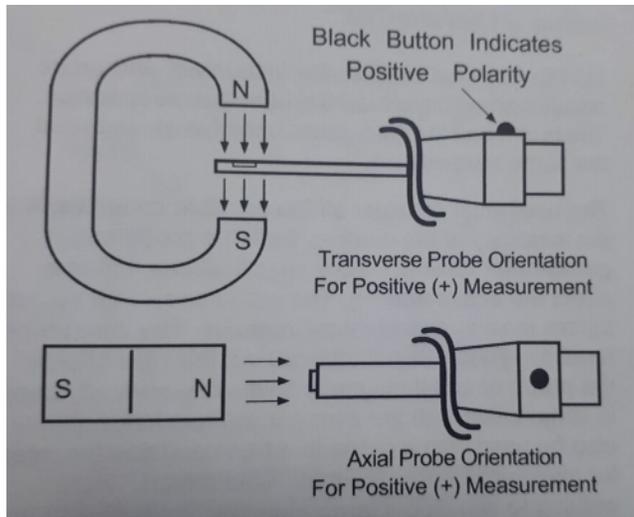
Para hacer uso de las bobinas de Helmholtz siga los pasos a continuación.

1. Levante la tapa negra del lado contrario a la etiqueta y saque 2 caimanes, una brújula y una pila de 9 volts.
2. Verifique que los extremos de los cables de cobre que sobresalen de cada bobina no estén oxidados, en caso de que si lijar con una lija no. 400.
3. Conectar un lado del caimán en el extremo de uno de los cables, repetir el mismo procedimiento con la otra bobina, colocar la brújula en la zona roja.
4. Las cabezas libres de los caimanes irán conectadas en cada lado (positivo y negativo) de la pila de 9 volts. **OJO:** al momento que se conecten los dos caimanes, se moverá la brújula al sentido del campo magnético generado por las bobinas.
5. Primeramente, saca el la caratula del gaussímetro, la punta de prueba y el cable que viene dentro de la bolsa.
6. Conecta la sonda al centro superior del gaussímetro y a la punta de prueba (con cuidado de no doblarla o moverla más de 45°).
7. Presiona el botón ON que se encuentra en el panel, una vez que te aparezca en ceros la pantalla selecciona DC (debido a que se está usando una batería).

**\*Pasos opcionales\***

- Se puede usar el botón “Max Hold” para capturar y mostrar las lecturas más altas del campo electromagnético. Si se quiere reiniciar la lectura para tomar otro punto seleccione “Max Reset”.
  - El botón “filter” alterna entre una visualización inmediata o una promedio de las últimas 8 lecturas.
  - “Zero probe” se usa para bajar a zero o disminuir los niveles de campo del ambiente. (Disminuye el ruido que puede haber en el ambiente donde se genera la lectura.) Para usar esta tecla, se presiona 2 veces y deja que trabaje sola hasta que te vuelva a arrojar números otra vez, veras como disminuye o llega a cero.
8. Acerca la punta del gaussímetro al centro de las dos bobinas (arriba de la brújula) para que haga una lectura del campo magnético que debería de ser alrededor de 7G.**OJO:**

Asegúrate que la parte donde se encuentra la bolita





## Introducción

Se denomina vacuómetro a un instrumento que permite realizar la medición de la presión cuando ésta resulta menor a la presión de la atmósfera. Por eso se dice que los vacuómetros miden el vacío.

En diversos sectores industriales y en el ámbito de la investigación, se suele trabajar en condiciones de vacío. Para esto se necesita un vacuómetro que contribuya a medir y controlar los valores.

Los vacuómetros disponen de sensores que pueden medir la presión con gran exactitud más allá de la clase de gas. Estos dispositivos también se destacan por su estabilidad y por tener una dependencia reducida de la temperatura.

## Objetivo

El propósito de este presente manual es que sirva de guía para diseñar, fabricar, operar y calibrar un sensor de vacío basado en arduino.

## Materiales

- Arduino UNO
- Sensor BMP280
- Potenciómetro 10 k $\Omega$
- Resistencia 220  $\Omega$
- Cables
- Tornillos 5-40
- Tonillos 10-32
- Medidor de vacío 550 descompuesto
- Tubo de acero inoxidable
- Filamento de 3mm para impresora 3D
- Pantalla LCD 16\*2
- Acrílico
- Estaño
- Pasta para soldar estaño

## Equipo

- Torno
- Fresadora CNC
- Soldadura TIG
- Cautín para soldar estaño
- Pinzas de corte
- Segueta
- Machuelos

- Brocas
- Fresas

## Software

- Arduino
- Solidworks
- MasterMX
- Origin

## Instrucciones de construcción

1. Cargue el siguiente código en Arduino para el sensor, este código es general para presiones altas.

```

1. #include <Wire.h>
2. #include <Adafruit_Sensor.h> // incluye librerías para sensor BMP280
3. #include <Adafruit_BMP280.h>
4.
5. Adafruit_BMP280 bmp; // crea objeto con nombre bmp
6.
7. float TEMPERATURA; // variable para almacenar valor de temperatura
8. float PRESION; // variable para almacenar valor de presión
   atmosférica
9.
10. void setup() {
11.   Serial.begin(9600); // inicializa comunicación serie a 9600
   bps
12.   Serial.println("Iniciando:"); // texto de inicio
13.   if ( !bmp.begin() ) { // si falla la comunicación con el
   sensor mostrar
14.     Serial.println("BMP280 no encontrado !"); // texto y detener flujo
   del programa
15.     while (1); // mediante bucle infinito
16.   }
17. }
18.
19. void loop() {
20.   TEMPERATURA = bmp.readTemperature(); // almacena en variable el
   valor de temperatura
21.   PRESION = bmp.readPressure()/100; // almacena en variable el valor
   de presión dividido
22.     // por 100 para convertirlo a hectopascales
23.   Serial.print("Temperatura: "); // muestra texto
24.   Serial.print(TEMPERATURA); // muestra valor de la variable
25.   Serial.print(" C "); // muestra letra C indicando grados
   centígrados
26.
27.   Serial.print("Presión: "); // muestra texto
28.   Serial.print(PRESION); // muestra valor de la variable
29.   Serial.println(" hPa"); // muestra texto hPa indicando
   hectopascales
30.
31.   delay(5000); // demora de 5 segundos entre lecturas
32. }

```

2. Construya el circuito de acuerdo al diagrama de la figura 1 con un sensor bmp 280.

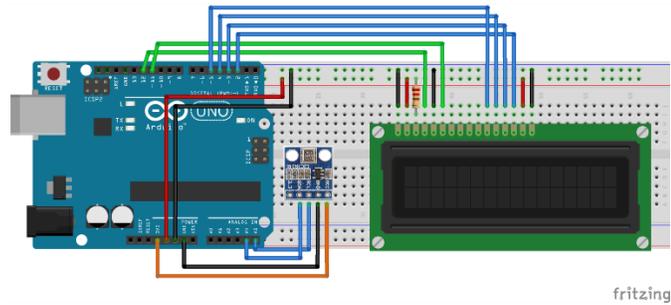


Figura 1.- Diagrama general del vacuometro con arduino

3. Para comenzar con las pruebas de vacío es necesario fabricar una pieza que pueda hacer nua conexión eléctrica en condiciones de vacío, para ello tome un medidor de vacío 555 descompuesto y corte los pasamuros que este tiene, posteriormente hay que soldar estos paramuros a una pieza de acero con conexión tipo KF 25 y hacer las conexiones electricas del pasamuros al sensor BMP280.

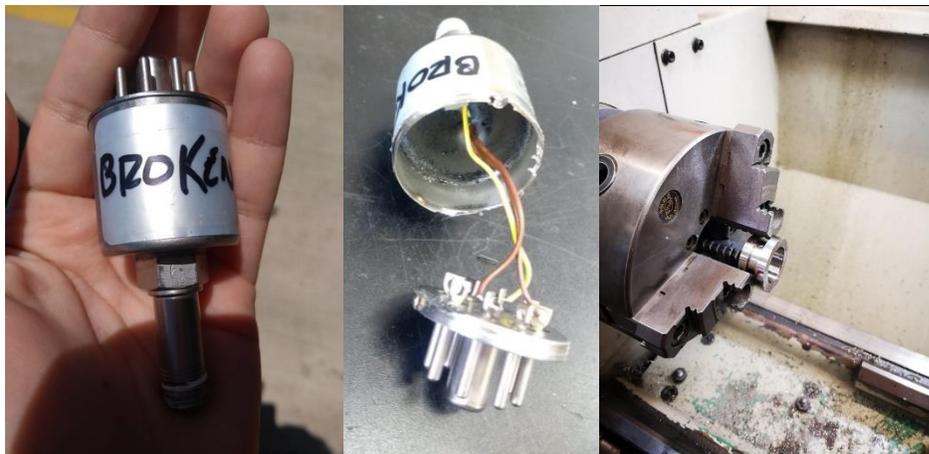


Figura 2.- Maquinado para la conexión a vacío.

4. Realice pruebas en un sistema de vacío y verifique el correcto funcionamiento del circuito, junto con el programa.
5. A partir de un sensor bien calibrado compare las lecturas que tienen ambos respecto a la presión que indican, por ejemplo:

Sensor de Referencia	BMP280
743.05	745
662	685
217	410
82	300
38	200
21	50

13	20
9	14
7	12
6	8
5	6
4.6	4.6
4.2	4
3.8	3.58
3.6	3.3
3.5	3
3.4	2.8
3.3	2.4
3.2	2
3.1	1.92
3.1	1.8
3	1.68
2.94	1.44
2.9	1.38

6. Con los datos grafique los datos con el sensor de referencia en el eje Y y el BMP280 en el X, realice un ajuste polinomial y a partir de este utilicelo para calcular nuevamente el valor de la presión.

```

1. #include <LiquidCrystal.h>
2. LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
3. #include <Wire.h> // incluye libreria de bus I2C
4. #include <Adafruit_Sensor.h> // incluye librerias para sensor BMP280
5. #include <Adafruit_BMP280.h>
6. Adafruit_BMP280 bmp;
7. float TEMPERATURA;
8. float PRESION, P0, PE;
9.
10. void setup() {
11.   lcd.begin(16, 2);
12.   lcd.setCursor(0, 0);
13.   lcd.print("INICIANDO...");
14.   delay(5000); // texto de inicio
15.   Serial.begin(9600);
16.   if ( !bmp.begin() ) { // si falla la comunicacion con el
sensor mostrar
17.     lcd.begin(16, 2);
18.     lcd.setCursor(0, 0);
19.     lcd.print("SENSOR");
20.     lcd.setCursor(0, 1);
21.     lcd.print("NO CONECTADO!");
22.     while (1);}
23.
24.   P0 = bmp.readPressure()/100; // almacena en P0 el valor actual
de presion
25.   lcd.begin(16, 2);
26.   lcd.setCursor(0, 0);

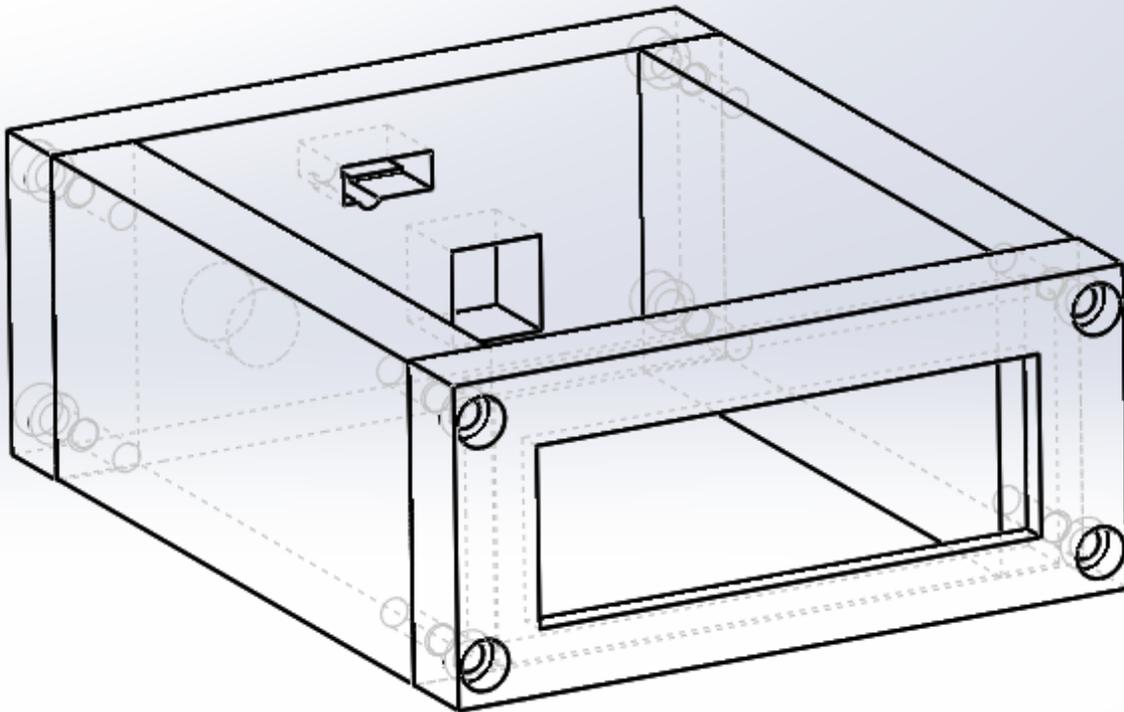
```

```

27.   lcd.print("BAROMETRO");
28.   lcd.setCursor(0, 1);
29.   lcd.print("MARYSOL LANDEROS");
30.   lcd.display();
31.   delay(5000);
32. }
33.
34. void loop()
35. {
36.     TEMPERATURA = bmp.readTemperature(); // almacena en variable el
valor de temperatura
37.     PRESION = (bmp.readPressure()/133.322);
38.     PE = ((6E-06*(PRESION*PRESION*PRESION)) -
(0.0079*(PRESION*PRESION)) + (3.6169*PRESION) - 7.7205); // calculo a
partir de la curva de calibración
39.     lcd.clear();
40.                                     // por 133.322 para
convertirlo a Torr
41.     if (PE>1){
42.         lcd.setCursor(0, 0);
43.         lcd.print("T=");
44.         lcd.print(TEMPERATURA);
45.         lcd.print(" *C ");
46.         lcd.setCursor(0, 1);
47.         lcd.print("P=");
48.         lcd.print(PE);
49.         lcd.print("Torr");
50.         // Turn off the display:
51.         lcd.noDisplay();
52.         delay(0);
53.         // Turn on the display:
54.         lcd.display();
55.         delay(5000);
56.     }
57.     else {if (PE<1){
58.         lcd.clear();
59.         lcd.setCursor(0, 0);
60.         lcd.print("Temp.=");
61.         lcd.print(TEMPERATURA);
62.         lcd.print(" *C");
63.         lcd.setCursor(0, 1);
64.         lcd.print("Pres.=");
65.         lcd.print(PE*1000);
66.         lcd.print("mTorr");
67.         // Turn off the display:
68.         lcd.noDisplay();
69.         delay(0);
70.         // Turn on the display:
71.         lcd.display();
72.         delay(5000);}
73.         else lcd.setCursor(0, 0);
74.         lcd.print("Fuera de rango");
75.     }

```

6. Una vez ya calibrado el sensor, puede proseguir a construirle una protección de material resistente, para evitar que se desconecte cualquier componente.



*Figura 3.- Ejemplo de protector para el sistema*

## Bibliografía

- Grau Cairo Luis, Colectivo de Autores, Organización Dirección y Operaciones Fundamentales en el Laboratorio de Química/ Luis Grau Cairo\_ La Habana Editorial Pueblo y Educación.1982\_ 619p
- Electrotecperu, Arduino (2015). Recuperado de: <https://elecstore.pe/blog/BMP>



# ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	1
3. Equipo de electrohilado.....	2
3.1 Propósito del equipo.....	2
3.2 Principio de operación.....	3
3.3 Ecuaciones para calcular la carga de una gota .....	4
3.4 Consideraciones para su uso.....	7
3.5 Componentes del equipo.....	8
3.6 Protocolo de uso.....	9
4. Referencias.....	10

## 1. Introducción

Este manual está dirigido a todo aquel alumno, docente o personal de UABC que forme parte del programa educativo de ingeniería en nanotecnología, así como investigadores externos con autorización, que estén interesados en el experimento de



la gota de aceite realizado por Robert Millikan, en 1909, para la obtención de la carga del electrón.

El propósito de este manual es el de apoyar al usuario en la comprensión del uso adecuado del equipo para evitar un accidente durante la operación que repercute en su salud o dañe el equipo.

Se debe considerar que el manual solo es una guía para el uso del equipo, y no contiene información técnica para la reparación de algún componente del equipo o detalles técnicos de los mismos, cualquier duda o daño favor de comunicarse con el responsable del equipo.

Se recomienda al usuario principiante el acompañamiento por algún docente o encargado del equipo con experiencia en el uso del mismo.

## **2. Objetivos**

- Mostrar de forma general los componentes del equipo y la forma adecuada de su uso.
- Evitar cualquier tipo de accidente que repercuta en la salud del usuario o dañe al equipo.
- Que el usuario identifique los principales fallos al momento de usar el equipo.
- El objetivo de este experimento es medir la carga del electrón.

## **3. Equipo de la gota de aceite**



**Figura 1.** Equipo de la gota de aceite.

Actualmente el equipo de la gota de aceite no se encuentra en un edificio específico, pero pertenece al programa educativo de ingeniería en nanotecnología de la UABC. El responsable del equipo es el Dr. Jorge Mata.

### 3.1 Propósito del equipo

Los filósofos griegos debatían entre sí la materia era infinitamente divisible o, si estaba compuesta de átomos discretos. Durante el siglo XIX, la idea del átomo era la base de muchas teorías de química y física, por ejemplo, de la teoría de combinación química (Dalton) y de la teoría cinética de los gases (Maxwell). Aun así había científicos competentes que dudaban la existencia de los átomos a finales de 1900, estos científicos siguieron a Ernst Mach (1836–1916) en estricta adhesión al principio filosófico del empirismo, por el cual la teoría física debe excluir cualquier concepto que no sea directamente observable. De hecho, no fue hasta el presente siglo que se observó directamente la atomicidad de la materia o de cualquiera de sus atributos (por ejemplo, la carga). Después de todo, un átomo de plomo pesa solo  $3.2 \times 10^{-22}$  g; una carga electrónica es  $4.8 \times 10^{-10}$  statcoulombs; el cuanto de momento angular es  $6.7 \times 10^{-27} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ ; y la energía de un cuanto de luz roja es  $3.2 \times 10^{-12}$  ergs. Mientras que las unidades de estas medidas son cantidades físicas de magnitud palpable, fácilmente medidas con los instrumentos inventados por físicos del siglo XIX, las cantidades atómicas son fracciones tan pequeñas de sus unidades de medida que han desafiado la medida por los mejores experimentadores de ese siglo [2].



Después, en 1909, el joven colaborador de Robert Millikan, Harvey Fletcher, tuvo la idea de observar el movimiento de una sola gota de aceite microscópica cargada bajo la influencia de la gravedad y un campo eléctrico uniforme entre dos placas metálicas paralelas. Produjo gotitas microscópicas con un "atomizador", como un aerosol nasal común, iluminó las gotitas desde atrás, observó gotitas individuales como puntos no resueltos de luz difractada, y cronometró su movimiento entre marcas fiduciales en el plano focal de un microscopio horizontal, mientras encendía y apagaba el voltaje entre las placas. Algunas gotitas transportaban unos pocos electrones más que protones, o viceversa, y podían suspenderse o estirarse hacia arriba contra la fuerza de la gravedad mediante la aplicación de un campo eléctrico del orden de mil voltios por cm. Las gotitas se rastrearon hacia arriba y hacia abajo muchas veces, a veces durante horas, para reducir errores aleatorios en las mediciones de las velocidades terminales de los movimientos bajo las fuerzas de la gravedad, la resistencia viscosa y la electricidad en presencia de las fluctuaciones del movimiento browniano [2].

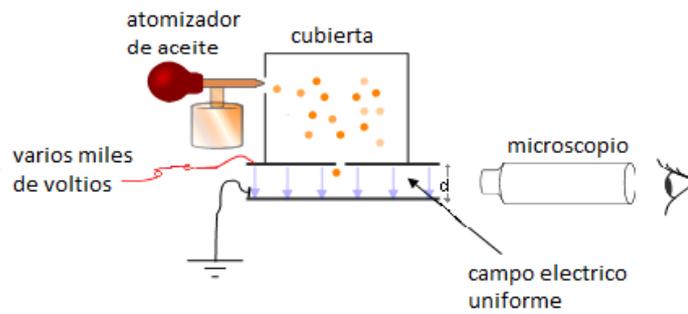
El experimento de la gota de aceite demuestra la atomicidad de la electricidad (por ejemplo, que las gotas siempre llevan múltiplos enteros de un cuanto de carga,  $e$ ), y determina el valor de  $e$  con un error estimado de  $\pm 0.2\%$ , de este modo, se proporciona la clave para la determinación precisa de la masa del electrón y el número de Avogadro (de los valores calculados anteriormente de  $e/m$  y  $F=Ne$ ), y Millikan ganó el premio Nobel [2].

En el laboratorio de nanotecnología el equipo se utiliza para calcular la carga del electrón.

### **3.2 Principio de operación**

El proceso del experimento de la gota de aceite consiste en dispersar un líquido viscoso (en este caso, aceite) sobre una placa de cobre, la cual está conectada mediante un orificio a una cámara, en donde la base y la tapa de la cámara consisten en dos placas de cobre conectadas a un voltaje, a través de la cámara el líquido es sometido a un campo de alto voltaje con polaridad positiva o negativa por una fuente de alto voltaje.

Al aplicar una diferencia de potencial a través de un par paralelo de placas metálicas horizontales, se crea un campo eléctrico uniforme en el espacio entre ellas. Se puede usar un anillo de material aislante para mantener las placas separadas. Se cortan varios orificios en el anillo: unos para la iluminación con una luz brillante y otro para permitir la visualización a través de un microscopio. Se rocía una fina niebla de gotitas de aceite en una cámara sobre las placas. Las gotas de aceite se cargan eléctricamente a través de la fricción con la boquilla cuando se rocían [1].



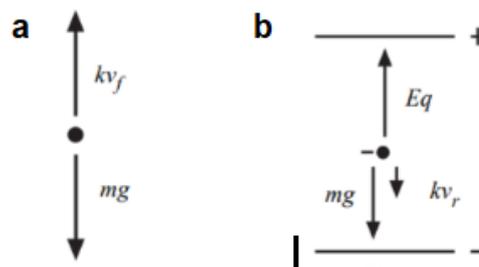
**Figura 2.** Componentes básicos del experimento de la gota de aceite

Cuando las gotas entran en el espacio entre las placas y, debido a que están cargadas, se pueden controlar cambiando el voltaje a través de las placas. Inicialmente, se permite que las gotas de aceite caigan entre las placas con el campo eléctrico apagado. Alcanzando rápidamente la velocidad terminal debido a la fricción con el aire en la cámara. Al encender el campo y, si es lo suficientemente grande, algunas de las que caen (las cargadas) comienzan a subir. Esto se debe a que la fuerza eléctrica hacia arriba,  $F_e$ , es mayor que la fuerza gravitacional hacia abajo,  $g$ . (Una barra de goma cargada puede recoger trozos de papel de la misma manera). Se selecciona una caída de aspecto probable y se mantiene en el medio del campo de visión apagando alternativamente el voltaje hasta que caigan todas las demás gotas. El experimento se continúa con esta única gota [1].

### 3.3 Ecuaciones para calcular la carga en una gota.

Un análisis de las fuerzas que actúan sobre una gota de aceite llevará al desarrollo de una ecuación para determinar la carga acarreada por la gota. En la figura 3a se muestran las fuerzas que actúan sobre una gota cuando esta en caída en aire y ha llegado a una velocidad terminal (la velocidad terminal se alcanza en unos pocos milisegundos en este experimento). En la figura 3a,  $v_f$  es la velocidad de caída,  $k$  es el coeficiente de fricción entre el aire y la gota,  $m$  es la masa de la gota y  $g$  es la gravedad. Debido a que la gota está en su velocidad terminal, la fuerza neta es igual a cero, por lo tanto, las fuerzas son iguales y opuestas [3]:

$$mg = kv_f$$



**Figura 3.** Fuerzas actuando sobre una gota de aceite: a) en caída libre y, b) bajo la influencia de una campo eléctrico



## Experimento de Millikan

### Manual de operación



En la figura 3b, se muestra las fuerzas que actúan en la gota cuando se eleva bajo la influencia de un campo eléctrico. En la figura 3b,  $E$  es la intensidad del campo eléctrico,  $q$  es la carga acarreada por la gota y  $v_r$  es la velocidad de elevación. Al agregar las fuerzas vectorialmente, nos queda [3]:

$$qE = mg + kv_r \quad [1]$$

En ambos casos, existe una pequeña fuerza flotante ejercida por el aire sobre la gota. Sin embargo, ya que la densidad del aire es solo una milésima parte que la del aceite, esta fuerza se puede despreciar. Por lo que se puede eliminar  $k$  de las ecuaciones. Si resolvemos las ecuaciones para  $g$ , tenemos [3]:

$$q = \frac{mg(v_f + v_r)}{Ev_f} \quad [2]$$

Donde  $m$  es la masa y  $g$  es la aceleración debido a la gravedad. Para eliminar  $m$  de la ecuación anterior, se utiliza la expresión del volumen de una esfera y la densidad del aceite [3]:

$$mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho g \quad [3]$$

Donde  $a$  es el radio de la gota y  $\rho$  es la densidad del aceite. Sustituyendo la ecuación anterior en (2), tenemos que [3]:

$$q = \frac{4\pi a^3 \rho g (v_f + v_r)}{3Ev_f} \quad [4]$$

Para calcular  $a$ , la fórmula de la ley de Stokes ( $F_f = 6\pi\eta a v_f$ ) se puede utilizar. Esta expresión relaciona el radio  $a$ , de un cuerpo esférico con su velocidad de caída  $v_f$  en un medio viscoso (con el coeficiente de viscosidad  $\eta$ ). Al igualar la fórmula de la Ley de Stokes al lado izquierdo de (4) y resolviendo para  $a$ , encontramos lo siguiente [3]:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g}} \quad [6]$$

La ley de Stokes, sin embargo, se vuelve incorrecta cuando la velocidad de caída de las gotas es menor a 0.1 cm/s (las gotas que tienen estas velocidades o menores tienen un radio en el orden de 2 micras, comparable con el camino libre medio de las moléculas de aire, una condición que viola una de las suposiciones que se toman para obtener la ley de Stokes). Debido a que las velocidades de las gotas que se utilizan en este experimento estarán en el rango de 0.01 a 0.001 cm/s ( $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  m/s), la viscosidad debe ser multiplicada por un factor de correlación. La viscosidad efectiva resultante es [3]:

$$\eta_{eff} = \eta \left( \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right) \quad [7]$$



Donde  $b$  es una constante,  $p$  es la presión atmosférica y  $a$  es el radio de la gota calculada con la ecuación de la ley de Stokes (6). Sustituyendo  $\eta_{eff}$  de la ecuación (7) en la ecuación (6) por  $\eta$ , tenemos que [3]:

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g} \left( \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right)} \quad [8]$$

Sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (5) para  $a$ , obtenemos [3]:

$$q = \frac{4}{3}\pi\rho g \left[ \sqrt{\frac{9\eta v_f}{2\rho g} \left( \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right)} \right]^3 \frac{(v_f + v_r)}{Ev_f} \quad [9]$$

La intensidad de carga eléctrica está dada por [3]:

$$E = \frac{V}{d} \quad [10]$$

Donde  $V$  es la diferencia de potencial a lo largo de las placas paralelas separadas por una distancia  $d$ . Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (9) para  $E$  y acomodando tenemos [3]:

$$q = \left[ \frac{4\pi d}{3} \sqrt{\frac{1}{\rho g} \left[ \frac{9\eta}{2} \right]^3} \right] x \left[ \left( \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right)^3 \right] x \left[ \frac{(v_f + v_r)\sqrt{v_f}}{V} \right] \quad [11]$$

Los términos dentro del primer conjunto de paréntesis sólo se necesitan determinar 1 vez para cualquier aparato en particular. El segundo término se determina para cada gota, mientras que el tercer conjunto de paréntesis se calcula para cualquier cambio de carga que experimenta la gota. la constance  $b$  es igual a  $8.2 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{m}$  [3].

### **Método alternativo para calcular la carga en una gota.**

La ecuación (11) contiene el radio de la gota,  $a$  y el término de correlación para la viscosidad efectiva,  $\eta_{eff}$ . Nótese que el término de correlación también contiene el valor de  $a$ . Sin embargo, es posible calcular la carga en una gota,  $q$ , usando un término correcto para  $a$  que no incluye el valor de  $a$ . La expresión para  $a$  en la ecuación (8) se puede convertir en una ecuación cuadrática:

$$a = \sqrt{\left( \frac{b}{2p} \right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p} \quad [12]$$

Nótese que esta expresión de  $a$ , a diferencia de la ecuación (8), no incluye el valor de  $a$ . Sustituyendo la ecuación (12) en la ecuación (5) obtenemos que:



$$q = \frac{4\pi \left[ \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p} \right]^3 \rho g (v_f + v_r)}{3(Ev_f)} \quad [11]$$

Reemplazando el valor de E con la ecuación (10) tenemos que [3]:

$$q = \frac{4\pi}{3} \left[ \sqrt{\left(\frac{b}{2p}\right)^2 + \frac{9\eta v_f}{2\rho g}} - \frac{b}{2p} \right]^3 \left[ \frac{\rho g d (v_f + v_r)}{V v_f} \right] \quad [14]$$

### 3.4 Consideraciones para su uso

Para poder obtener resultados confiables se deben considerar una serie de parámetros tales como voltaje aplicado, distancia entre las placas, viscosidad de la sustancia.

#### **Voltaje aplicado**

- La intensidad del campo eléctrico aplicado controla el movimiento de las gotas. El voltaje que se maneja en el equipo está en el rango de 120 a 130 V.

#### **Distancia entre las placas**

- Se ha demostrado que la distancia entre las placas tiene un gran efecto en el campo eléctrico entre ellas. Si la distancia es muy corta, las gotas no se podrán observar antes de llegar a la placa inferior, mientras que si la distancia es muy larga, el campo eléctrico es menor y por tanto, la fuerza electrostática no puede ser suficiente para sostener a la gota.

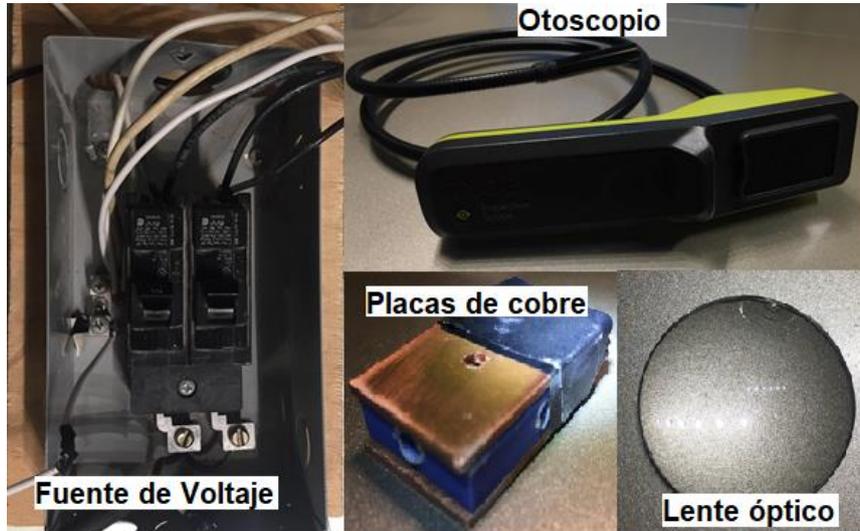
#### **Líquido a atomizar**

- Millikan y Fletcher descubrieron que era mejor usar un aceite con una presión de vapor extremadamente baja, como uno diseñado para usar en un aparato de vacío. El aceite ordinario se evapora bajo el calor de la fuente de luz, causando que la masa de la gota de aceite cambie a lo largo del experimento [1].

#### **Parámetros ambientales**

- El medio ambiente también puede afectar la carga de las gotas, factores como son la humedad y la temperatura afectan las fuerzas que actúan en las gotas de aceite.

### 3.5 Componentes del equipo



*Figura 3. Descripción de los componentes del equipo de electrohilado*

1. **Fuente de Voltaje:** La fuente de voltaje del equipo contiene una salida de voltaje 120V; la manipulación de éste es por medio de unos switch que prenden y apagan. La fuente contiene varios electrodos, pero solo dos de ellos se conectan a las placas de cobre, respectivamente.
2. **Oscopio:** el equipo cuenta con un oscopio de fibra óptica equipados con diodos LEDs para iluminar, capaz de grabar los experimentos y que se controla por medio de una aplicación en el celular.
3. **Placas de cobre:** Las placas de cobre son de 33.25 mm de largo por 22.61 mm de ancho por 2 mm de grosor.
4. **Lente óptico:** circular de 5 cm de enfoque.

### 3.6 Protocolo de uso

Antes de iniciar con el uso del equipo se recomienda haber leído las secciones anteriores para evitar cualquier accidente que perjudique la salud del usuario o dañe el equipo.

**PRECAUCIÓN:** No tocar la fuente de voltaje mientras se mantenga encendido. La manipulación de estos durante el proceso podría terminar por electrocutar a la persona y causarle lesiones graves, esto debido al alto voltaje que se maneja. (120V).



1. Asegurar que la fuente de voltaje esté apagada antes de manipular alguno de los componentes.
2. Conectar la fuente a las dos placas de cobre. Colocando el ánodo (electrodo +) en la placa inferior y el cátodo (electrodo -) a la placa superior

**Nota: No encender la fuente.**

3. Retirar objetos metálicos de la superficie de trabajo y encender el equipo (tanto luz como voltaje).

**Nota: Asegurarse de que el voltaje marque 0 V con ayuda de un multímetro.**

4. Medir la temperatura y voltaje entre las placas.
5. Atomizar el aceite.

**Nota: Asegurarse de que la punta del atomizador apunte hacia el orificio de la placa superior de cobre y observando por el otoscopio.**

6. Seleccionar una gota que se mueva lentamente. Una vez que la encuentre, enfocar con el otoscopio.
7. Medir la velocidad terminal (de caída) de la gota alrededor de 10 a 20 veces.
8. Con estos datos, calcular la carga del electrón.

**Nota: Si el valor es muy grande, se deben de escoger gotas más pequeñas.**

9. Repetir el experimento cuantas veces sea necesarias para obtener un valor aceptable.
10. Apagar la fuente de voltaje.

#### **4. Referencias**

[1] Lumen (s.f.) Introduction to chemistry: Millikan's Oil drop Experiment, recuperado de: <https://courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/millikans-oil-drop-experiment/>

[2] Massachusetts Institute of Technology: Physics Department. (20/Agosto/2000). Millikan Oil drop Experiment, Junior Physics Laboratory Experiment #2; recuperado de: [http://web.mit.edu/8.13/www/JLExperiments/JLExp02.pdf?fbclid=IwAR1tu-PNL-7vxkVHzaZY8Ef\\_lezLIBeNlkfvcrTwNPkUmmGXqThqIUqr\\_I](http://web.mit.edu/8.13/www/JLExperiments/JLExp02.pdf?fbclid=IwAR1tu-PNL-7vxkVHzaZY8Ef_lezLIBeNlkfvcrTwNPkUmmGXqThqIUqr_I)



## Experimento de Millikan

### Manual de operación



[3] Pasco (s.f.) Millikan Oil Drop Apparatus AP-8210A, Instruction Manual 012-13093C, recuperado de: [https://www.pasco.com/prodCatalog/AP/AP-8210\\_millikan-oil-drop-apparatus/index.cfm](https://www.pasco.com/prodCatalog/AP/AP-8210_millikan-oil-drop-apparatus/index.cfm)

## IX. BIBLIOGRAFÍA

### Básica y Complementaria

1. John X J Zhang, Kazunori Hoshino(2013). Molecular Sensors and Nanodevices: Principles, Designs and Applications in Biomedical Engineering (Micro and Nano Technologies) 1st Edition. Series: Micro and Nano Technologies, 512 pag. Publisher: William Andrew; 1 edition (2013), ISBN-10: 1455776319, ISBN-13: 978-1455776313
2. Ramsden, J.,2014. Applied Nanotechnology: The Conversion of Research Results to Products. Elsevier. Estados Unidos.
3. K. Eric Drexler. (2002) Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation 1st Edition. 576 pag. Publisher: Wiley; 1 edition. English, ISBN-10: 0471575186, ISBN-13: 978-0471575184
4. Guozhong, C. 2004. Nanostructures and Nanomaterials, Synthesis, Properties and Applications. Imperial College Press, Londres.
5. Hamilton M., Pezo, A. 2005. Formulación y evaluación de proyectos tecnológicos empresariales aplicados. Convenio Andrés Bello, Colombia.
6. Phoha, Shashi; La Porta, Thomas F; Griffin, Christopher. (2006), Sensor network operations. Editor: Hoboken, N.J.:Piscataway, N.J.: Wiley; IEEE Press
7. Pallás Areny, Ramón. (2001) Sensores y acondicionadores de señal. Edición: 3a ed. aumentada. Editor: México : Alfaomega, 2001.
8. Fulekar, M. 2010. Nanotechnology: Importance and Applications. International Publishing House Pvt. Ltd, Nueva Delhi, India.
9. Ndubuis, E.2010.Nanotechnology and Microelectronics: Global Diffusion, Economics and Policy. IGI Global. Estados Unidos.
10. Sparks, S. 2012. Nanotechnology: Business Applications and Commercialization. CRC Press Taylor Francis Group. New York.
11. Ilyas, Mohammad; Mahgoub, Imad. (2005), Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems. Editor: Boca Raton: CRC Press,
12. Shorey, Rajeev.(2006) Mobile, wireless, and sensor networks : technology, applications, and future directions. Editor: [Piscataway]:Hoboken, N.J.: IEEE Press ; Wiley-Interscience
13. Narayanaswamy, R. (Ramaier); Wolfbeis, Otto S. (2004). Optical sensors: industrial, environmental, and diagnostic applications. Editor: Berlin; New York : Springer, 2004
14. Rees, Gareth. (1990). Physical principles of remote sensing. Editor: Cambridge : Cambridge University
15. Pallás Areny, Ramón. (2007) Sensores y acondicionadores de señal. Edición: 4a ed. Editor: Barcelona: México, D. F.: Marcombo; Alfaomega.
16. Akyildiz, Ian F; Vuran, Mehmet Can. (2010). Wireless sensor networks Edición: 1st ed. Editor: United Kingdom: John Wiley

