



fcfm

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

UNIVERSIDAD DE CHILE

FI3003 - FÍSICA EXPERIMENTAL I

BITÁCORA DE TRABAJO

FI 3003

Profesor:

Victor Fuenzalida E.

Auxiliar:

Erick Pérez F.

Integrantes:

Felipe Cubillos

Felipe Cuevas

Número de Grupo:

1

Fecha:

30 de Agosto de 2018

Índice general

Índice general	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	5
1. FabLab	7
1.1. FabLab U. de Chile	7
1.2. Makerbot Replicator 2	7
1.3. Metodología	9
1.4. Resultados	10
2. Taller Mecánico	11
2.1. SEGURIDAD	11
2.2. Conocimientos Preliminares: Maquinaria	12
2.3. Conocimientos Preliminares: Operaciones	14
2.4. Metodología	17
2.5. Resultados	18
3. Vacío	19
3.1. SEGURIDAD	19
3.2. Propiedades de los gases	21
3.3. Flujo en sistemas de vacío	23
3.4. Prevacío y bombas rotatorias	25
3.5. Alto vacío y bombas difusoras	29
3.6. Otras bombas	31
3.7. Medicion de presiones	34
3.8. Evaporación de un material	36
3.9. Metodología	36
3.10. Resultados	37
3.11. Conclusiones	39
4. Medición por 4 Contactos	40
4.1. SEGURIDAD	40
4.2. Ruido eléctrico	43
4.3. Medición de resistencias bajas	49
4.4. Vocabulario	55
4.5. Metodología	61
4.6. Resultados	62
4.7. Conclusiones	64
5. Tratamiento de Imágenes	65
5.1. SEGURIDAD	65
5.2. Tensión Superficial	67
5.3. Análisis de Imágenes Digitales	78
5.4. Vocabulario	82



5.5. Metodología	85
5.6. Resultados	86
Bibliografía	90

Índice de Figuras

1.1. Uso de Support	9
1.2. Modelo STL	10
1.3. Prototipo impreso	10
2.1. Cuchillos para torno.	13
2.2. Torno.	13
2.3. Fresas	13
2.4. Fresadora	13
2.5. Taladro pedestal.	14
2.6. Moleta	16
2.7. Patrón Moleteado	16
2.8. Engranaje mediante fresa madre.	16
2.9. Plano de pieza maquinada en el taller	18
3.1. Gráfico de la composición del aire atmosférico.	22
3.2. Equivalencias entre distintas unidades de medida para la presión.	22
3.3. Esquema de las partes de una bomba de vacío rotatoria.	26
3.4. Esquema de una bomba rotatoria con dos etapas.	26
3.5. Caudal de succión para bombas rotatorias de una y dos etapas.	27
3.6. Fluidos utilizados como lubricantes en bombas de difusión y sus propiedades.	28
3.7. Velocidad cuadrática media del N, H y Ar en función de la temperatura.	28
3.8. Camino libre medio para el N, H y Ar en función de la presión para T=300K.	29
3.9. Cociente entre partículas adsorbidas y partículas en el volumen en función de la presión.	30
3.10. Esquema del interior de una bomba difusora.	31
3.11. Esquema de una bomba turbomolecular.	33
3.12. Esquema de una bomba de iones y su mecanismo de operación.	33
3.13. Esquema de un instrumento para medir presiones en base a una membrana sensible.	34
3.14. Diagrama de funcionamiento de un termopar.	35
3.15. Esquema de un penning y su estructura de funcionamiento.	36
3.16. Muestra del material evaporado obtenido luego del proceso experimental realizado.	39
4.1. Gráfico de la presión de sonido perceptible por el oído humano según la edad versus la frecuencia.	40
4.2. Gráfico de la presión de sonido perceptible por el oído humano versus la frecuencia, teniendo en cuenta los diferentes límites dentro del espectro.	41
4.3. Espectro de frecuencias de voltajes de ruido.	46
4.4. Método de corriente en ambas direcciones para identificar el voltaje de ruido térmico.	47
4.5. Esquemmatización del método delta.	48
4.6. Esquemmatización del método de medición compensada con apagado.	48
4.7. Esquemmatización de cómo reducir el área de los loops.	49
4.8. Esquema del circuito que se ge forma al medir una resistencia con un multímetro.	50
4.9. Esquema del circuito utilizado en el método de medición por cuatro contactos.	51
4.10. Ejemplos de diferentes calidades de muestras para el método de Van der Paw.	53
4.11. Esquema para el método de Van der Paw.	54
4.12. Parámetro γ en relación al cociente de las resistencias del método de Van der Paw.	55
4.13. Modelo estándar de un tester.	56

4.14. Límites de medición para distintos instrumentos asociados a parámetros de un circuito eléctrico.	56
4.15. Modelo estándar de un nanovoltímetro.	57
4.16. Límites teóricos para la medida de resistencias.	58
4.17. Modelo estándar de un electrómetro.	59
4.18. Esquema del funcionamiento del Lock-in Amplifier.	61
4.19. Modelo estándar de un Lock-in Amplifier.	61
4.20. Esquem simplificado del circuito utilizado.	62
4.21. Característica I-V de la placa de tungsteno evaporada.	64
5.1. Diagrama de fuerzas entre moléculas de un líquido.	68
5.2. Esquema de los pasos que sigue el método del anillo de Du Noüy y representación de la fuerza estimada en relación al tiempo.	69
5.3. Representación gráfica del tensiómetro de Du Noüy.	69
5.4. Esquema del método de la placa de Wilhelmy.	71
5.5. Esquema del cálculo de la tensión superficial en el método de la placa de Wilhelmy.	71
5.6. Esquema del método de la placa de Wilhelmy para dos líquidos.	72
5.7. Esquema del montaje para el método de la gota colgante.	73
5.8. Esquema del montaje para el método de la gota depositada.	74
5.9. Esquema de un banco óptico.	75
5.10. Esquema del montaje experimental para el método de la gota giratoria.	75
5.11. Variación de la tensión superficial con la concentración de surfactante en mg/L de PDMS-éster a 20 °C. A la izquierda en escala logarítmica y a la derecha los valores empíricos.	78
5.12. Visualización de gradientes en una imagen	81
5.13. Ejemplo de perfilometría	83
5.14. Técnica de Schlieren	84
5.15. Schlieren Sintético	84
5.16. Gota de agua pura	86
5.17. Gota de agua con surfactante (detergente) al 10%	86
5.18. Gota de agua con surfactante (detergente) al 1%	87
5.19. Gota de agua con surfactante (detergente) al 0.1%	87
5.20. Gota de agua con surfactante (detergente) al 0.01%	88

Índice de Tablas

3.1. Hora y presiones en las cámaras de vacío.	37
3.2. Hora, presiones y temperaturas en el proceso de evaporación.	38
3.3. Hora en la medición de corriente circulando por el material.	38
4.1. Intensidad del ruido de fondo y distancia entre dos personas según el PSIL y forma de hablar.	42
4.2. Presiones asociadas a actividades ruidosas en [dB] y [Pa]	42
4.3. Materiales y sus respuestas a algunos efectos de error en la medición de bajas corrientes. La notación es: '+' para "muy bueno", 'o' para "bueno" y '-' para "malo" en las propiedades mencionadas.	45
4.4. Error asociado a la medición de resistencias con un multímetro o tester.	50
4.5. Voltjes y sus polaridades para distintos valores entregados por la fuente.	63
4.6. Resistencia en la placa de tungsteno evaporada.	63
5.1. Gravedades específicas a 20°C para los compuestos a ser manipulados en el laboratorio.	66
5.2. Tensiones superficiales de algunos líquidos en contacto con el aire a 20 °C.	68

Introducción

En el contexto del ramo FI3003 se realiza esta bitácora, donde se registra los conocimientos previos a la realización de las experiencias, normas de seguridad y metodología utilizada para desarrollar los laboratorios.

La mayoría de estos están enfocados en métodos de fabricación, y mediciones experimentales, enfatizando el argumento físico detrás de tales procedimientos. Esto con el objetivo de tener una perspectiva más crítica y realista del funcionamiento de las teorías físicas a nivel empírico, poniendo a prueba la calidad de las idealizaciones realizadas al momento de idear el fundamento teórico en la ciencia.

Dentro de los montajes experimentales realizados se cuentan: trabajo de impresión 3D en FabLab, diseño y confección de pieza en duraluminio en taller mecánico, evaporación de material metálico en bombas de vacío, medición de resistencias bajas por método de cuatro contactos y análisis de imágenes digitales para la extracción de parámetros físicos.

UNIDAD 1

FabLab

Del Inglés (*Fabrication Laboratory*), es un laboratorio de fabricación digital, enfocado en producción de objetos físicos a diferentes escalas. Además de las diferentes maquinarias automatizadas y herramientas, se caracterizan por tener un rol más social, acercando la tecnología a la sociedad.

Estos laboratorios existen al rededor de todo el mundo, donde cualquier persona tiene derecho a acceder a estos, así como a programas de formación en técnicas de fabricación digital.

Otra característica muy importante de los FabLabs es el desarrollo abierto. Si bien se pueden originar alguna actividad comercial en ellos, esta no puede interferir con el acceso abierto a tal desarrollo.

Generalmente un FabLab cuenta con:

- Maquinas de prototipado rápido, como impresoras 3D (de plásticos como PLA, o yeso).
- Cortadoras Láser.
- Fresadora (de 2 a 5 ejes).
- Cortadora de vinilo (para fabricar circuitos flexibles o antenas).
- Herramientas de programación (Arduino, Raspberry, etc).

1.1. FabLab U. de Chile

En el FabLab U. de Chile se ubicado en la Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas de la Universidad de Chile. Acoge proyectos de clases y personales tanto de alumnos y externos a la universidad.

A lo largo del año se imparten talleres de diferentes técnicas, como el uso de la impresora 3D, CNC, etc.

1.2. Makerbot Replicator 2

En esta unidad se debe trabajar con la impresora 3D modelo Makerbot Replicator 2. Esta impresora funciona con PLA (*ácido poliático*), un polímero en base a moléculas de ácido láctico, el cual tiene la característica de ser biodegradable en agua y oxido de carbono.

En cuanto a programación, esta impresora utiliza código G, el cual luego es decodificado en formato .x3g. Utiliza el software Makerware (open source) del propietario fabricante, trabajando con modelos 3D(CAD: Diseño asistido por Computadora, *Computer Aided Desing*, en inglés) en formato STL.

El archivo CAD es codificado en capas (planos perpendiculares al eje z), los cuales serán impresos progresivamente.

La impresora tiene dimensiones de 26cm en x, 15 cm en y, 150 cm en z. con una resolución de 0.1 [mm] a 0.3[mm] en el eje z. Respecto al plano X-Y la resolución depende del sistema de transmisión entre los Stepper Motor y la correa que controlan el extrusor. Para depositar el material el extrusor se calienta aproximadamente a 230°C.

Archivo STL

Primero se realiza un modelo CAD de lo que se quiere prototipar en la impresora 3D. Para esto existen variados programas de todas las gammas como solidEdge (menos recomendable), Autodesk Inventor, Autodesk Fusion 360 (además de CAD se pueden complementar con el archivo CAM, que contiene instrucciones de maquinado para CNC, Cortadoras láser, etc), etc. siendo los últimos 2 mencionados bastante intuitivos, además de existir numerosos tutoriales en diferentes idiomas en la página web del desarrollador y en redes sociales como Youtube.

Una vez que el modelo CAD está listo este debe ser exportado a formato STL, de tal manera que el Software Makebot print lo reconozca.

Makerbot Print

Una vez que se tiene el prototipo en formato STL, este se procesa en el software Makerbot Print. Aquí se fija la posición y orientación de la pieza respecto a la impresora. Además de generar el g-code que se ejecutará en la impresora se pueden controlar diferentes parámetros como:

- **Shell:** Cuantifica la cantidad de capas exteriores del prototipo.
- **Infill:** Mide el porcentaje de relleno del prototipo.
- **Scale:** Escala el modelo. Tiene la opción de calcular escalas diferentes para cada eje (x,y,z).

Adicional a esto, se pueden configurar el uso de Raft y Support.

El Raft es una plataforma que se imprime debajo del prototipo. Este modelo de impresora no tiene la opción de calentar la base, por lo que en algunas piezas la sujeción a la base no es suficiente y se desprende de ella en medio de la impresión. Para evitar esto se usa el Raft con un área de contacto considerable entre el prototipo y la base. Cabe destacar que la resolución de la impresora permite utilizar Raft de tal manera que sujeta la pieza pero no será parte de ella, es decir una vez terminada la impresión este se puede desprender fácilmente.

Support o soporte se utiliza en piezas donde se tiene geometría "flotando". Como el PLA está caliente al momento de ser extruido, si la pendiente entre es inferior a 60°, el material se flexiona un factor por acción de su propio peso hasta que se enfría lo suficiente. Como resultado de esto se obtendrán piezas deformes.

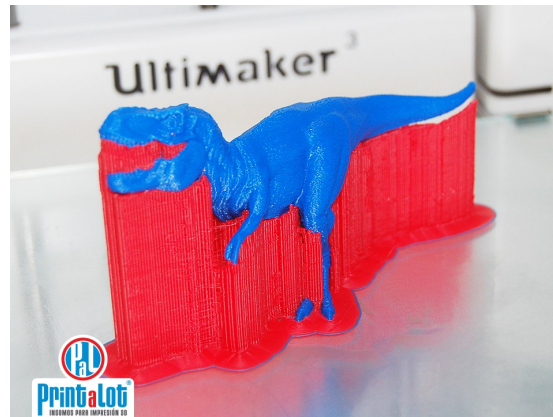


Figura 1.1: Uso de support, en azul el prototipo y en rojo el soporte.

1.3. Metodología

Se asisten a 2 sesiones al FabLab. En la primera se introduce al mismo, y se enseña el funcionamiento de la impresora 3D MakerBot Replicator 2. También se comienza una capacitación del uso de Fusion 360. En la segunda sesión se termina la capacitación y se debe imprimir cualquier cosa en la impresora con los conocimientos adquiridos.

Lo primero es modelar el prototipo a imprimir. Si bien está la opción de realizar algo propio se da la alternativa de saltar esta parte y descargar algún modelo STL desde algún repositorio en internet. En el caso del grupo se utiliza la página: <https://www.thingiverse.com/>.¹

Una vez descargado el prototipo, se utiliza el software Makerbot Print:

- Se fija la pieza en el centro de la plataforma
- Se ajusta la orientación respecto a la impresora. Con fines estéticos o pedagógicos se utiliza el criterio de la orientación que requiera menor cantidad de soportes. Para el caso de ser necesario analizar solicitaciones se debe estudiar éstas mismas recordando además que por la forma en que se imprime:
 - Las piezas son resistentes a esfuerzos axiales y flexión en el eje z
 - Las piezas son débiles a esfuerzos de cizalle y flexión en el plano x-y.
- Se ajusta el relleno (infill) en 10 % y capas(shell) en 2.
- Se ajusta la precisión de z (step) en 0.15 [mm].

Una vez ajustados los parámetros el programa estima la cantidad de material y tiempo aproximado de impresión.

¹Se encuentra el tutorial de FabLab U. de Chile de la impresora, del fabricant y fechas de próximos talleres de la misma: <http://www.fablab.uchile.cl/maquinas-herramientas/impresora-3d-makerbot-replicator-2/>

Se exporta el archivo .x3g a una memoria SD, la cual es colocada en la ranura de la impresora. Se busca el archivo en la misma y se inicia la impresión.

Una vez terminada la impresión se desprende la pieza de la plataforma con ayuda de una espátula, (con cuidado de no rayarla). Luego se desprenden y liján el raft y los soportes.

1.4. Resultados

El prototipo impreso es un charmander, cuyo archivo STL fué descargado de thingiverse:

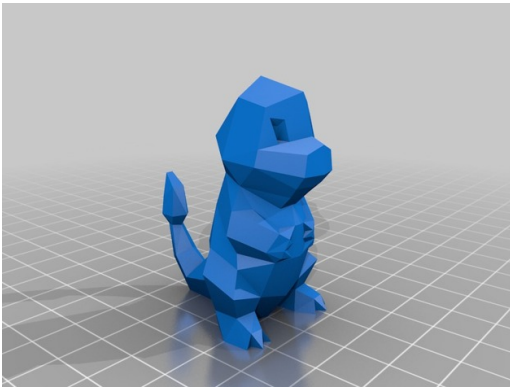


Figura 1.2: Modelo STL de la figura impresa.



Figura 1.3: Figura impresa.

Se demoró al rededor de 13 min en imprimirse, y tiene una masa aproximada de 1 gramo.

UNIDAD 2

Taller Mecánico

2.1. SEGURIDAD

El ambiente de trabajo de laboratorio puede ser más riesgoso que el doméstico o el laboral usual. Por este motivo es esencial familiarizarse con ciertas normas de seguridad elementales y acatarlas siempre.

Existen normas de seguridad específicas a ser aplicadas en un taller mecánico, particularmente al considerar que existen máquinas en movimiento. Algunas de ellas son:

- Evitar ingresar con bufandas, mochilas, pelo largo suelto y, en general, cualquier cosa que pueda ser atrapada por una máquina en movimiento.

Una forma efectiva de prevenir accidentes, es conocer las causas de estos para poder evitarlos:

- **Desconocimiento:**

Es importante conocer el lugar, procedimiento y herramientas de trabajo, así como los protocolos y zonas de seguridad.

- **Fatiga:**

Se produce por falta de sueño, estrés, etc. Produce desconcentración y aumento en el tiempo de reacción.

- **Presión:**

Se produce por hacer cosas a última hora o por tratar de hacerlas rápido. Hay que tomar todo con calma y el tiempo que requiera.

- **Uso de herramientas inapropiadas:**

Cada herramienta está diseñada según solicitaciones definidas por el uso al cual están destinadas. Utilizarlas de manera indebida puede provocar la falla de estas, y luego un accidente (ejemplo clásico: el alicate es para cortar y manipular alambre, **no para martillar**).

- **Procedimientos indebidos:**

Similar a lo anterior, No realizar acciones que pongan en riesgo la seguridad propia (escuchar música con audífonos, poca luz, etc) o la de los demás (poner música muy fuerte con parlante, "bromas" de mal gusto, etc). Esto afecta la alerta y la concentración.

- **Falta de cuidado:**

No utilizar EPPs significa una exposición **innecesaria** de accidentes.

- **Falta de mantenimiento:**

Maquinaria con falta de mantenimiento comenzará a funcionar defectuosamente.

Las personas que se incorporan al laboratorio en general no conocen los riesgos y procedimientos de seguridad, por lo que éstos son objeto de aprendizaje. Tenga esto en cuenta más adelante si se incorpora personal nuevo al laboratorio.

Evite distraer a otras personas o que lo distraigan a Ud. durante procedimientos delicados.

Si ocurre un accidente o conato de accidente avise de inmediato: no se trata de encontrar culpables sino causas, de este modo es posible corregir procedimientos equivocados

ANTES de pasar al resto de la unidad Ud. debe:

- Determinar su ubicación en el plano del edificio y en el edificio mismo.
- Conocer las salidas de emergencia.
- Determinar terreno:
 - Dónde están efectivamente las salidas y si esán activas o bloqueadas.
 - Cómo operarlas.
 - Saber usar los citófonos y guardar números de emergencia en celulares.

Existen normas de seguridad específicas a ser aplicadas en un taller mecánico, particularmente al considerar que existen máquinas en movimiento:

1. Evitar ingresar con bufandas, mochilas, pelo largo suelto y en general cualquiera que pueda ser atrapada por una máquina en movimiento.
2. Usar siempre calzado cubierto, evitar sandalias y chalas.
3. No distraer al personal que se encuentra trabajando.
4. Usar gafas de seguridad (generalmente contra impacto) al operar las máquinas, particularmente el esmeril.
5. No utilizar guantes, estos pueden ser atrapados por una máquina arrastrando la mano del operador. Se exceptúan los de tipo quirúrgico, que se desgarran fácilmente sin él inconveniente anterior.

2.2. Conocimientos Preliminares: Maquinaria

Torno

Acá la pieza gira a altas revoluciones, según la dureza del material es la velocidad de revolución. También depende (pero en un grado menor) la dureza de las herramientas de corte. Las herramientas de corte son cuchillos o brocas de diferentes geometrías para realizar diferentes procedimientos como rebajes, sacados interiores. En el torno comúnmente se fabrican piezas con geometría cilíndrica como la base de engranajes, adaptadores, algunas piezas de ajedrez, hilos sin fin, brocas, etc.



Figura 2.1: Cuchillos para torno.



Figura 2.2: Torno.

Fresadora

A diferencia del torno, en la fresadora (o fresa) la herramienta es la que revoluciona y la pieza la que se mueve. La pieza va fija en la base mediante sujetadores magnéticos o geométricos. Esta se mueve en el plano X-Y. La herramienta de maquinado puede ser una broca (redonda, cónica o plana), fresa madre, circular, etc. que revoluciona y se mueve en el eje Z de la máquina.

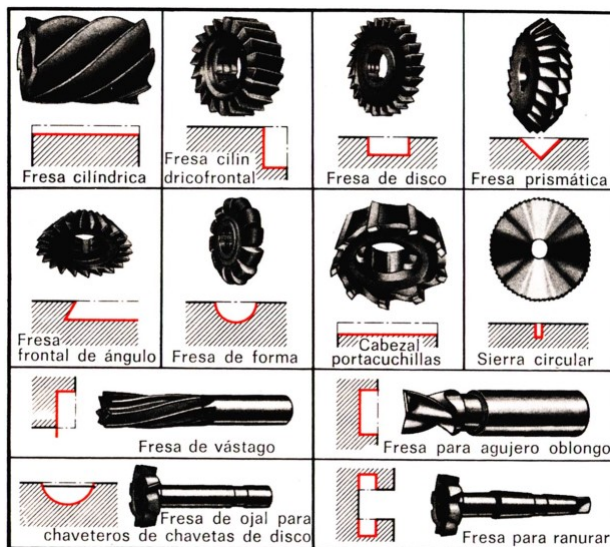


Figura 2.3: Fresas



Figura 2.4: Fresadora

En la fresadora se pueden hacer piezas con ranuras, orificios, engranajes, etc. Generalmente con simetría cartesiana.

Taladro Pedestal

Utiliza brocas que giran y realizan agujeros a las piezas, las cuales están fijadas sobre una plataforma.



Figura 2.5: Taladro pedestal.

2.3. Conocimientos Preliminares: Operaciones

Cilindrado

Se realiza con el torno. Se instala el cuchillo adecuado para el material a maquinar y se fija en su soporte cerciorándose que la pieza está simétricamente alineada al eje de giro, luego se pone a girar eligiendo una velocidad angular adecuada.

Se acerca lentamente la cuchilla hasta que esta toca el material, acá se debe tener mucha cautela pues solo se debe **rozar** el material, pues acá se fija el cero en la escala de la máquina. Según el material se va a bajar el espesor de la pieza a lo largo del cilindro en capas entre 1 a 5 [mm] según la dureza del material y la calidad del cuchillo. Si el cuchillo saca mucho humo y el material queda café o negro es porque no está bien instalado el ángulo con el que ataca a la pieza, le falta filo o el espesor de la capa es demasiado.

Sobre todo si el material es duro, no olvidar encender la manguera de refrigerante. Sirve para que la pieza y las herramientas no se calienten.

Cuando se está cerca del radio exterior deseado se para la máquina y se mide con un vernier o un pie de metro. Si falta se baja en capas de 0.5 o 1 [mm], cuando se termina se vuelve a medir. Si lo que falta de rebaje es igual o inferior a 0.5 [mm] aproximadamente el resto del cilindrado se realiza con una lima y hojas de lijas.

En el caso del cilindrado interior se debe realizar primero un agujero en el centro de la pieza (para esto debe haber sido cilindrada exteriormente). Si la pieza es pequeña longitudinalmente este puede ser realizado con el taladro de pedestal, si no se realiza en el torno. Las brocas van en otro soporte al otro extremo del mismo y se va acercando lentamente hasta realizar la perforación. Luego el procedimiento es el mismo, con la diferencia que en lugar de ser radialmente de afuera hacia adentro ahora se realizará de adentro hacia afuera.

Según la geometría del orificio hecho por la broca y el largo del cilindro el maquinado se hará en capas radiales (menos precisas) o longitudinales. A no ser que las solicitaciones de la pieza lo impidan es una muy buena práctica marcar los centros de la pieza antes de sacarla del torno, pues facilita mucho que se puedan realizar modificaciones a la pieza posteriormente si la pieza ya fué saca del torno (si el cilindrado es interior claramente no se puede hacer esto en general).

Hilo de Rosca

Se debe haber cilindrado la pieza, luego en el torno se configura para avance longitudinal automático en función del desplazamiento angular de la pieza, de tal manera que se realiza el hilo, también en capas entre 1 a 5 [mm] hasta llegar a la medida deseada. Acá el operador solo realiza la tarea de encender la maquina y de colocar en la posición de inicio el cuchillo cuando este llega al extremo de la pieza. La pieza debe tener los centros marcados, así puede ser fijada en ambos extremos.

Canales circulares

Se realiza en la fresa. Primero se instala una fresa circular en el soporte superior. Se fija la pieza de tal manera que nada la mueva. Luego se va acercando la fresa hasta roza el material. Aquí se fija el cero en Z de la fresa en la superficie de la pieza. Se coloca a girar la herramienta de corte, y se realiza el trayecto del canal bajando en capas de no mas de 5 mm según la dureza del material.

Torneado cónico

Igual al del hilo rosca, pero además se configura avance radial automático.

Perforado

Se realiza en el taladro de pedestal. Puede ser realizado con un taladro normal, sin embargo, acá es más preciso el maquinado.

Cepillado plano

Se realiza en fresa. Se coloca el cuchillo de corte, y se baja lentamente hasta tocar la superficie y configurar el cero en Z. Luego se aleja un poco la pieza en el eje XY y se acerca lentamente para configurar el cero XY en la superficie de la maquina. Luego se prende el vaivén en Z del cepillo y se va acercando la pieza. Se realiza del exterior hacia el interior, en pasos de no mas de 1 mm. Si no es MUY probable que el material fallé por deflexión en el exterior de la pieza y se fracture o deforme, Independiente de la dureza del material. De no ser así en el mejor de los casos se rompe el cuchillo de cepillado.

Moleteado

Se realiza en el torno. La pieza debe estar cilindrada exteriormente. Se alinean las moletas con la pieza. Ambas deben tocar al cilindro. Con la pieza ya girando se va acercando poco a poco radialmente hasta que tenga la profundidad deseada. Acá se configura avance longitudinal automático (recomendado) o se avanza manualmente longitudinalmente hasta el final de la pieza.



Figura 2.6: Moleta

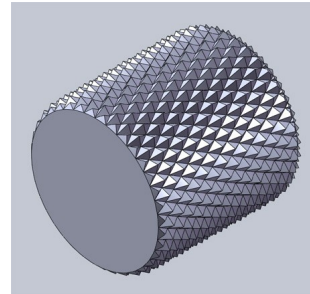


Figura 2.7: Patrón Moleteado

Engranajes

Se debe haber cilindrado exteriormente en el torno. Luego en la fresa con un soporte que permite giro perpendicular de la pieza se fija el engranaje. La trayectoria angular del cilindro se calcula según el módulo de este y el radio (puede ser el exterior o el de contacto). Como herramienta de corte se usa una fresa o una fresa madre con el módulo del engranaje y se va acercando longitudinalmente dándole la forma del diente (involuta) al cilindro en la superficie exterior.

Existen 2 métodos: En el primero se realiza un diente a la vez con el cilindro fijo, cuando la fresa pasa de un lado a otro este se devuelve, y el cilindro gira la cantidad necesaria (calculada que depende sólo del número de dientes y el módulo) para ser fijado y la fresa corte el siguiente diente, hasta tener listo el engranaje.

El segundo método utiliza una fresa madre de engranaje, girando con su eje siempre tangencial al cilindro. Simulan el sistema de clavijero, donde se tiene el engranaje formándose y la fresa madre sacando material de este simulando el hilo sin fin. Mientras el cilindro gira el eje se desliza en dirección axial al cilindro.

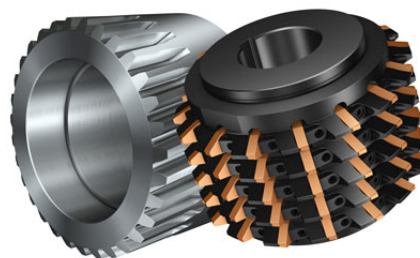


Figura 2.8: Engranaje mediante fresa madre.

Luego en un taladro de pedestal o torno se realiza un agujero central al engranaje.

En una fresadora o cepillo se realiza un chaffán en el cilindro interior del engranaje con un cuchillo de cepillado donde irá la chaveta. Con uno basta en general, pero en ocasiones se realizan más.

Finalmente se pasan las caras del engranaje por la rectificadora.

Tornillos sinfn

Exactamente lo mismo que el hilo de rosca, solo se usa otro cuchillo que da forma más circular al hilo, además de que el paso y espesor del mismo están normados.

2.4. Metodología

Lo primero es diseñar la pieza. Para esto se utiliza el software Fusion 360, de Autodesk. Las medidas y geometría se obtienen visitando el taller donde hay una muestra, se realiza un esquema o dibujo rápido, el cual es confirmado por el técnico y se procede a realizar el modelo CAD.

Se imprime el plano del mismo y debe ser verificado y autorizado por el técnico del taller que conoce la pieza. Ahora se puede proceder con el maquinado de la pieza. Para esto se utiliza un cilindro de duraluminio con medidas superiores a las requeridas para el prototipo.

En el taller lo primero es revisar el orden del área de trabajo, y el correcto funcionamiento del equipo. Una vez revisadas las medidas de seguridad se procede a maquinar la pieza. Para esto:

- Cilindrado hasta el diámetro máximo de la pieza (41 [mm]).
- Dejando un espesor de holgura, se cilindra al siguiente diámetro (29.8 [mm]).
- Para sacar el material sobrante se realiza un desbaste al rededor del cilindrado cónico y axial entre los extremos de la pieza.
- Luego se realiza un cilindrado interior en un diámetro de 15.3 [mm].
- Una vez realizado el cilindrado interior se realiza el cilindrado cónico exterior e interior para dar la forma a la pieza.
- Luego se realiza el cilindrado interior aumentando en 1 y 6 [mm] los extremos para dar la forma final a la pieza.
- Con un vernier se verifican las dimensiones, se hacen ajustes finales, se pule con lijas y se termina la pieza.

Una vez maquinada la pieza siempre es importante limpiar el área de trabajo. La virutilla desprendida por el maquinado de la pieza se tira al suelo a medida que se trabaja. Luego esta se junta y es barrida con una escoba. Se pasa un pincel por la máquina para verificar que no queda viruta en lugares poco asequibles de la misma.

2.5. Resultados

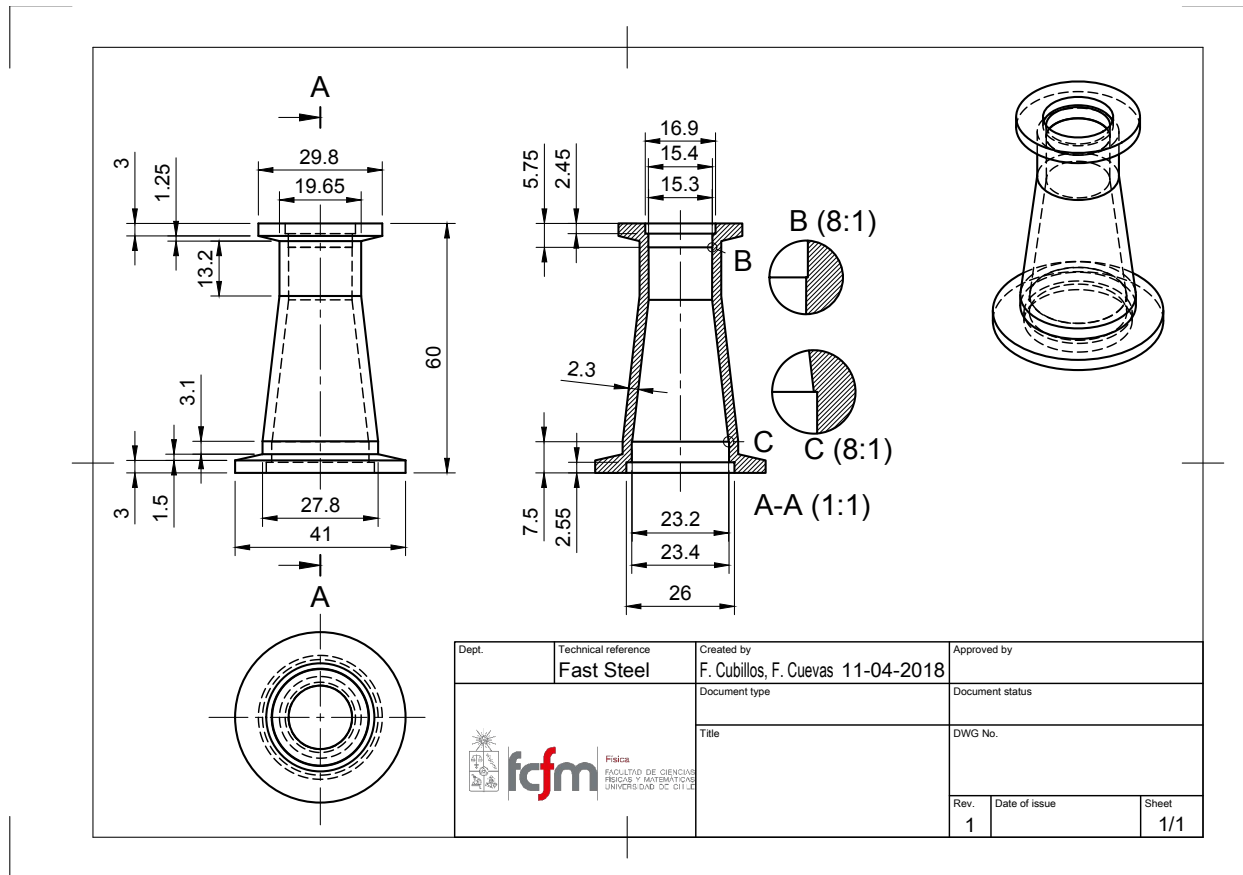


Figura 2.9: Plano de pieza maquinada en el taller. (Versión hoja completa en los anexos)

La pieza tarda al rededor de 3 sesiones de aproximadamente 3 horas en maquinarse completamente.

No se presentaron mayores dificultades en el desarrollo, y se nota una diferencia en la velocidad de avance debido al aprendizaje y confianza en el uso de la maquinaria (torno en este caso) a lo largo del tiempo.

UNIDAD 3

Vacío

3.1. SEGURIDAD

Las medidas de seguridad al trabajar con equipos de vacío se hacen de vital importancia. Comenzaremos clasificando los riesgos en el laboratorio en evidentes y no evidentes.

Riesgos evidentes:

- Comprobar si un circuito está energizado con un dedo mojado.
- Trabajar en un circuito que se supone muerto sin corroborarlo antes, y no evitando que dichos circuitos sean energizados por otros.
- Cualquier dispositivo que produzca un hormigueo al tocarlo.
- Equipos eléctricos que no tengan una etiqueta de UL (consultoría de seguridad y certificación) en el cable o el equipo.
- Cables y enchufes empalmados, rotos, roídos y quebrados.
- Herramientas sin conexión a tierra, a menos que estén protegidos por doble aislamiento.
- Conjuntos sin transformador que puedan tener chasis caliente.
- Cables en el piso que puedan ser usados o rotos por personas al caminar sobre ellos.
- Receptáculos y circuitos sobrecargados.
- Usar escaleras de metal donde puedan caerse o rozar contra líneas eléctricas.
- Perforar en la pared o suelo sin saber qué hay del otro lado.

Riesgos no evidentes:

- Los equipos con la etiqueta UL pueden volverse peligrosos con el tiempo debido al ambiente o al mal uso.
- Los equipos pueden estar cargados, aunque estén apagados.
- Circuitos desconocidos y tipos de componentes impredecibles.
- Gabinetes calientes. Como resultado de la falla al reemplazar los espaciadores aislantes entre el chasis y el gabinete.
- Reemplazar las perillas que tienen tornillos metálicos que pueden cargarse.
- El aislamiento alrededor de las antenas de televisión tipo orejas de conejo plegables puede fallar; si el chasis está cargado, la antena se carga.

- Los artículos en la parte superior del chasis de la TV pueden estar cargados.
- Los tornillos metálicos expuestos y los ejes de control en los equipos con estuches de plástico pueden estar cargados.
- Las líneas eléctricas caídas que no crujen ni explotan pueden ser inofensivas en un minuto y letal en el siguiente.
- Los enclavamientos y las resistencias de purga (conectadas en paralelo a una fuente de alto voltaje) pueden fallar.
- Condensadores que pueden descargar más de 50 [J].

A continuación se proporcionan recomendaciones para un trabajo seguro en el laboratorio:

El aislamiento, la conexión a tierra y los bloqueos adecuados, además del uso de interruptores de baja tensión y conexión a tierra pueden hacer que su taller, laboratorio o sala de transmisión sean mucho más seguros para trabajar. Sin embargo, estas precauciones pueden ser inadecuadas para evitar que te electrocutes si tienes un trabajo pobre o descuidado.

- Mantener la mano en el bolsillo cuando trabaje con circuitos energizados.
- Si no puede mantener la mano en el bolsillo, no toque ningún objeto de metal con su mano libre mientras sostiene una herramienta eléctrica con la otra mano.
- No depender de los interruptores para matar un circuito; jalar el enchufe de la toma de corriente.
- Si se está trabajando en circuitos de alto voltaje, tener un compañero que ayude en caso de una descarga. Cualquiera no debe hacerlo: el observador debe saber cómo matar el circuito y cómo realizar una respiración boca a boca y un masaje cardíaco de pecho cerrado.
- No usar ropa holgada, anteojos con montura metálica, anillos, relojes u otras joyas cerca de circuitos energizados.
- No usar una lámpara ordinaria como una luz de emergencia de extensión.
- Si las instrucciones están disponibles, seguirlas. La persona que escribió el libro puede saber más sobre los peligros involucrados que el operador.
- Cuando se esté física o mentalmente fatigado, evitar trabajar en circuitos energizados.
- Para medir altos voltajes, desenergizar el equipo, descargar los condensadores apropiados, conectar los cables de medición, retroceder, energizar el equipo y hacer las lecturas. No sondear con un cable de prueba en la mano.
- Tratar de hacer que los equipos de protección de seguridad sean a prueba de fallas.
- Nunca suponer que un circuito está muerto. Verificar primero.
- No confiar únicamente en los enclavamientos a menos que se esté seguro de que han desconectado el circuito.
- Tener suficiente iluminación para ver las partes más pequeñas del equipo en el que se está trabajando.

- Descargar todos los artículos que puedan retener carga.
- Desactivar enclavamientos bajo riesgo personal.
- Estudiar el esquema del equipo y el manual de instrucciones antes de comenzar a trabajar.
- Si existe la posibilidad de que el chasis del equipo esté cargado, conectarlo a un transformador de aislamiento en lugar del tomacorriente habitual.
- No sacar chispas ya sea intencional o accidentalmente. Los técnicos en el trabajo con misiles han sido casi cegados por las chispas eléctricas de bajo voltaje y alto rendimiento causados por cortocircuitos accidentales. Dichas chispas también pueden ser peligrosas en atmósferas inflamables.

3.2. Propiedades de los gases

Los fluidos en general pueden presentar los siguientes tipos de flujos al desplazarse de un punto del espacio a otro:

- **Flujo turbulento:** en la dinámica de fluidos, es cualquier patrón de movimiento del fluido caracterizado por cambios caóticos en la presión y la velocidad del flujo. La turbulencia es causada por una energía cinética excesiva en partes de un flujo de fluido, que supera el efecto de amortiguación de la viscosidad del fluido. Por esta razón, la turbulencia es más fácil de crear en fluidos de baja viscosidad, pero más difícil en fluidos altamente viscosos. En términos generales, en el flujo turbulento, aparecen vórtices inestables de muchos tamaños que interactúan entre sí, en consecuencia, se arrastra debido a los efectos de la fricción. El inicio de la turbulencia puede predecirse mediante una constante adimensional llamada número de Reynolds, que calcula el equilibrio entre la energía cinética y la amortiguación viscosa en un flujo de fluido.
- **Flujo viscoso:** La distancia entre las partículas es pequeño, dominan las colisiones entre ellas; la transferencia de momentum genera el flujo. La viscosidad es responsable de las fuerzas de fricción que actúan entre las capas del fluido, como tal, para mantener un caudal de fluido estable es necesario mantener una diferencia de presiones entre dos extremos del espacio. Se da generalmente para presiones superiores a 0.1 [mbar] .
- **Flujo molecular:** el flujo se puede considerar como partículas individuales que se mueven en línea recta. La distancia entre las moléculas es grande, las colisiones entre moléculas y con obstáculos predomina; el flujo se da a través de movimientos aleatorios. Generalmente se da a presiones menores a 0.001 [mbar] .

Además, podemos clasificar un volumen del espacio en distintos tipos de vacío según las diferentes presiones que esté presente. Se tienen, entonces:

- **Vacío grueso:** espacio en el cual existe una presión entre 300 y 1 [mbar] .
- **Vacío fino:** espacio en el cual existe una presión entre 1 y 10^{-3} [mbar] .
- **Vacío alto:** espacio en el cual existe una presión entre 10^{-3} y 10^{-7} [mbar] .
- **Vacío ultra alto:** espacio en el cual existe una presión entre 10^{-7} y 10^{-12} [mbar] .

A modo de tener un indicio de los gases que rodearán el lugar de trabajo, se presenta a continuación un gráfico con la composición del aire atmosférico. Además, para facilitar cálculos se dispone de una figura con conversiones típicas entre unidades de presión. Esto, respectivamente.

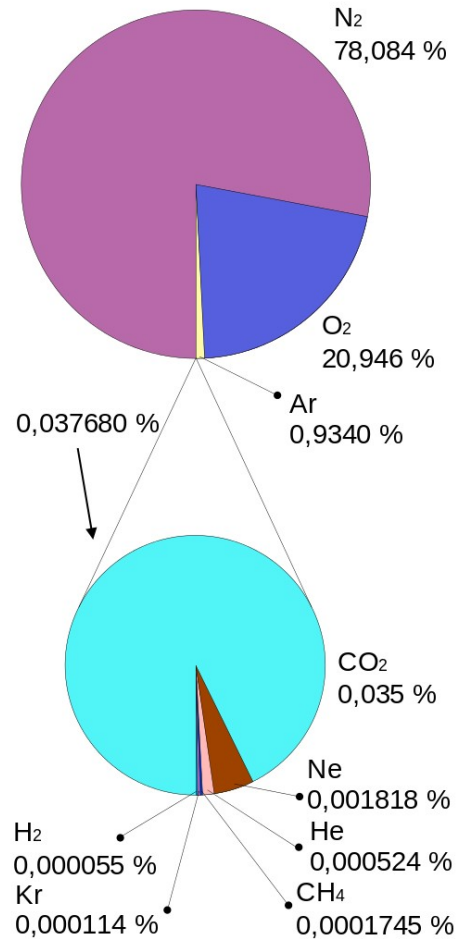


Figura 3.1: Gráfico de la composición del aire atmosférico.

	PSI	Atmosf.	kg/cm ²	cm c.a.	mm Hg	Bar	Pa
PSI	1	0,0680	0,0703	70,31	51,72	0,0689	7.142
Atmósfera	14,7	1	1,033	1033	760	1,0131	1,01 10 ⁵
kg/cm ²	14,22	0,9678	1	1000	735,6	0,98	98.100
cm c.a.	0,0142	0,00096	0,0010	1	0,7355	0,0009	100
mm Hg	0,0193	0,0013	0,0013	0,0013	1	0,00133	133
Bar	14,5	0,987	1,02	1024	750	1	10 ⁵
Pa	1,4 10 ⁻⁴	0,987 10 ⁻⁵	0,102 10 ⁻⁴	0,01	0,0075	10 ⁻⁵	1

Figura 3.2: Equivalencias entre distintas unidades de medida para la presión.

El vacío es de fundamental importancia en diversas aplicaciones tanto a nivel de investigación científica como a nivel industrial. Se enumeran a continuación algunas de las áreas más relevantes en este ámbito.

- **Física de altas energías:** en vacío, al existir bajas presiones y baja densidad molecular, se puede producir un mayor recorrido libre medio. Esto evita colisiones entre partículas por lo que se les puede llevar a velocidades relativistas y, además, tener más control sobre sus trayectorias.
- **Bajas temperaturas:** las bajas presiones existentes y la baja densidad molecular ayudan a generar aislamiento térmico y grandes distancias entre partículas, esto disminuye las colisiones e interacciones entre las partículas, por lo que se alcanzan condiciones similares a la de gases ideales.
- **Evaporación de materiales:** el vacío se vuelve fundamental en esta área dado que se busca evaporar materiales cuyos puntos de ebullición son demasiado altos. Al trabajar en vacío, la presión es menor, por lo que la temperatura necesaria para vaporizar el material es menor. La técnica de deposición por evaporación térmica en vacío consiste en el calentamiento hasta la evaporación del material que se pretende depositar. El vapor del material termina condensándose en forma de lámina delgada sobre la superficie fría del sustrato y las paredes de la cámara de vacío. Normalmente la evaporación se hace a presiones reducidas, del orden de 10^{-6} o 10^{-5} Torr, con objeto de evitar la reacción del vapor con la atmósfera ambiente. A estas presiones bajas, el recorrido libre medio de los átomos de vapor es del orden de las dimensiones de la cámara de vacío por lo que estas partículas viajan en línea recta desde la fuente de evaporación (crisol) hasta el sustrato. Esto da lugar a fenómenos de 'sombreado' en piezas de 3D sobre todo en aquellas regiones no directamente accesibles desde la fuente de evaporación. Al mismo tiempo, en las técnicas de evaporación térmica la energía media de llegada de los átomos de vapor a la superficie del sustrato suele ser baja (del orden de kT , es decir décimas de eV) lo cual puede afectar seriamente la morfología de las capas, resultando frecuentemente un material poroso y poco adherente.
- **Física de superficies:** de por sí, las presiones de vapor (convivencia de dos fases) son demasiado bajas, por lo que en el vacío logran alcanzarse, por lo demás, estas presiones permiten conseguir superficies estables durante tiempos suficientemente grandes como para poder llevar a cabo medidas de caracterización.
- **Aplicación industrial:** liofilización, almacenamiento de alimentos, etc.

3.3. Flujo en sistemas de vacío

Al trabajar con bombas de vacío durante los primeros segundos de aspiración desde presión atmosférica el régimen puede ser turbulento, para pasar rápidamente a flujo laminar. La cantidad de gas aspirada por unidad de volumen es función de la capacidad de la bomba (expresada en m^3/h o L/s) y la impedancia de las tuberías y conexiones. Puesto que el gas es aproximadamente ideal y el proceso aproximadamente isotérmico, el número de moles es $n = PV/RT$ y la cantidad de gas que pasa a través de una sección por unidad de tiempo, medida en moles, es:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{P}{RT} \frac{dV}{dt} \quad (3.1)$$

Puesto que en general se opera a temperatura constante, en tecnología de vacío es común definir el flujo como:

$$Q = P \frac{dV}{dt} \quad (3.2)$$

Magnitud que también mide la cantidad de gas que atraviesa la sección por unidad de área. Por analogía con los circuitos eléctricos se relaciona el flujo a través de un sistema con la diferencia de presiones entre sus extremos definiendo la conductancia C por:

$$Q = C(P_2 - P_1) \quad (3.3)$$

Con la salvedad que C puede depender de P . Para un tubo se tiene $C_{tubo} = \frac{\pi \nu d^3}{12l}$.

Si bien es posible calcular la impedancia de las tuberías, en este curso, así como en la mayoría de las aplicaciones, es suficiente observar algunas reglas de sentido común:

1. Las tuberías deben ser lo más cortas posibles.
2. Deben evitarse en lo posible los codos con ángulos cerrados; las curvas suaves son mejores.
3. Deben evitarse las obstrucciones y reducciones.
4. Idealmente, la tubería no debe ser más angosta que la brida de aspiración de la bomba o la de salida del recipiente (sólo si es muy larga puede convenir aumentar el diámetro).

La velocidad de bombeo o capacidad de aspiración como el volumen de fluido que atraviesa un área A en una unidad de tiempo es:

$$S = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{Acte} \quad (3.4)$$

Considerando estado estacionario, cámara adiabática, y pérdidas despreciables se tendrá por conservación de energía (primer principio de la termodinámica):

$$\frac{d}{dt}(PV) = \frac{dP}{dt}V + P \frac{dV}{dt} \quad (3.5)$$

Como el área que atraviesa el flujo es constante, se puede reemplazar la derivada temporal de V por su valor de la ecuación (3.4):

$$- \frac{V}{P} \frac{dP}{dt} = S \quad (3.6)$$

Si integramos y consideramos un volumen $V = V_0$ constante y una presión $P = P_0$ a un tiempo $t = t_0 = 0$ se tiene que:

$$t = \left(\frac{V_0}{S} \right) \ln \left(\frac{P_0}{P(t)} \right) \quad (3.7)$$

Para efectos prácticos calcularemos el tiempo necesario para reducir la presión en un factor de $1/1000$. Para ello supondremos una cámara de vacío cilíndrica de radio $r = 60cm$, altura $h = 60cm$ y una potencia de $10kVa$ que posee un caudal de $10m^3/h$. Entonces, usando la ecuación (3.7):

$$t = \frac{0,6^3 \pi m^3}{-0,002778 m^3/s} \ln(10^{-3}) = 1687,5s \approx 30min \quad (3.8)$$

Si el sistema tiene una fuga, esta se puede representar como un ingreso a la cámara de un flujo constante Q_0 . Entonces, con el mismo volumen de control, la ecuación a resolver para encontrar la presión, y su posterior solución, vienen dadas respectivamente por las ecuaciones:

$$\frac{dP}{dt} + \frac{S}{V_0} P = \frac{Q_0}{V_0} \quad (3.9)$$

$$P(t) = \frac{Q_0 - e^{-\frac{S}{V_0}t}}{S} \quad (3.10)$$

Con esta solución podemos ver que si el tiempo tiende a infinito se alcanza una presión límite P_0 dada por:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{Q_0 - e^{-\frac{S}{V_0}t}}{S} = \frac{Q_0}{S} \quad (3.11)$$

3.4. Prevacío y bombas rotatorias

La bomba de pistón rotativo es una bomba sellada con aceite disponible comercialmente para bombear gas en el rango de presión de $1 \cdot 10^5 Pa$.

En una bomba rotativa de paletas el gas ingresa a la cámara de succión (A) y es comprimido por el rotor (3) y la paleta (5) en la región B y es expulsado a la atmósfera a través de la válvula de descarga (8) y el fluido por encima de la válvula. Un sello hermético es hecho por uno o más resortes o paletas cargadas centrífugamente y las superficies de sellado estrechamente espaciadas (10). Las paletas y las superficies entre el rotor y la carcasa están selladas por el fluido de baja presión de vapor, que también sirve para lubricar la bomba y llenar el volumen por encima de la válvula de descarga. Las bombas de una etapa constan de un rotor y un bloque del estator (Figura 3.3). Si se agrega una segunda etapa conectando el escape de la primera etapa a la entrada de la segunda, se pueden alcanzar presiones más bajas. La última presión en la entrada de la segunda etapa es menor que en la entrada a la primera porque el fluido que circula en la segunda etapa está bastante aislado de la que circula en la primera etapa. El fluido en la segunda etapa contiene menos gas que el fluido en el depósito. Físicamente, la segunda etapa de bombeo se encuentra adyacente al primero y en el mismo eje. Las bombas de paletas rotativas tienen presiones mínimas en el rango de $3 \cdot 10^{-3}$ y $1Pa$, respectivamente la de dos y una etapa.

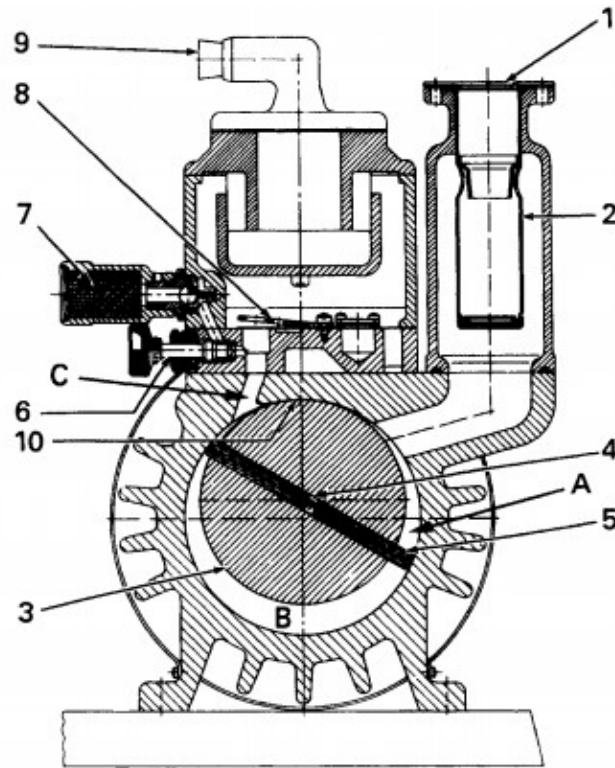


Figura 3.3: Esquema de las partes de una bomba de vacío rotatoria.

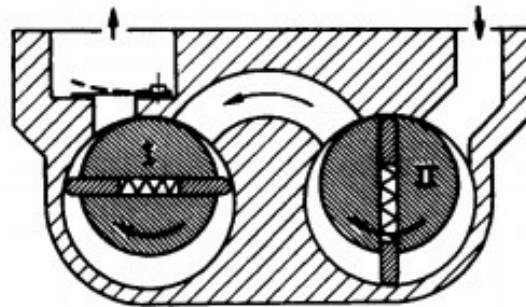


Figura 3.4: Esquema de una bomba rotatoria con dos etapas.

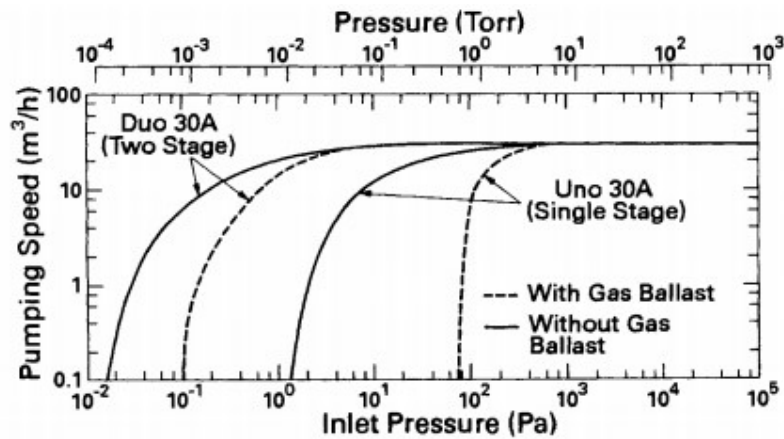


Figura 3.5: Caudal de succión para bombas rotatorias de una y dos etapas.

Los lubricantes evitan que las superficies en movimiento entren en contacto. Cuando las superficies entran en contacto, se produce fricción y desgaste de las superficies. La fricción genera calor, mientras que el desgaste destruye el material y produce escombros. En un entorno atmosférico, es el desgaste, no la fricción, el responsable de la mayoría de los problemas. En un entorno de vacío, la fricción es un problema. El vacío elimina el enfriamiento por convección, aumenta las tasas de evaporación del lubricante, reduce la oxidación de los metales, acelera el inicio de la soldadura en frío y altera la distribución del tamaño de las partículas de desgaste. El fluido ideal de la bomba de difusión debe ser estable, debe tener una baja presión de vapor, un calor específico bajo y un calor bajo de vaporización, y debe ser seguro para su manejo, eliminación y uso. No debe descomponerse térmicamente, atrapar gas o reaccionar con su entorno. Desafortunadamente, no existe tal fluido. Las propiedades de los hidrocarburos destilados y los fluidos sintéticos usados actualmente en las bombas de difusión se dan en la Figura 3.6 en forma de tabla.

En cuanto a los sellos y sistemas de unión la técnica que se elija utilizar depende de los materiales a unir y del entorno térmico y de vacío al que estarán expuestas las piezas. Las juntas soldadas de acero inoxidable, titanio o aluminio, juntas de vidrio selladas a la llama, vidrio-metal y juntas de cerámica a metal se utilizan comúnmente en la construcción de sistemas de vacío alto y ultra alto.

Chemical Type	Representative Trade Name	MW (ave)	Sp. Gr. at (25°C)	P_v at 25°C (Pa)	Fire Point (°C)	Latent Heat (J/g)	C_p (J/g/°C)	T_{boiler} 100 Pa (°C)
Mineral Oil								
	Apiezon [®] C [44]	574	0.87	1×10^{-6}	293	217.6	1.92	269
	Balzars-71 [39]	280	0.88	3×10^{-6}	325	—	1.88	180
	Convoil [®] 20 [40]	400	0.86	5×10^{-5}	258.9	—	—	210
	Invoil [®] 20 [42]	450	0.88	5×10^{-5}	259	170	1.88	210
Silicone								
Trisiloxane ^b	Dow Corning [®] 704 [45]	484	1.07	3×10^{-6}	275	220.5	1.72	220
	Dow Corning [®] 705 [45]	546	1.09	4×10^{-8}	275	215.9	1.76	250
Ether								
PPE ^{a,b}	Convalex 10 [40]	447	1.2	6×10^{-8}	350	205.8	—	275
	Santovac [®] 5 [46]	447	1.2	6×10^{-8}	350	205.8	1.84 ^c	275
Fluorocarbon								
PFPE ^{a,d}	Fomblin [®] 25/9 [16]	3400	1.90	3×10^{-7}	None	29.3	1	230
	Krytox [®] 1625 [29]	3700	1.88	$^{-7}3 \times 10$	None	41.8	1	230

Figura 3.6: Fluidos utilizados como lubricantes en bombas de difusión y sus propiedades.

Recordando que la distribución de Maxwell-Boltzmann es:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (3.12)$$

Además, las masas atómicas para el N, H y Ar son, respectivamente, 14.0067, 1.00794 y 39.984 u. Y, siendo $\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P}$ el camino libre medio se tienen los siguientes gráficos:

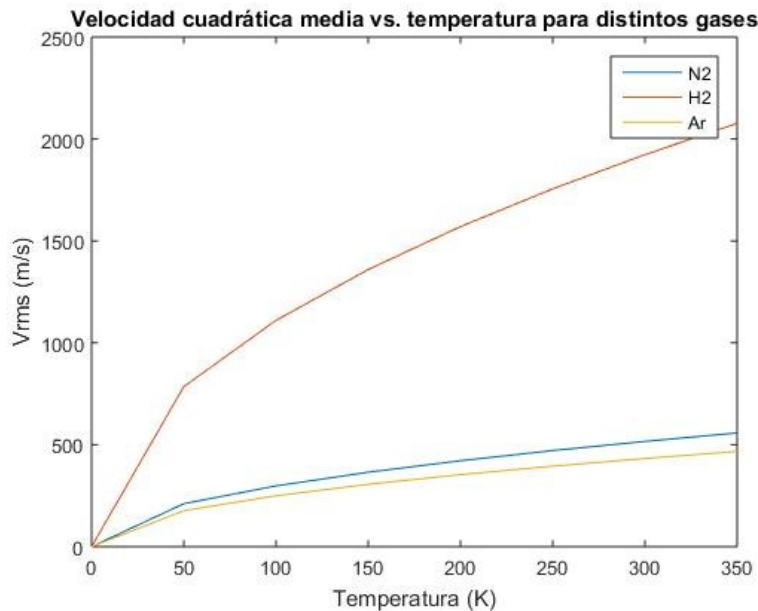


Figura 3.7: Velocidad cuadrática media del N, H y Ar en función de la temperatura.

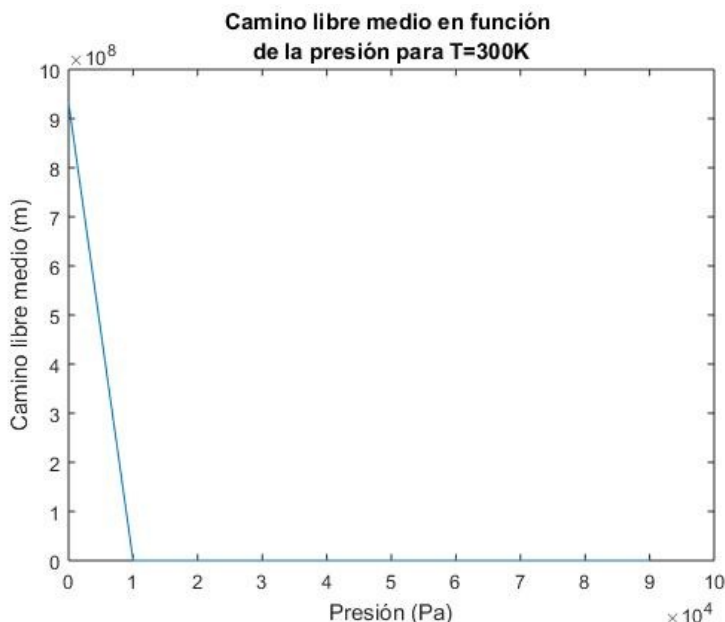


Figura 3.8: Camino libre medio para el N, H y Ar en función de la presión para T=300K.

3.5. Alto vacío y bombas difusoras

En primer lugar, supóngase que se tiene un recipiente de 10 L, sobre cuyas paredes se encuentra adsorbida una capa monomolecular de gas. Si asumimos que este recipiente es cúbico (por simpleza) cada arista medirá $a = 0,2154m$. Si suponemos moléculas de N_2 con un diámetro molecular de $d_0 = 109,76pm$, habrán a/d_0 partículas en una fila de la cara. Luego, en toda la superficie existirán:

$$N_{pa} = 6 \left(\frac{a}{d_0} \right)^2 = 2,311 \cdot 10^{19} \text{moléculas} \quad (3.13)$$

Luego, usando la aproximación de gases ideales y dejando la presión como variable, se tiene, a temperatura constante (300K):

$$N_V = \frac{PV}{kT} = \frac{P}{100kT} \implies N_V = 2,41 \cdot 10^{18} P \text{moléculas} \quad (3.14)$$

Finalmente, el cociente N_{pa}/N_V es:

$$\frac{N_{pa}}{N_V} = \frac{9,589}{P} \text{moléculas} \quad (3.15)$$

La Figura 3.9 muestra un gráfico del comportamiento de este cociente en función de la presión. Es evidente que las partículas adsorbidas predominan para presiones menores a los $9,589 Pa$, aproximadamente.

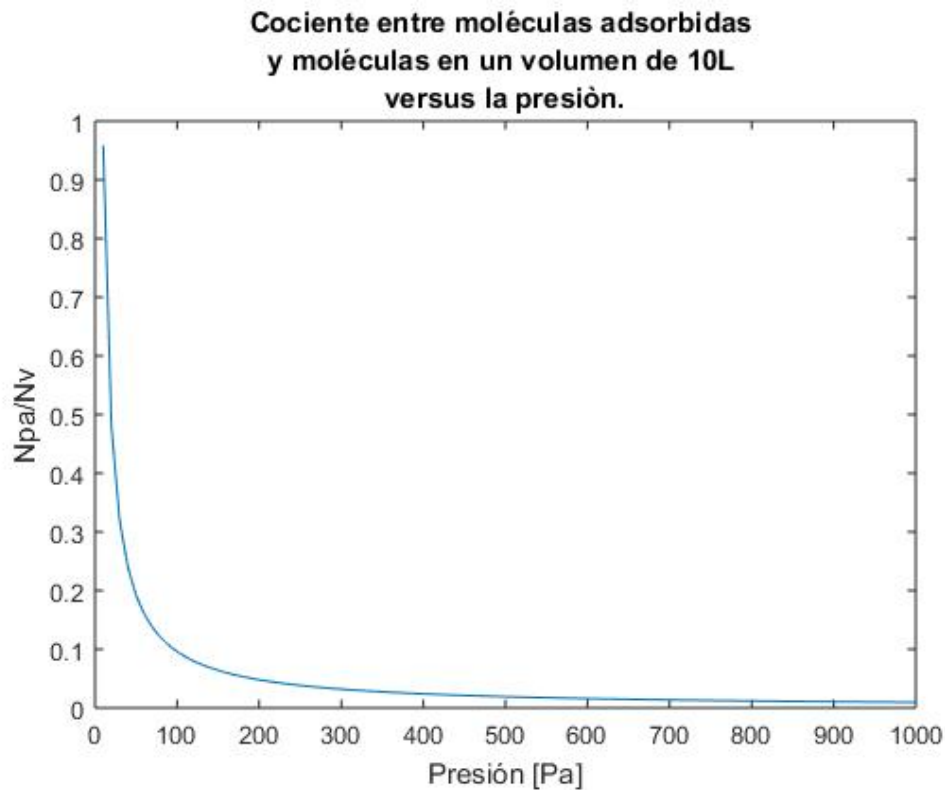


Figura 3.9: Cociente entre partículas adsorbidas y partículas en el volumen en función de la presión.

La bomba de difusión es una bomba de chorro de vapor, que transporta gas por transferencia de momento en una colisión con la corriente de vapor. Un fluido motriz como el aceite de hidrocarburo, un líquido orgánico o mercurio se calienta en la caldera hasta que se vaporiza. Los vapores fluyen por la chimenea y salen a través de una serie de boquillas. Las boquillas dirigen la corriente de vapor hacia abajo y hacia la pared exterior enfriada, donde se condensa y vuelve a la caldera. El flujo de vapor es supersónico. Los gases que se difunden en esta corriente de vapor supersónico reciben, en promedio, un impulso hacia abajo y se expulsan a una región de mayor presión (véase Figura 3.10). Las bombas modernas tienen varias etapas de compresión, generalmente de tres a cinco para bombas pequeñas y hasta siete para bombas grandes.

La presión de la caldera en una bomba de difusión moderna es de aproximadamente 200 Pa. El valor práctico máximo de la presión tolerada por la bomba es menor que la presión de la caldera. Este valor máximo llamado "presión crítica", oscila entre 25-75 Pa y depende del diseño de la bomba y de la presión de la caldera. La bomba de difusión no puede expulsar el gas a la presión atmosférica. Debe ser respaldado por otra bomba para mantener la presión (presión de escape o presión de la línea frontal) por debajo de la presión crítica. Las bombas rotativas de paletas o pistones o las combinaciones de sopladores rotativos y lóbulos se usan como bombas de respaldo. o "delanteras". Si la presión sobrepasa el valor crítico, cesará toda acción de bombeo. La acción de bombeo cesa a altas presiones debido a que la corriente de vapor supersónico dirigido ya no se extiende desde el chorro a la pared, sino que termina en un frente de choque cerca del chorro. Esas moléculas de vapor más allá del frente de choque están dirigidas al azar y no pueden impedir que las moléculas de gas vuelvan a la entrada. A medida que se excede la presión crítica, la presión de entrada aumentará brusca e incontrolablemente en respuesta al

cese del bombeo. La presión crítica nunca debe excederse.

Las bombas con estos y otros avances, que usan fluidos pesados producidos por destilación molecular, pueden bombear a $5 \cdot 10^{-5} Pa$ sin atrapar y $5 \cdot 10^{-9} Pa$ cuando ha atrapado con nitrógeno líquido.

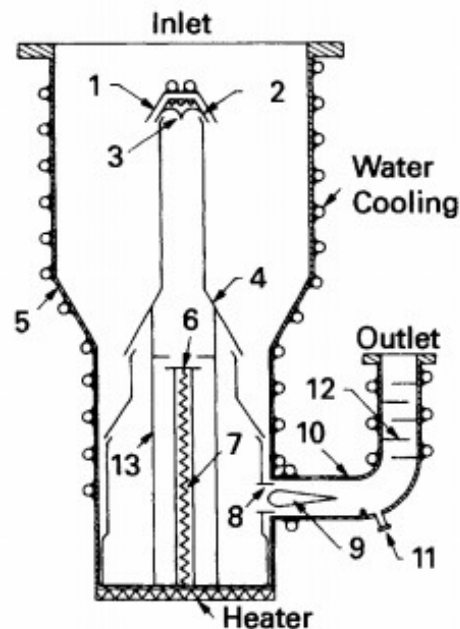


Figura 3.10: Esquema del interior de una bomba difusora.

El backstreaming (retrotracción) se define como transporte de fluido de bombeo y sus fracciones desde la bomba a la cámara.

Se han identificado cinco fuentes de contraflujo en estado estacionario: (1) Evaporación del fluido condensado en las paredes superiores de la bomba, (2) ebullición prematura del condensado antes de que entre en la caldera, (3) la sobreexpulsión del vapor de aceite en el chorro superior, (4) fugas en el tapón del chorro y (5) evaporación de fluido del labio calentado del chorro superior. La retroextracción de (1) se puede reducir mediante el uso de fluidos a baja presión de vapor y la captura adicional sobre la bomba. La mayoría de los diseños de bombas eliminan las fuentes (2) y (4). El uso de un tapón enfriado con agua directamente sobre el conjunto de chorro superior reduce sustancialmente (3) y (5), que se descubrieron que eran las principales causas del retroceso del fluido.

Es posible una reducción adicional de la retrotracción mediante el uso de un deflector o una trampa. Las palabras "trampa" y "deflector" a menudo se usan incorrectamente. Operacionalmente, una trampa es una bomba para vapores condensables, y un deflector es un dispositivo que condensa los vapores de fluido de la bomba y devuelve el líquido a la caldera de la bomba.

3.6. Otras bombas

Para complementar el conocimiento sobre distintos tipos de bombas de vacío se dan a continuación dos ejemplos aparte de los ya vistos hasta ahora.

Bomba turbomolecular

Las bombas turbomoleculares funcionan en base al principio que es posible transferirles momento a las moléculas de gas en una dirección determinada mediante choques sucesivos contra una superficie móvil sólida. En una bomba turbomolecular, un rotor de turbina que gira a gran velocidad "golpea" moléculas de gas y las impulsa desde la entrada de la bomba hacia su descarga de manera de crear o mantener condiciones de vacío.

La mayoría de las bombas turbomoleculares poseen varias etapas, cada una de las cuales consiste en pares de rotor/estator montados en serie (ver Figura 3.11). El gas capturado en las primeras etapas es empujado hacia las etapas posteriores y comprimido sucesivamente hasta el nivel de la presión de salida. Cuando las moléculas de gas penetran por la boca de entrada, el rotor, que posee numerosos álabes en ángulo, golpea las moléculas. De esta manera la energía mecánica de los álabes es transferida a las moléculas de gas. Con este nuevo momento que han adquirido, las moléculas de gas entran en las aberturas de transferencia de gas del estator. El cual las conduce a la próxima etapa donde nuevamente golpean con la superficie del rotor, y este proceso se repite, lo que las conduce finalmente a la boca de salida de la bomba.

Debido al movimiento relativo entre el rotor y el estator, las moléculas preferentemente golpean contra la cara inferior de los álabes. Como la superficie del álabe apunta para abajo, la mayoría de las moléculas después de su impacto saldrán con una dirección de movimiento hacia abajo. La superficie es rugosa, de forma tal que no puede producirse reflexión. Un álabe debe ser grueso y estable para operar a alto vacío y tan delgado como sea posible y ligeramente curvado para conseguir una compresión máxima. Para relaciones de compresión elevadas la boca entre álabes adyacentes del rotor (como se muestra en la imagen) apunta tanto como sea posible en dirección hacia adelante. Para flujos de aire grandes los álabes se ubican a unos 45° de inclinación y comienzan muy próximos al eje. La presión final varía de $2 \cdot 10^{-7}$ a $5 \cdot 10^{-7} Pa$ en función del tipo de aceite en la bomba extractora, llegando hasta $0,1 Pa$.

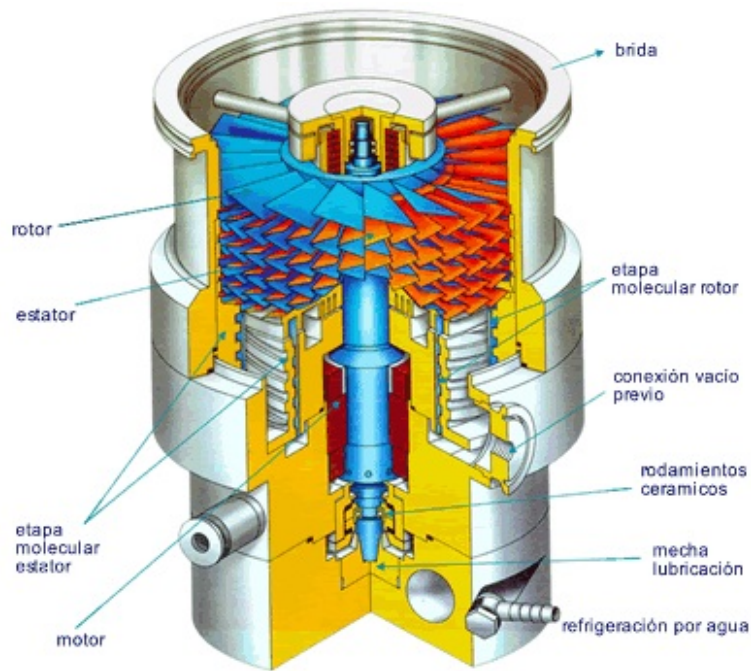


Figura 3.11: Esquema de una bomba turbomolecular.

Bomba de iones

El mecanismo de bombeo en una bomba de iones depende de la naturaleza del gas que se bombea y se basa en uno o más de los siguientes mecanismos: (1) precipitación o adsorción después de la disociación molecular; (2) obtención por material de cátodo recientemente pulverizado; (3) entierro superficial bajo material de cátodo pulverizado; (4) entierro de iones después de la ionización en la descarga; y (5) entierro rápido del átomo neutro. (Los iones se neutralizan mediante transferencia de carga superficial y se reflejan en otra superficie donde son bombeados por el entierro). Este tipo de bombas trabajan en el ultra alto vacío.

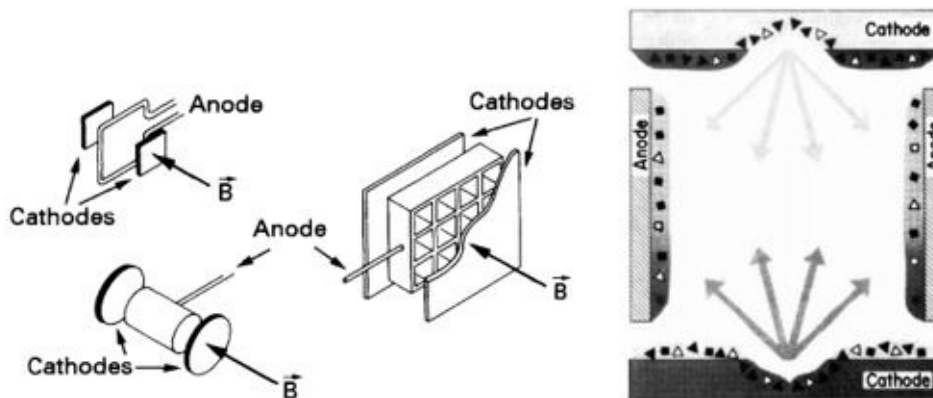


Figura 3.12: Esquema de una bomba de iones y su mecanismo de operación.

3.7. Medicion de presiones

El control de máquinas e instalaciones completas requiere la medición de la presión. A menudo el usuario tiene que enfrentarse a la decisión de seleccionar un instrumento de medida relativa o absoluta. La diferencia entre la medida relativa y absoluta reside en la selección de la presión de referencia. La presión relativa se mide en comparación con la presión ambiental, mientras la presión absoluta es la diferencia entre vacío y la presión medida. Los sensores electrónicos captan la variación de presión mediante la deformación de una membrana.

La presión se mide en comparación con una presión de referencia que corresponde a la presión absoluta cero. En la cámara de referencia en el lado del elemento sensible que no está sometido a presión existe un vacío absoluto como presión de referencia. La membrana (1) separa la cámara de medición (3) y la cámara de referencia (2) con presión absoluta cero. La presión diferencial entre cámara de medición (3) y cámara de referencia (2) provoca una flexión de la membrana (1). El elemento sensible se apoya en caso de sobrepresión sobre un asiento para su protección. La trayectoria del desplazamiento se transmite mediante fuelles (4) desde la cámara de medición y mediante una biela (5) se realiza la transmisión al mecanismo para proporcionar la indicación (ver Figura 3.13).

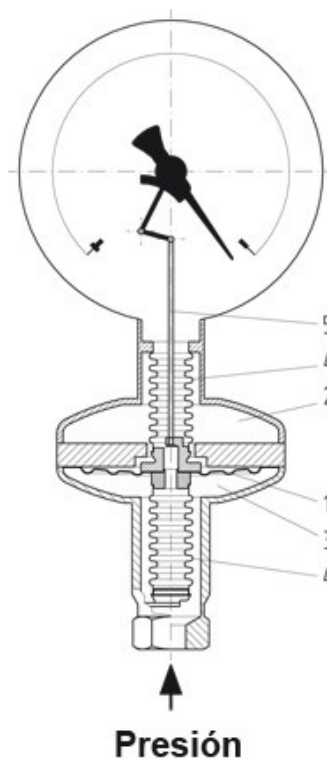


Figura 3.13: Esquema de un instrumento para medir presiones en base a una membrana sensible.

- **Termopar:**

Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los milivoltios) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado «punto caliente» o «unión

caliente» o de «medida» y el otro llamado «punto frío» o «unión fría» o de «referencia». El rango de funcionamiento es entre los 1 y los $10^{-3}mmHg$.

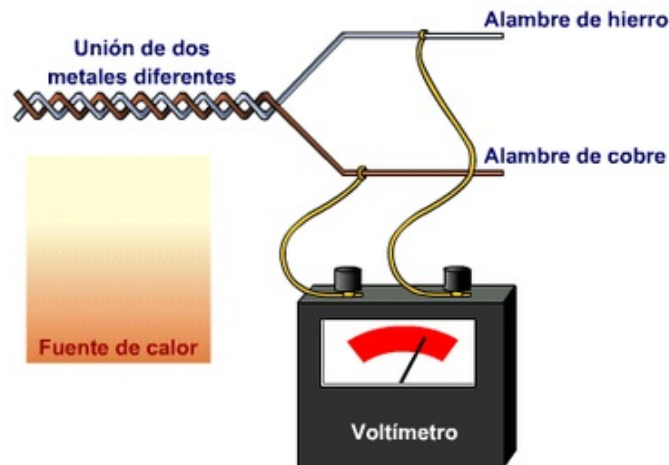


Figura 3.14: Diagrama de funcionamiento de un termopar.

■ Penning:

En un penning los electrones son emitidos y acelerados por un alto voltaje aplicado de varios 1000 voltios. Mediante los campos eléctricos y magnéticos cruzados existentes, los electrones se fuerzan en trayectorias en espiral. Esto aumenta la probabilidad de que el electrón acelerado golpee partículas de gas neutro y lo ionice debido a la energía obtenida en el campo eléctrico.

Las partículas de gas ionizado se aceleran en el campo eléctrico en la dirección de los cátodos puestos a tierra. Ellos son neutralizados cuando los golpeas. La corriente requerida para la neutralización depende de la cantidad de iones que se deben neutralizar durante cada unidad de tiempo. Por lo tanto, la corriente es una medida de la presión predominante en el sensor. Dado que la probabilidad de ionización depende del gas predominante en el volumen de medición, la medición de presión depende del tipo de gas. El rango de funcionamiento es entre los 10^{-2} y los $10^{-7}mmHg$.

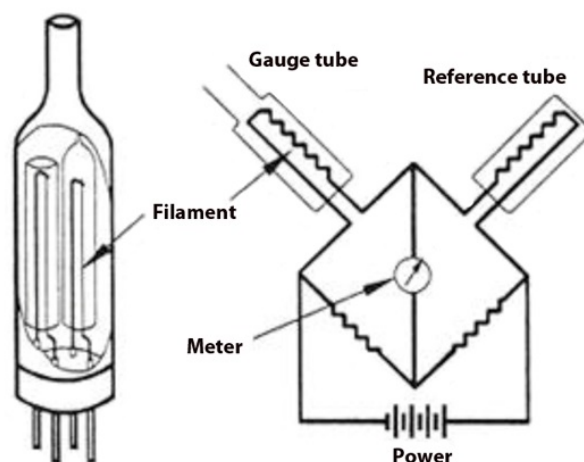


Figura 3.15: Esquema de un penning y su estructura de funcionamiento.

3.8. Evaporación de un material

Se proporciona información relevante sobre el aluminio para la experiencia a realizar.

- Punto de fusión: 933.47 K (660°C).
- Conductividad (a 300): 237 W/K.
- Temperatura para conseguir una presión de vaporación de 1 Pa: 1 482.5 K (1 209 °C).

3.9. Metodología

Previo a utilizar el sistema de vacío se debe instalar dentro de la cámara de la bomba rotatoria el material a evaporar (tungsteno 99,95 % de 0.25 mm) formando una espiral, de manera que el evaporado sea lo más uniforme posible sin acumulaciones en zonas determinadas.

Los procedimientos de uso del sistema de vacío son los siguientes, según la notación del laboratorio de la bomba difusora y rotatoria:

1. Prender el equipo general.
2. Prender la regleta.
3. Encender la bomba rotatoria.
4. Abrir válvula 3 (rotatoria-cámara).
5. Esperar a que la presión baje a 10^{-1} (según el medidor de presión en la cámara). Tiempo de espera aproximado: 20 min.
6. Cerrar válvula 3 (es posible que la presión suba un poco).

7. Abrir válvula 1. Mirar el medidor de la mesa y esperar a que llegue a $100mTorr$, aproximadamente.
8. Dar el agua.
9. Encender la bomba difusora.
10. Esperar a que se caliente el aceite (la presión indicada en el medidor de la mesa comenzará a subir).
11. La presión debe subir hasta $150mTorr$ y luego bajar a $100mTorr$, aproximadamente. Esto significa que existe bombeo.
12. Abrir válvula 2: Fijarse en el medidor de presión de la cámara: si al abrir la válvula (cuidadosamente) la presión sube, entonces volver a cerrarla y esperar 10 minutos más para que la difusora bombee.
13. Una vez que la difusora empiece a bombear esperar que la presión alcance $10^{-4}mbar$.
14. Al terminar la evaporación cerrar la válvula 2 y apagar la bomba difusora.
15. Esperar aproximadamente 30 minutos a que se enfríe el aceite.
16. Cortar el agua.
17. Cerrar válvula 1.
18. Apagar bomba rotatoria.
19. Ventilar solo para sacar la muestra.

3.10. Resultados

Luego de proceder siguiendo los pasos mencionados en la sección anterior, particularmente hasta el paso 4 se tienen los siguientes según la hora:

Tabla 3.1: Hora y presiones en las cámaras de vacío.

Hora	Presión [mbar]
10:22	$2.1 \cdot 10^1$
10:27	$2.1 \cdot 10^{-1}$
10:32	$8.7 \cdot 10^{-2}$

Posteriormente, se procede desde el paso 5 al paso 8. Cuando se abre la válvula 1 la presión en la cámara llega a los $10^{-1}mbar$. A las 10:35 hrs. la presión en la cámara de vacío sube a $1,3 \cdot 10^{-1}mbar$, la presión en la válvula 1 llega a los $70mTorr$ y la temperatura en la bomba difusora es de $27,5^{\circ}C$. Luego, los avances en las presiones y temperaturas son las siguientes:

Tabla 3.2: Hora, presiones y temperaturas en el proceso de evaporación.

Hora	Presión en cámara de vacío	Presión en válvula 1 [mTorr]	Temperatura de la bomba difusora [°C]
10:40	$1.9 \cdot 10^{-1} [\text{mbar}]$	52	49
10:45	$2.6 \cdot 10^{-1} [\text{mbar}]$	53	82.7
10:48	Se abre la válvula 2		
	$2 \cdot 10^{-1} [\text{mbar}]$	530	102.2
10:50	0.0 [mbar]	200	113
10:55	$3 \cdot 10^{-2} [\text{Pa}]$	110	124.5
11:00	$2.7 \cdot 10^{-2} [\text{Pa}]$	100	126.2
11:05	$2.2 \cdot 10^{-2} [\text{Pa}]$	85	127.5
11:10	$1.8 \cdot 10^{-2} [\text{Pa}]$	73	128.4
11:15	$1.7 \cdot 10^{-2} [\text{Pa}]$	73	128.5

En este punto comienza la evaporación y se lleva un registro de la corriente que circula por el por el material, la cual es proporcionada por una fuente y se aumenta en 1 [A] cada 1 minuto, aporximadamente.

Tabla 3.3: Hora en la medición de corriente circulando por el material.

Hora	Corriente [A]
11:20	4.39
11:21	5.96
11:22	7.2
11:23	8.14
11:24	8.83
11:25	10.0
11:26	11.08
11:27	12.3
11:28	13.28
11:33	15.3
11:39	17.5
11:41	17
11:45	0.0

Habiendo llegado a este punto, se comienzan a realizar los pasos para finalizar el experimento. Vale decir, los pasos 14 al 19.

La muestra obtenida se aprecia en la Figura 3.16.

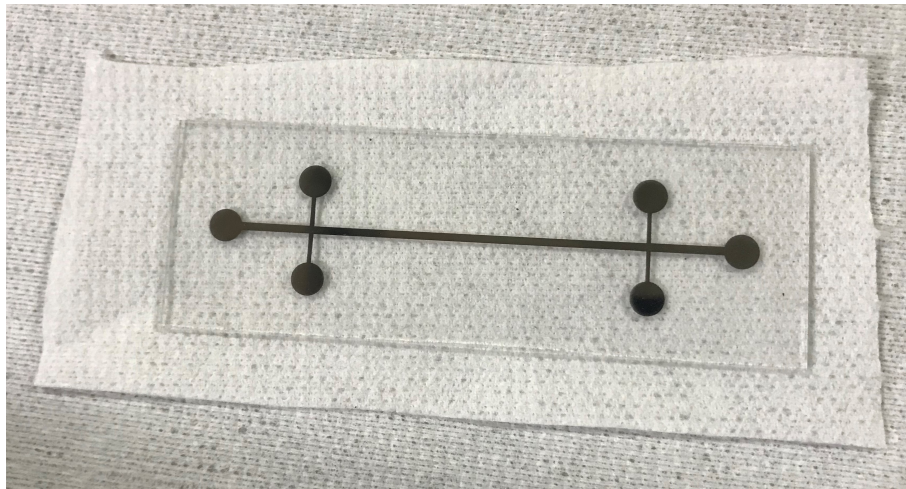


Figura 3.16: Muestra del material evaporado obtenido luego del proceso experimental realizado.

3.11. Conclusiones

El resultado final de la evaporación de la placa fue satisfactorio y se realizó en un tiempo no muy largo, esto debido a que otros grupos ya habían hecho funcionar las bombas, quitando así gran parte de los gases adsorbidos por esta desde la atmósfera.

La placa cumple con las exigencias necesarias para ser utilizada en la siguiente unidad.

UNIDAD 4

Medición por 4 Contactos

4.1. SEGURIDAD

Se hace de vital importancia para el desarrollo de esta unidad entender el concepto de ruido y todo lo relacionado a él.

Si consideramos la naturaleza del sonido como una onda de presión de la forma $P(r, t) = P_0 + \Delta P(r, t)$, con P_0 la presión atmosférica, es consecuente poder establecer una intensidad mínima de la presión diferencial que puede ser percibida por el oído. El umbral de audibilidad (en el aire) se define como la mínima presión necesaria para que un sonido senoidal de 1 [kHz] pueda ser percibido. Conforme a Fletcher y Munson se requieren 0 [dB], equivalentes a 20 [μ Pa]. Posteriormente manteniendo el nivel de referencia de 0[dB] se recalculó el umbral en 3[dB] equivalentes a 28.25 [μ Pa]. La Figura 4.1 y 4.2 muestran las diferentes presiones de sonido perceptibles por el oído humano en base a la edad y a los distintos límites existentes en el espectro, respectivamente.

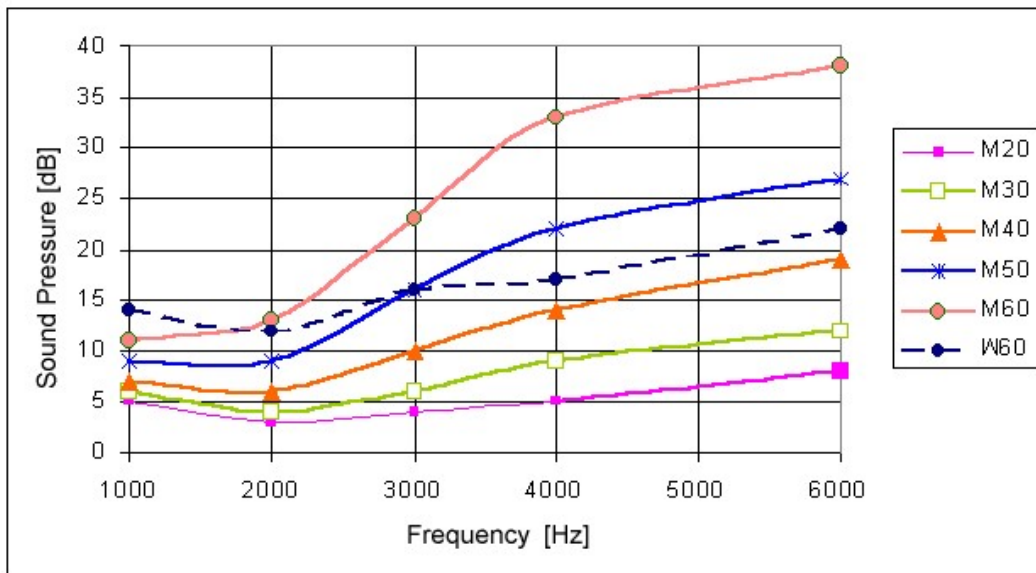


Figura 4.1: Gráfico de la presión de sonido perceptible por el oído humano según la edad versus la frecuencia.

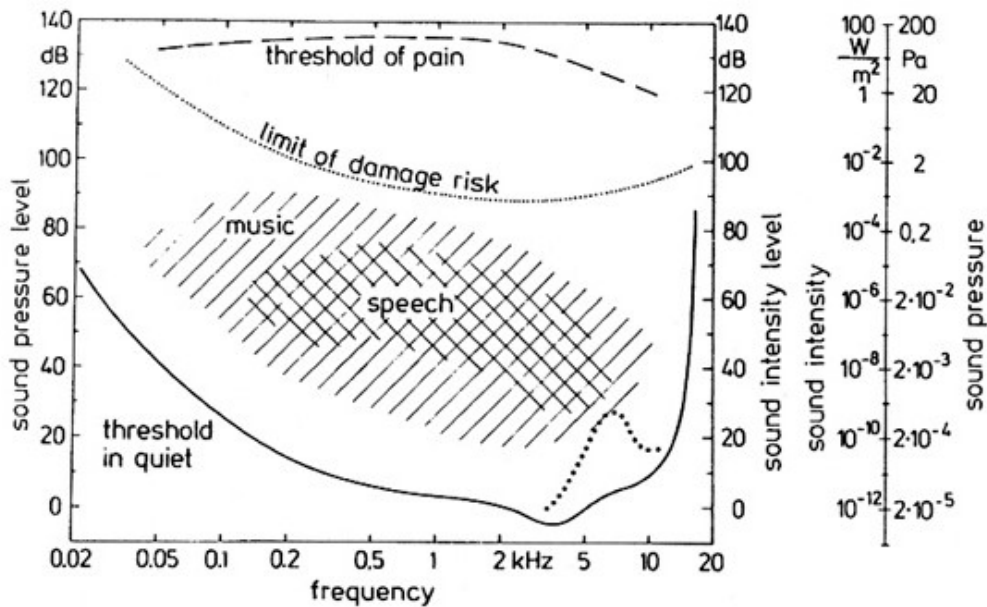


Figura 4.2: Gráfico de la presión de sonido perceptible por el oído humano versus la frecuencia, teniendo en cuenta los diferentes límites dentro del espectro.

El decibel es una escala para expresar la relación entre 2 potencias por lo que requiere un valor de referencia. Es una escala adimensional logarítmica, por lo que no pertenece al SI de unidades. En el caso del sonido, expresa el nivel de potencia o nivel de intensidad del sonido.

Las ondas de sonido producen variación de presión en el aire, entonces el decibelio se puede calcular:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (4.1)$$

Donde P_1 es la presión a estudiar y P_0 es la presión de referencia (umbral de audición) equivalente a $20[\mu\text{Pa}]$.

El índice SIL (Speech interferente level), se define como la media aritmética de los niveles de presión sonora en las tres bandas de octava siguientes: de 600 a 1200 Hz; de 1200 a 2400 Hz y de 2400 a 4800 Hz. Cuando en el cálculo de la media aritmética consideramos las tres bandas centradas respectivamente en 500, 1000 y 2000 [Hz] se obtiene el índice PSIL (Preferred speech interferente level).

Tabla 4.1: Intensidad del ruido de fondo y distancia entre dos personas según el PSIL y forma de hablar.

Distancia de comunicación [m]	PSIL máx. según forma de hablar [dB]			
	Normal	Alto	Muy Alto	A gritos
0.15	74	80	86	92
0.3	68	74	80	86
0.5	62	68	74	80
1.2	56	62	68	74
1.8	52	58	62	70
3.7	46	52	58	62

A continuación, se presentan en la tabla 4.2 valores representativos de la presión de actividades ruidosas en [dB] y [Pa]:

Tabla 4.2: Presiones asociadas a actividades ruidosas en [dB] y [Pa]

[dB]	P_1 [Pa]	Actividad
200	200k	Bomba atómica similar a Hiroshima y Nagasaki
180	20k	Cohete en despegue
142.2	257.65	Récord Guinness de ruido en un estadio
140	200	(Umbral del dolor) Coche de Fórmula 1
130	63.245	Avión en despegue
120	20	Motor de avión en marcha. Pirotecnia
110	6.324	Concierto. Acto cívico
100	2	Perforadora eléctrica
90	632.5m	Tráfico
80	200m	Tren
70	63.25m	Aspiradora. Televisión. Tráfico de autopista a 15[m]
50/60	6.3245m/20m	Aglomeración de gente / Lavavajillas antiguo
40	2m	Conversación
20	200 μ	Biblioteca
10	63.245 μ	Respiración tranquila
0	20 μ	Umbral de audición

En Chile la norma exige no más de 85 [dB] por 8 horas. Para estimar si el nivel de ruido en un lugar es aceptable o no sin utilizar instrumentos se puede utilizar la tabla de distancia (Tabla 4.1). Se debe poder establecer conversación inteligible normal.

El hecho de que existan normas regulando la cantidad de ruido permitida en un lugar es un indicio directo de que este tiene efectos nocivos sobre las personas (y en el ecosistema en general). Algunos de ellos son:

- **Consecuencias fisiológicas:** Se producen en ambientes en torno a los 100 [dB]. Producen enfermedades irreversibles como la hipoacusia (pérdida parcial de la audición) o cofosis (pérdida

total).

- **Consecuencias psíquicas:** Estrés, insomnio, disminución de rendimiento y atención, agresividad.
- **Consecuencias sociológicas:** Alteraciones en la comunicación.
- **Consecuencias patológicas:** Enfermedades del metabolismo, como la isquemia.
- **Consecuencias radiásticas:** Alteraciones musculares, hipertensión.

Se hace necesario al momento de tomar mediciones en un experimento el reducir lo más posible el ruido. Para esto tenemos tres opciones de intervención:

- **Fuente:** es la manera más eficaz de reducir el ruido, pero deben realizarse las modificaciones pertinentes al momento de hacer el diseño del equipo o máquina que es fuente de ruido, ya que después se vuelve muy costoso. En maquinaria de golpe o impacto, por ejemplo, se puede aumentar la superficie de impacto, el tiempo de impacto y el amortiguamiento interno. Es siempre recomendado un buen mantenimiento. Si de flujos se trata se tienen que evitar turbulencias, usar silenciadores (reactivos: reflexiones/baja frecuencia; disipativos: absorción/alta frecuencia; reactivo-disipativo), revestir tuberías y disminuir presión de salida.
- **Camino:** se puede cambiar la ubicación de la fuente, instalar intersecciones de barrera (disminuye altas frecuencia por difracción) o pantalla acústica, utilizar encercamiento o encapotamiento (bajas frecuencias) y generar acondicionamiento acústico (materiales absorbentes) para disminuir la reverberación.
- **Receptor:** : es recomendable el uso de equipo de protección personal (tapones o auriculares) o protectores activos (detectan ruido y lo cancelan generando el mismo a contrafase).

Al momento de trabajar en el laboratorio existen diferentes fuentes de ruido, las cuales podemos clasificar en fuentes externas e internas. Las primeras están ligadas al ambiente universitario y flujo vehicular, entre otras. Para reducirlo basta con las barreras proporcionadas por la estructura del edificio. Las segundas corresponden a maquinaria de laboratorio (principalmente bombas) o el uso de herramientas, entre otras. Para reducirlo se pueden usar tapones y materiales aislantes del sonido en las paredes de la sala.

Como ya se mencionó anteriormente, existen protecciones personales contra ruidos como, por ejemplo, tapones (se usan cuando el ruido no es mucho), generalmente utilizados para mantener la comodidad y evitar estrés o fatiga. Cuando se requiere un mayor control se utilizan auriculares, estos pueden tener materiales absorbentes de frecuencias específicas, de tal manera que puedan reducir el ruido en la sala, pero en menor grado el de una alarma.

4.2. Ruido eléctrico

Hablando muy generalmente, el ruido en una medición consiste en errores aleatorios, originados en el objeto sometido a medición o en el sistema de medición mismo. Naturalmente, hay que elegir un sistema de medición que agregue poco ruido al originado inevitablemente en el objeto (no siempre es posible).

Algunas fuentes de error en una medición de baja corriente son:

- **Efecto triboeléctrico:** este fenómeno se da por la electrificación por frotamiento o inducción electromagnética. Se puede eliminar o evitar reduciendo la fricción entre los materiales en contacto.
- **Efecto piezoeléctrico:** este ocurre en determinados cristales. Estos al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren polarización generando una diferencia de potencial. Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales (cuarzo) o sintéticos (cristales utilizados en micrófonos, fonocaptadores, etc.) que carecen de centro de simetría. Al ser afectados por una compresión o cizallamiento provocan dislocaciones que generan dipolos. Para disminuirlo se debe remover los esfuerzos mecánicos en los aisladores.
- **Efecto electroquímico:** cuando compuestos químicos iónicos conectan 2 conductores se producen baterías generando pequeñas corrientes. A veces la contaminación iónica y la humedad disminuyen la resistencia de los elementos aislantes, formando un conductor. Para reducir esto se pueden utilizar aisladores que resistan la absorción de agua, así como mantener las superficies de estos descontaminadas.
- **Efecto térmico (ruido de Johnson):** en una resistencia, la energía térmica produce movimiento de partículas cargadas. Este movimiento resulta en ruido llamado Ruido de Johnson, o ruido térmico. Sabemos que la potencia en este caso será $P = 4kTB$ y, por ende, valores RMS para el voltaje y la corriente, respectivamente, dados por:

$$V_{RMS} = \sqrt{4kTB R} \quad (4.2)$$

$$I_{RMS} = \frac{\sqrt{4kTB R}}{R} \quad (4.3)$$

Con R la resistencia, B el ancho de banda de ruido en [Hz], k la constante de Boltzmann ($1,3806 \cdot 10^{-23} J/K$), T la temperatura y V e I los voltajes y corrientes del ruido de Johnson en RMS.

La solución es reducir la temperatura (muy caro), o el ancho de banda (mejor opción), o la resistencia interna de las fuentes de energía y la medición (ojo que este reduce el voltaje, pero aumenta la corriente).

Para reducir el ancho de banda se puede utilizar un dispositivo con filtros digitales (promediando el número de medidas). Para reducir aún más el ruido se suele utilizar un filtro pasa bajo (RC).

El ruido no se puede eliminar cuando las constantes térmicas del circuito son del mismo orden que la respuesta temporal del instrumento, pues se hace difícil distinguir entre la señal y sus fluctuaciones térmicas.

- **Efecto superficial (superficie limpia):** el efecto superficial ocurre cuando la corriente circula superficialmente por el material en lugar de ir a través de este. Una superficie de material aislante sucia puede contener elementos que conducen electricidad.
- **Efecto superficial (gases adsorbidos):** similar a lo anterior, el aire puede contener elementos que pueden ser adsorbidos en la superficie del material, como partículas de agua que conducen electricidad.

- Fugas por aislación:** La corriente de fuga es la corriente que fluye desde el circuito de CC o CA de un equipo hasta el suelo o el armazón y puede ser desde la salida o la entrada. Si el equipo no está correctamente conectado a tierra, la corriente fluye a través de otras rutas, como el cuerpo humano. Esto también puede ocurrir si la tierra es incompetente o se interrumpe involuntaria o intencionalmente.

La corriente de fuga en un equipo fluye cuando se produce una conexión eléctrica no intencional entre el suelo y una pieza o conductor energizados. El suelo puede ser el punto de referencia de voltaje cero o la tierra física. Lo ideal es que la fuga de corriente de la unidad de suministro de energía fluya a través de la conexión a tierra y a la tierra de la instalación.

Para disminuirlo es necesario identificar qué elemento circuital está generando fugas y reemplazar o mejorar las conexiones del circuito o montaje.

A continuación, la tabla 4.3 muestra las respuestas de algunos materiales a algunos de los efectos mencionados anteriormente.

Tabla 4.3: Materiales y sus respuestas a algunos efectos de error en la medición de bajas corrientes. La notación es: '+' para "muy bueno", 'o' para "bueno" y '-' para "malo" en las propiedades mencionadas.

Material	Resistividad volumétrica [$\Omega \cdot cm$]	Resistencia a la absorción de agua	Mínimo efecto piezoeléctrico	Mínimo efecto triboeléctrico	Mínima absorción dieléctrica
Zafiro	$>10^{18}$	+	+	o	+
Teflón	$>10^{18}$	+	-	-	+
Polietileno	10^{16}	o	+	o	+
Poliestireno	$>10^{16}$	o	o	-	+
Kel-F	$>10^{18}$	+	o	-	o
Cerámica	$10^{14} - 10^{15}$	-	o	+	+
Nylon	$10^{13} - 10^{14}$	-	o	-	-
Fibra de vidrio Epoxi	10^{13}	-	o	-	-
PVC	$5 \cdot 10^{13}$	+	o	o	-

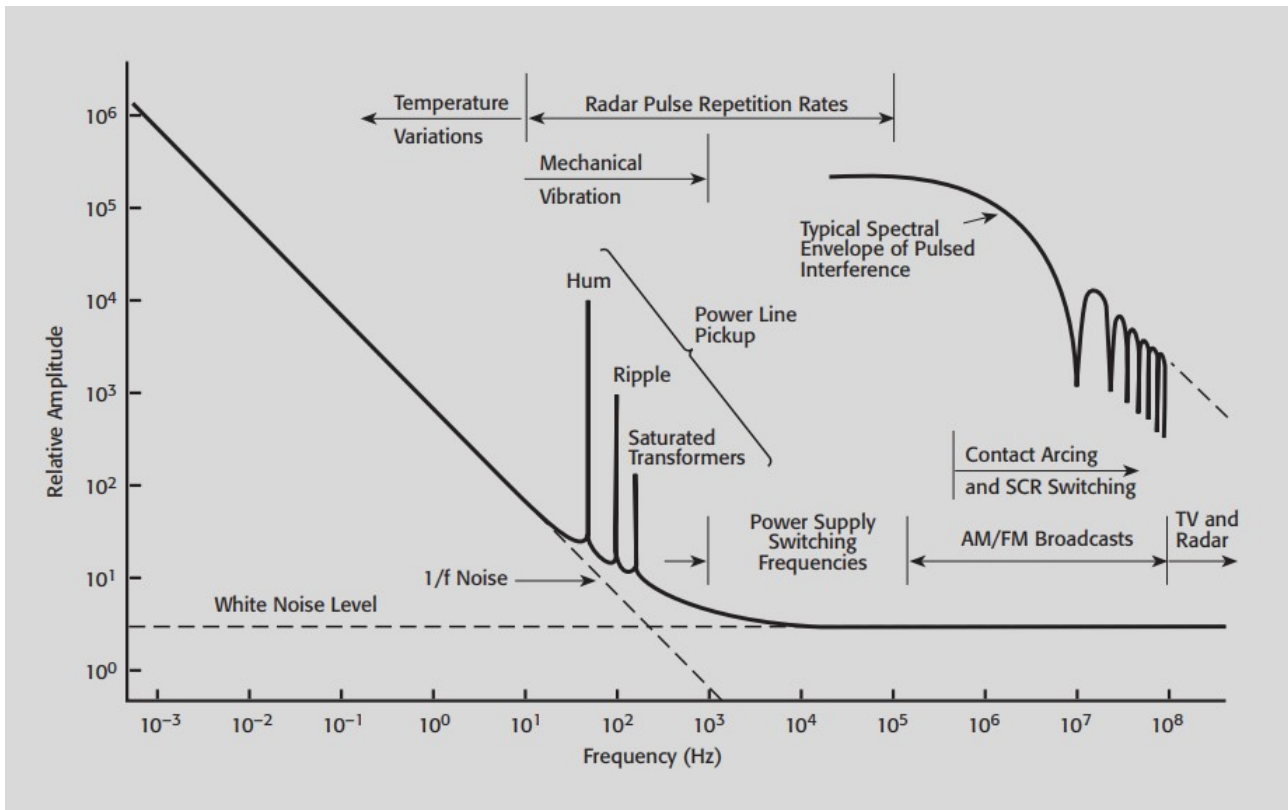


Figura 4.3: Espectro de frecuencias de voltajes de ruido.

Además de los errores posibles en las mediciones de bajas corrientes, existen también los errores asociados a las mediciones de bajas tensiones. A continuación se enumeran y describen algunos de ellos:

- Efecto termoeléctrico:** se refiere a la conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico y viceversa. Un dispositivo termoeléctrico crea un voltaje cuando hay una diferencia de temperatura a cada lado.

Si el voltaje termoeléctrico es constante se utiliza el método de corriente en ambas direcciones, de esa manera se tendrá como promedio el valor a medir. Siendo V_{EMF} el voltaje de ruido térmico, la Figura 4.4 muestra el método recientemente mencionado.

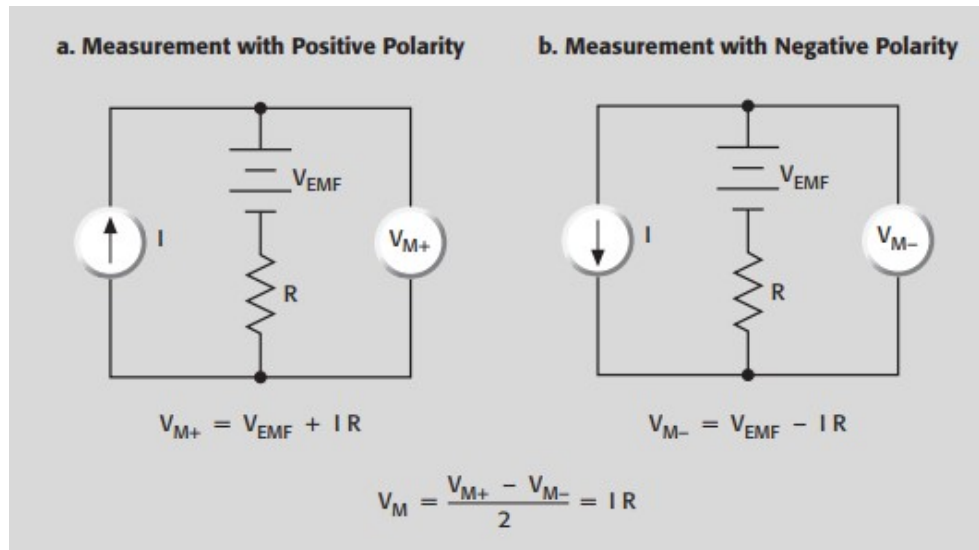


Figura 4.4: Método de corriente en ambas direcciones para identificar el voltaje de ruido térmico.

Si el ruido no es constante se puede usar el método delta (cuando depende de la polaridad), el cual se esquematiza en la Figura 4.5. Vale decir, se toman voltajes $V_{M1} = V_1 + V_{EMF}$, $V_{M2} = V_2 + V_{EMF} + \delta V$ y $V_{M3} = V_3 + V_{EMF} + 2\delta V$.

Para medir dos fuentes se toman, respectivamente:

$$V_A = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2} \quad (4.4)$$

$$V_B = \frac{V_{M3} - V_{M2}}{2} \quad (4.5)$$

Finalmente se tiene que:

$$V = \frac{V_A - V_B}{2} \quad (4.6)$$

Otra alternativa al primer método es el método de medición compensada con apagado, este se esquematiza en la Figura 4.6

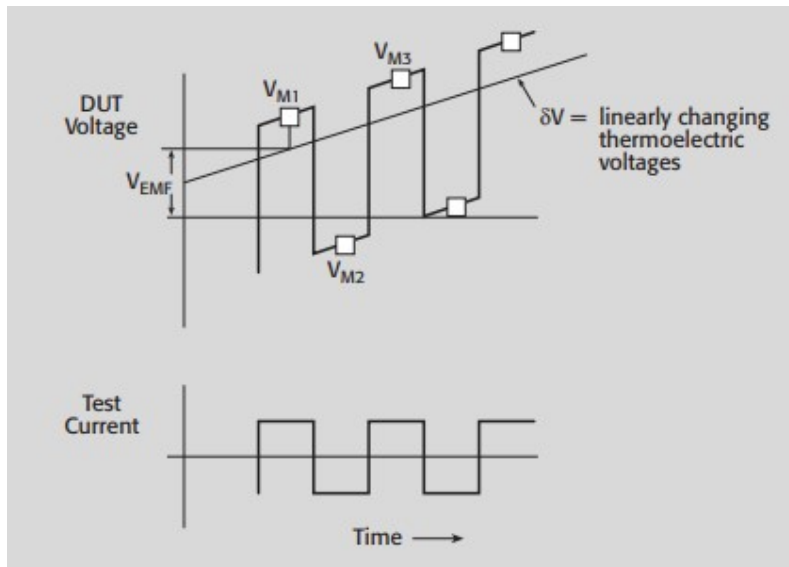


Figura 4.5: Esquematización del método delta.

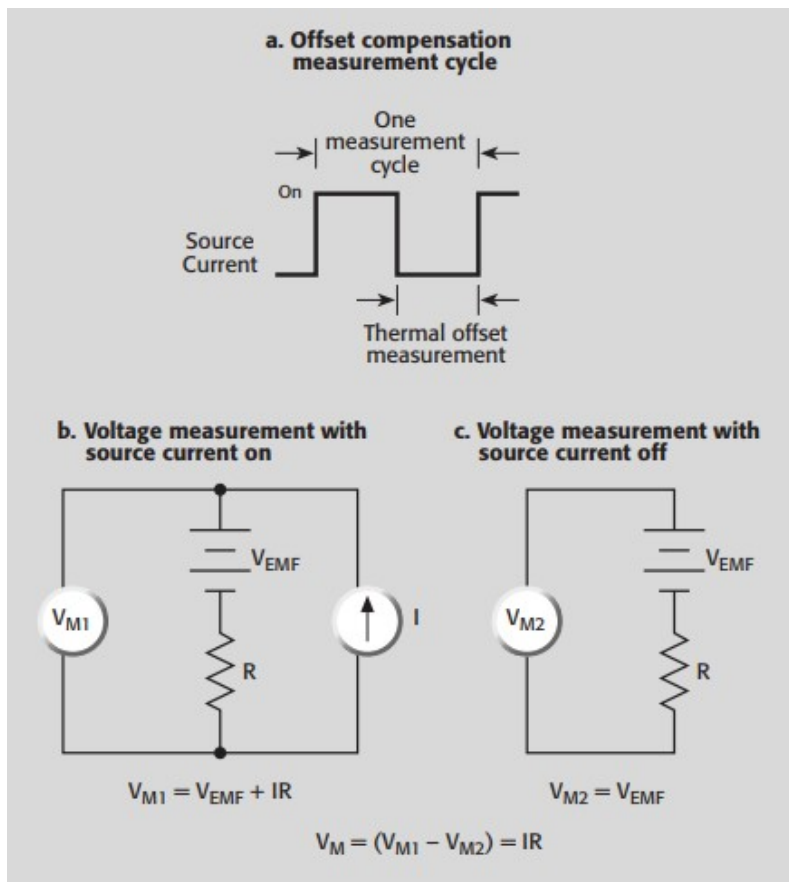


Figura 4.6: Esquematización del método de medición compensada con apagado.

- **Campo magnético:** si recordamos que los campos magnéticos son capaces de inducir una diferencia de potencial dada por la fórmula:

$$V_B = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d(\vec{B}A)}{dt} = \vec{B} \frac{dA}{dt} + A \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (4.7)$$

Entonces, podemos reducir esta tensión inducida alejando las fuentes y circuitos por los cuales circula corriente del objeto de medición. También podemos reducir el área de los loops como indica la Figura 4.7 y usar materiales aislantes magnéticos.

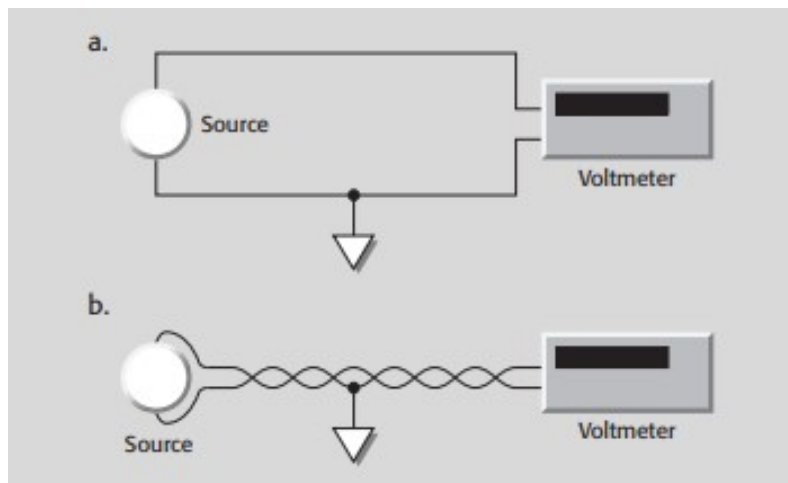


Figura 4.7: Esquemmatización de cómo reducir el área de los loops.

- **Circuitos o lazos de tierra:** al conectar todos los cables tierra a un mismo punto se producen loops, que pueden producir muy pequeñas diferencias de potencial que inducen corrientes (Ley de Ohm). Para evitar esto se recomienda conectar diferentes tierras.
- **Capacidades parásitas:** Al existir separaciones entre conductores con materiales dieléctricos de por medio se generan diferencias de potencial dadas por la fórmula:

$$V_C = \int C dq \quad (4.8)$$

Donde la capacitancia C va a depender de la separación entre los conductores, su área y la permitividad del dieléctrico entre ellos.

4.3. Medición de resistencias bajas

La medición de una resistencia incluye siempre la medición de una corriente y una diferencia de potencial. Por este motivo se puede contar siempre con las fuentes de error enumeradas anteriormente, más algunas adicionales. La circulación de la corriente eléctrica en un conductor genera siempre un efecto natural de calentamiento. Sin embargo, cuando existen puntos de contacto a presión o contactos

deslizables, el efecto de calentamiento se puede volver crítico debido a posibles puntos de alta resistencia (falsos contactos) que pueden elevar la temperatura varios cientos de grados Celsius.

Se define una resistencia de contacto como la resistencia al flujo de corriente en las conexiones eléctricas debido a las condiciones superficiales en la unión o superficie de contacto, lo que puede conducir a una pobre o mala conexión si es demasiado alta, provocando diversos problemas en el circuito. Debido a su origen físico (descrito en el párrafo anterior) y a su definición misma, es siempre reproducible en un montaje, debido a que corresponde a un error de instrumentación e implementación.

La resistencia medida por un multímetro es la suma de las resistencias de cableado y la resistencia incógnita (véase Figura 4.8). Cuando se trata de resistencias grandes comparado a las resistencias de cableado (superiores a 100Ω), esta desviación es pequeña, por lo que el valor medido será cercano al valor de la resistencia. Por otra parte, para resistencias comparables a las resistencias de los cables y los contactos, el valor medido será lejano al valor de la resistencia, por lo que este método pierde exactitud.

Además, cuando se trata de resistencias pequeñas, se debe tener en cuenta los efectos de los potenciales de contacto que pueden estar presentes por conectar dos metales distintos. Estos potenciales pueden variar tanto con la diferencia de temperatura entre los metales como con la polaridad de la fuente.

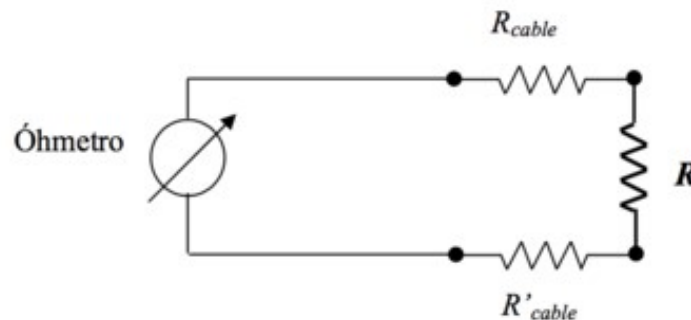


Figura 4.8: Esquema del circuito que se forma al medir una resistencia con un multímetro.

La siguiente tabla muestra el error en porcentaje para diferentes valores de la resistencia de interés.

Tabla 4.4: Error asociado a la medición de resistencias con un multímetro o tester.

R_x [Ω]	R_x medido por el tester [Ω]	Error [%]
10k	10 000.08	0.008
1k	1 000.08	0.08
10	10.08	0.8
1	1.08	8
100m	180m	80
10m	90m	800
1m	81m	8 000
100 μ	80.1m	80 000

A modo de reducir todos los errores ya mencionados asociados a las mediciones de bajas tensiones y corrientes, se introduce a continuación el método de medición por cuatro contactos.

El método de medición a cuatro puntas hace uso de dos circuitos vinculados alimentados por una fuente de corriente continua: uno por el cual circula corriente proveniente de la fuente medida con un amperímetro (circuito exterior en la Figura 4.9), y otro en paralelo a la resistencia incógnita, que contiene un voltímetro (circuito interior en el esquema). Como los voltímetros poseen una resistencia interna muy grande (usualmente, del orden de los 10 MΩ), prácticamente no circula corriente por el circuito interno. Además, la resistencia de los cables uniendo los circuitos es baja, por lo que la caída de tensión sobre estos es despreciable. Entonces, se tiene una medición:

$$V^+ = \varepsilon_A + I^+ R - \varepsilon_B \quad (4.9)$$

Donde ε_A y ε_B representan los potenciales de contacto, y el superíndice (+) indica la polaridad de la fuente en esta primera medición de corriente y tensión. Si invertimos la polaridad de la fuente, identificando la corriente y tensión medidas en este caso con superíndice (-), medimos entonces:

$$V^- = -\varepsilon_A + I^- R + \varepsilon_B \quad (4.10)$$

Sumando las ecuaciones (4.9) y (4.10) se obtiene que:

$$V^+ + V^- = (I^- + I^+) R \implies R = \frac{V^+ + V^-}{I^- + I^+} \quad (4.11)$$

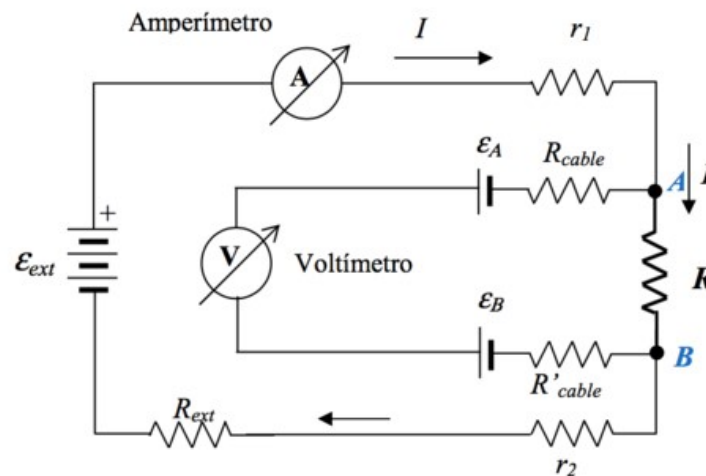


Figura 4.9: Esquema del circuito utilizado en el método de medición por cuatro contactos.

De esta manera, el método de medición a cuatro puntas permite medir resistencias pequeñas, ya que elimina la contribución de las resistencias de cableado en la medición y de los potenciales de contacto. Además, es conveniente utilizar una fuente que regule la corriente de alimentación del circuito, manteniendo una dada tensión entre sus extremos, y fijando un límite para la corriente alimentada. Esto permitirá limitar la potencia disipada por el circuito a los límites permitidos por los instrumentos y elementos mediante la corriente máxima de alimentación y R_{ext} , y al mismo tiempo trabajar con una tensión constante sobre el circuito.

En cuanto a la medición de resistividades, tenemos la siguiente ecuación genérica:

$$\rho = \frac{S}{l} R \quad (4.12)$$

Por lo que, si consideramos un cable cilíndrico de diámetro d y largo l , en conjunto con la resistencia medida con utilizando el método (ecuación (4.11)), se tiene que:

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4l} \left(\frac{V^+ + V^-}{I^- + I^+} \right) \quad (4.13)$$

Cabe destacar que esto es válido solo cuando se trata de cables de metales conductores con baja resistencia, como el cobre. Además, es relevante la geometría de la muestra en cuanto a su largo y su diámetro, ya que si dichos parámetros son muy pequeños se tiene una incertidumbre de medición grande, por lo tanto, limitaría la exactitud del cálculo.

Además de este método, existe un segundo que es conveniente para medir bajas resistencias, el cual se denomina método de Van der Paw. Esta es una técnica usada para medir exactamente las propiedades de una muestra de cualquier forma arbitraria, mientras la muestra cumpla con ciertas propiedades (véase Figura 4.10):

- Debe tener una forma plana de grueso uniforme (aproximadamente bidimensional).
- No debe tener ningún agujero aislado.
- Debe ser homogénea e isotrópica.
- Los cuatro contactos deben estar localizados en los extremos de la muestra y ser pequeños, considerando que cualquier error dado por su tamaño estará en el orden de d/l , siendo la razón entre el diámetro promedio del contacto y la distancia entre ellos.
- El área de contacto de un contacto individual debe tener al menos un orden de magnitud menor que el área de la muestra.

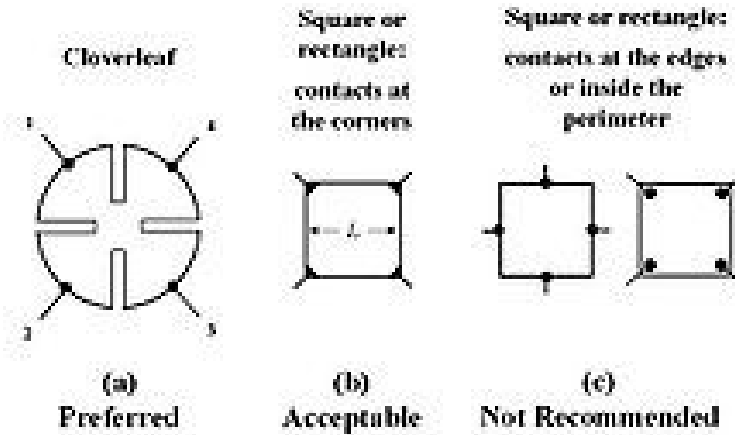


Figura 4.10: Ejemplos de diferentes calidades de muestras para el método de Van der Pauw.

El procedimiento es el siguiente (véase Figura 4.11):

Se mide el voltaje V_{34} que corresponde a un voltaje de corriente directa medida entre los contactos 3 y 4. Haciendo pasar corriente entre los contactos 1 y 2, se define:

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (4.14)$$

A continuación, se mide la tensión entre 1 y 4, haciendo pasar la corriente entre 2 y 3. Siguiendo la misma lógica, se define:

$$R_{23,14} = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (4.15)$$

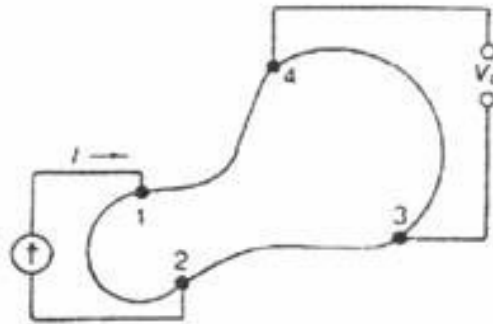


Figura 4.11: Esquema para el método de Van der Paw.

Finalmente, el método de Van der Paw dice que la resistividad vendrá dada por:

$$\rho \approx \frac{\pi d}{\ln(2)} \left(\frac{R_{12,34} + R_{23,14}}{2} \right) \gamma \quad (4.16)$$

Esto en base a la ecuación propuesta por Van der Paw:

$$\exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{12,34}\right) + \exp\left(-\frac{\pi d}{\rho} R_{23,14}\right) = 1 \quad (4.17)$$

Donde d corresponde al grosor de la muestra y el factor γ viene dado por la relación:

$$\cosh \left\{ \frac{\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,14}} \right) - 1}{\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,14}} \right) + 1} \frac{\ln(2)}{\gamma} \right\} = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{\ln(2)}{\gamma}\right) \quad (4.18)$$

Para facilitar el cálculo se adjunta un gráfico que relaciona diferentes valores de γ y el cociente de las resistencias.

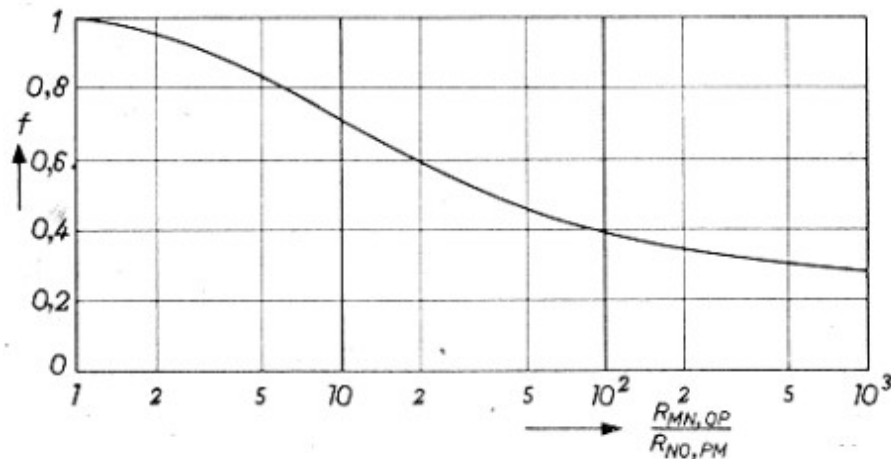


Figura 4.12: Parámetro γ en relación al cociente de las resistencias del método de Van der Paw.

4.4. Vocabulario

A continuación se enumeran y describen diversos instrumentos de medición de parámetros de un circuito eléctrico.

- **DMM o Multímetro digital (tester):**

Los multímetros digitales varían ampliamente en rendimiento, desde unidades portátiles de bajo costo hasta DMM de sistemas de alta precisión. Si bien hay muchos modelos disponibles de una amplia variedad de fabricantes, los enfoques no teóricos de las mediciones se realizan en niveles muy alejados de los límites teóricos, y los DMM están diseñados para cumplir con estas necesidades de medición más convencionales.

Aunque las mediciones de bajo nivel son, por definición, aquellas que están cerca de los límites teóricos (véase Figura 4.14), y por lo tanto están fuera del rango de los DMM, los avances en la tecnología están reduciendo la brecha entre los DMM y los instrumentos dedicados de bajo nivel. Por ejemplo, los DMM más sensibles pueden detectar tensiones CC de hasta 10 [nV], resolver corrientes CC de hasta 10 [pA] y medir resistencias de hasta 1 GΩ. La diferencia con los instrumentos de alta sensibilidad, como el electrómetro, es solo una cuestión de grado; cuando se realizan mediciones cercanas a los límites teóricos, todas las consideraciones de medición son vitalmente importantes. Cuando se miden niveles muy alejados de los límites teóricos, solo unas pocas consideraciones básicas (exactitud, carga, etc.) son generalmente preocupantes.



Figura 4.13: Modelo estándar de un tester.

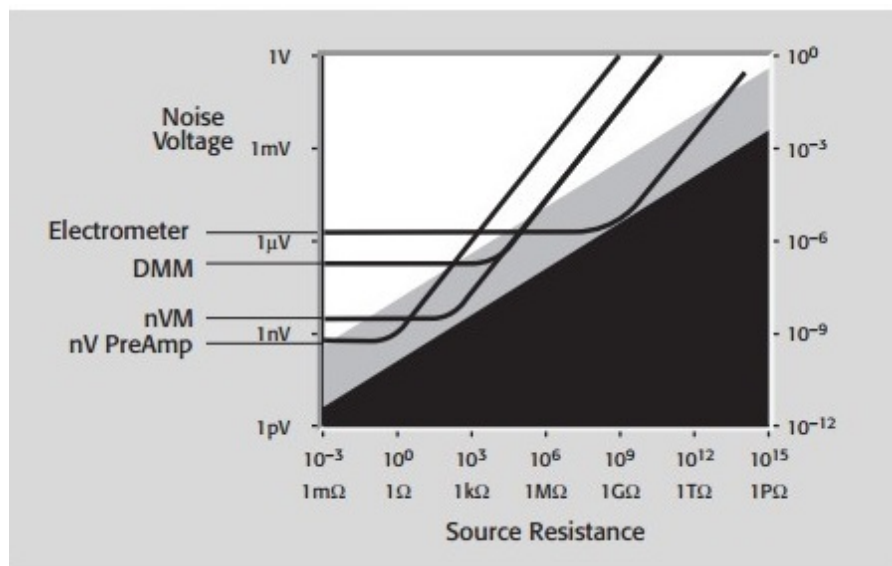


Figura 4.14: Límites de medición para distintos instrumentos asociados a parámetros de un circuito eléctrico.

■ Nanovoltímetro:

Un nanovoltímetro es un medidor de voltaje muy sensible. Este tipo de instrumento está optimizado para proporcionar mediciones de voltaje cercanas a los límites teóricos de bajas resistencias de fuente, en contraste con el electrómetro, que está optimizado para usarse con altas resistencias de fuente. En comparación con un electrómetro, el ruido y la deriva (cambio en el voltaje de salida, generalmente expresado como un porcentaje del voltaje de salida, durante un período de tiempo) del voltaje son mucho más bajos. La resistencia de entrada es generalmente similar a la de un DMM y es mucho más baja que la de un electrómetro.

Como es el caso de los electrómetros, los nanovoltímetros son tan confiables y fáciles de operar como los multímetros digitales. Su característica distintiva es su sensibilidad al voltaje, que puede

ser tan buena como 1 pV .



Figura 4.15: Modelo estándar de un nanovoltímetro.

■ **Electrómetro:**

Un electrómetro es un multímetro de corriente continua altamente refinado. Las características de entrada especiales de un electrómetro y su alta sensibilidad le permiten realizar mediciones de voltaje, corriente, resistencia y carga mucho más allá de las capacidades de un DMM convencional.

Se debe usar un electrómetro cuando exista cualquiera de las siguientes condiciones:

1. La tarea requiere un rango de medición extendido que no está disponible con instrumentos convencionales, como para detectar o medir:
 - Corrientes menores a 10 nA .
 - Resistencias superiores a $1 \text{ G}\Omega$.
2. La carga del circuito debe ser minimizada, como cuando:
 - La medición del voltaje de una fuente tiene una resistencia de $100 \text{ M}\Omega$ o superior.
 - Medición de la corriente cuando se requiere una caída de voltaje de entrada (carga) de menos de unos cientos de milivoltios (cuando se miden corrientes de fuentes de unos pocos voltios o menos).
3. Se requiere medición de carga.
4. Medición de señales en o cerca de las limitaciones de ruido de Johnson (Figura 4.16).

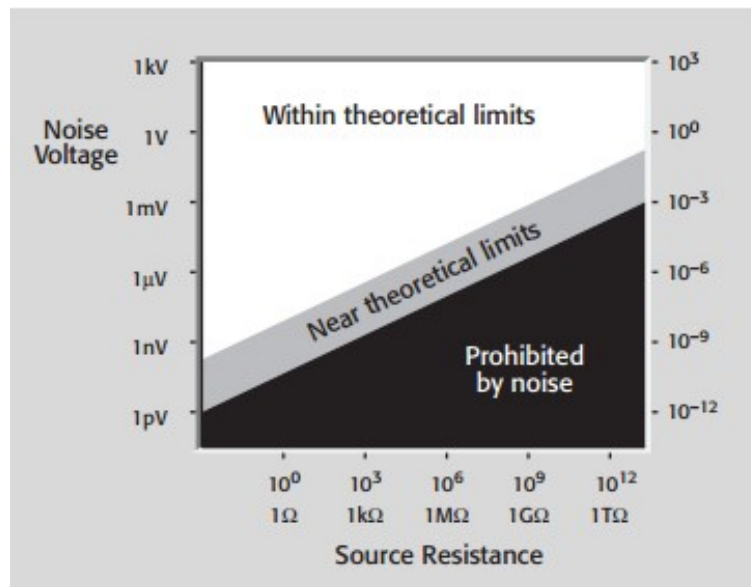


Figura 4.16: Límites teóricos para la medida de resistencias.

Sus funciones se encasillan en:

- **Voltímetro:** la resistencia de entrada de un voltímetro de electrómetro es extremadamente alta, típicamente superior a $100 [T\Omega]$. Además, la corriente de compensación de entrada es menor que $3 [fA]$. Estas características describen un dispositivo que puede medir el voltaje con una cantidad muy pequeña de carga de circuito. Debido a la alta resistencia de entrada y la baja corriente de compensación, el voltímetro del electrómetro tiene un mínimo efecto en el circuito que se está midiendo. Como resultado, el electrómetro se puede usar para medir el voltaje en situaciones donde un multímetro ordinario sería inutilizable. Por ejemplo, el electrómetro puede medir el voltaje en un capacitor de $500 [pF]$ sin una importante descarga del dispositivo; también puede medir el potencial de los cristales piezoeléctricos y los electrodos de pH de alta impedancia.
- **Amperímetro:** como amperímetro, el electrómetro es capaz de medir corrientes extremadamente bajas, limitadas solo por límites teóricos o por la corriente de compensación de entrada del instrumento. También tiene una carga de voltaje mucho menor que el DMM convencional. Con su corriente de desplazamiento de entrada extremadamente baja y carga de voltaje de entrada mínima, puede detectar corrientes tan bajas como $1 [fA]$. Debido a esta alta sensibilidad, es adecuado para medir la salida de corriente de los fotomultiplicadores y las cámaras de iones, así como las corrientes muy bajas en semiconductores, espectrómetros de masas y otros dispositivos.
- **Óhmetro:** un electrómetro puede medir la resistencia utilizando un método de corriente constante o de voltaje constante. Si se usa el método de corriente constante, la alta resistencia de entrada del electrómetro y la baja corriente de compensación permiten mediciones de hasta $200 [G\Omega]$. Cuando se usa el método de voltaje constante, el electrómetro aplica un voltaje constante a la resistencia desconocida, mide la corriente y luego calcula la resistencia. Este es el método preferido porque permite que la resistencia desconocida sea probada

a un voltaje conocido. Un electrómetro puede medir resistencias de hasta $10 [P\Omega]$ utilizando este método.

- **Culombímetro:** el culombímetro del electrómetro puede detectar una carga tan baja como $10 [fC]$. Es equivalente a un integrador activo y, por lo tanto, tiene una baja carga de voltaje, típicamente menos de $100 [\mu V]$. La función del culombímetro puede medir corrientes más bajas que las que puede tener la función del amperímetro, ya que no hay ruido aportado por las resistencias internas. Se pueden detectar corrientes tan bajas como $1 [fA]$ usando esta función.



Figura 4.17: Modelo estándar de un electrómetro.

■ **Picoamperímetro:**

Un picoamperímetro es un amperímetro construido a lo largo de las líneas de la función de un amperímetro de un electrómetro. Cuando se compara con un electrómetro, un picoamperímetro tiene una carga similar de baja tensión, velocidad similar o más rápida, menos sensibilidad y un precio más bajo. También puede tener características especiales, como una respuesta logarítmica de alta velocidad o una fuente de voltaje incorporada.

Un picoamperímetro mide una corriente eléctrica muy baja, generalmente desde el rango de $[pA]$ en el extremo inferior hasta el rango de $[mA]$ en el extremo superior.

■ **Lock-in Amplifier (amplificador anclado a la fase):**

Un amplificador de bloqueo es un tipo de amplificador que puede extraer una señal con una onda portadora conocida de un entorno extremadamente ruidoso. Las señales hasta 1 millón de veces más pequeñas que los componentes de ruido, potencialmente bastante cerca en frecuencia, aún pueden detectarse de manera confiable. Es esencialmente un detector homodino (método para extraer información codificada como modulación de la fase y/o frecuencia de una señal oscilante, comparando esa señal con una oscilación de referencia que sería idéntica a la señal si llevara información nula; esta señal es generada por el propio amplificador o proporcionada a este y al experimento por una fuente externa) seguido de un filtro pasa bajo que a menudo es ajustable en frecuencia de corte y orden de filtro. Por lo general, se utiliza una demodulación de doble fase. Esto permite la extracción del componente en cuadratura y en fase que luego puede transferirse a coordenadas polares, es decir, amplitud y fase, o procesarse adicionalmente como parte real e imaginaria de un número complejo.

El dispositivo se usa a menudo para medir el desplazamiento de fase, incluso cuando las señales son grandes y tienen una alta relación señal/ruido y no necesitan más mejoras. La recuperación de señales a bajas relaciones señal/ruido requiere una señal de referencia limpia y fuerte con la misma frecuencia que la señal recibida. Este no es el caso en muchos experimentos, por lo que el instrumento puede recuperar señales enterradas en el ruido solo en un conjunto limitado de circunstancias.

El funcionamiento de un amplificador de bloqueo se basa en la ortogonalidad de las funciones sinusoidales. Específicamente, cuando una función sinusoidal de frecuencia f_1 se multiplica por otra función sinusoidal de frecuencia f_2 no igual a f_1 e integrada durante un tiempo mucho más prolongado que el período de las dos funciones, el resultado es cero. En cambio, cuando f_1 es igual a f_2 y las dos funciones están en fase, el valor promedio es igual a la mitad del producto de las amplitudes.

En esencia, un amplificador de enclavamiento toma la señal de entrada, la multiplica por la señal de referencia (proporcionada por el oscilador interno o una fuente externa) y la integra durante un tiempo específico, generalmente del orden de milisegundos a unos pocos segundos. La señal resultante es una señal de CC, donde la contribución de cualquier señal que no está en la misma frecuencia que la señal de referencia se atenúa cerca de cero. El componente fuera de fase de la señal que tiene la misma frecuencia que la señal de referencia también se atenúa (porque las funciones sinusoidales son ortogonales a las funciones del coseno de la misma frecuencia), lo que hace que se establezca un detector sensible a la fase.

Para una señal de referencia de seno y una onda de entrada $U_{in}(t)$, la señal de salida de CC $U_{out}(t)$ se puede calcular para un amplificador de bloqueo analógico como:

$$U_{out}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \text{sen}(2\pi f_{ref} \cdot s + \varphi) U_{in}(s) ds \quad (4.19)$$

Donde φ es una fase que se puede configurar en el bloqueo (establecido en cero por defecto) y f_{ref} la frecuencia de referencia.

Si el tiempo promedio T es lo suficientemente grande (por ejemplo, mucho más grande que el período de la señal) para suprimir todas las partes no deseadas como el ruido y las variaciones al doble de la frecuencia de referencia, la salida es:

$$U_{out} = \frac{1}{2} V_{sig} \cos(\theta) \quad (4.20)$$

Donde V_{sig} es la amplitud de la señal en la frecuencia de referencia, y θ es la diferencia de fase entre la señal y la referencia.

Muchas aplicaciones del amplificador de bloqueo solo requieren recuperar la amplitud de la señal en lugar de la fase relativa a la señal de referencia. Para un simple amplificador de bloqueo monofásico, la diferencia de fase se ajusta (normalmente de forma manual) a cero para obtener la señal completa.

Los amplificadores de enclavamiento bifásicos más avanzados tienen un segundo detector, que realiza el mismo cálculo que antes, pero con un cambio de fase adicional de 90° . Por lo tanto, uno tiene dos salidas: $X = V_{sig} \cos(\theta)$ se denomina componente "en fase" e $Y = V_{sig} \sin(\theta)$ el componente "cuadratura". Estas dos cantidades representan la señal como un vector relativo al

oscilador de referencia de bloqueo. Al calcular la magnitud R del vector de señal, se elimina la dependencia de fase:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = V_{sig} \quad (4.21)$$

Luego, la fase puede ser calculada como:

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (4.22)$$

En la Figura 4.18 se ve cómo la señal de entrada se multiplica por la señal de referencia y una versión de 90° de fase desplazada de la señal de referencia. Las salidas del mezclador se filtran en pasa bajo para rechazar el ruido y el componente 2ω , y finalmente se convierten en coordenadas polares.

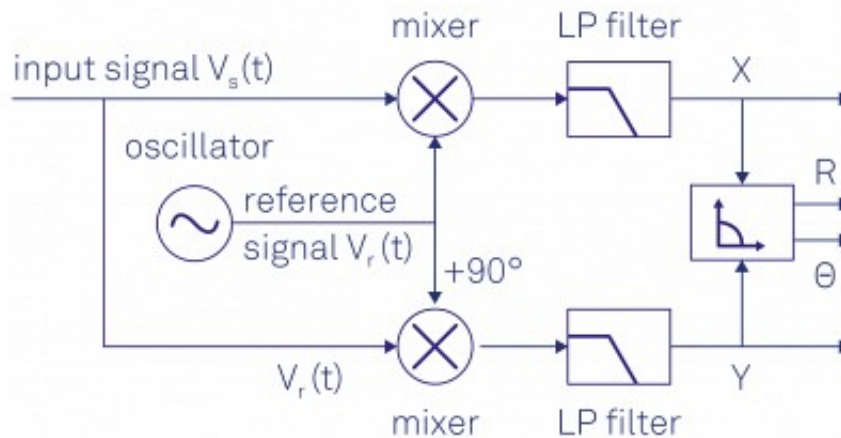


Figura 4.18: Esquema del funcionamiento del Lock-in Amplifier.

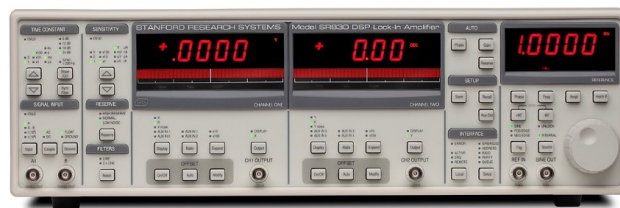


Figura 4.19: Modelo estándar de un Lock-in Amplifier.

4.5. Metodología

El experimento consiste en medir la resistencia eléctrica y resistividad de la película evaporada en la actividad de la unidad anterior.

Los pasos a seguir son:

1. Adherir los contactos eléctricos sobre la película en las posiciones consecuentes con el método de cuatro contactos.
2. Desprender la aislación adherida al cable en los extremos (sin rasparlo: usar el cautín para fundir un pedazo de aspirina. Esta masa fundida elimina la aislación. NO RESPIRAR los gases emitidos).
3. Asegurarse con el multímetro de que hay continuidad. Usar un alambre fino.
4. Adherir los contactos usando pintura conductora. Cerrar bien el frasco de pintura luego de utilizar.
5. Dejar secar y afirmar los alambres en un punto de apoyo (la pintura provee de un contacto mecánicamente débil).
6. Asegurarse nuevamente de que los contactos están en buenas condiciones.
7. Ya realizado el montaje, se procede a generar un voltaje con la fuente y se miden sus valores en la resistencia auxiliar y la placa evaporada.
8. A partir de los valores del voltaje en la resistencia auxiliar y su valor ($1k\Omega$) se calculan las distintas corrientes para cada polaridad.
9. Se utiliza la fórmula (4.11) para calcular el valor de la resistencia de la placa evaporada.

El circuito a utilizar es el de la siguiente figura (compárese con el de la Figura 4.9):

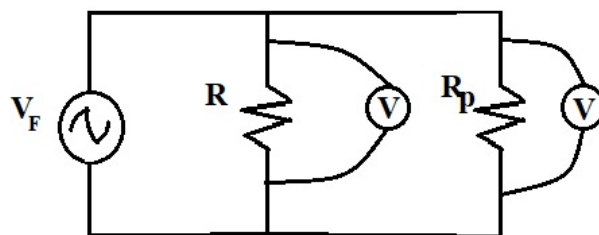


Figura 4.20: Esquem simplificado del circuito utilizado.

4.6. Resultados

Los resultados obtenidos al utilizar el método de cuatro contactos fueron los siguientes:

Tabla 4.5: Voltjes y sus polaridades para distintos valores entregados por la fuente.

$V_F[V]$	$V_R^+[V]$	$V_R^-[V]$	$V_p^+[V]$	$V_p^-[V]$	$I^+[A]$	$I^-[A]$
1	0.85	0.7	0.17	0.13	0.8m	0.7m
2	1.59	1.54	0.32	0.29	1.6m	1.5m
3	2.35	2.26	0.46	0.44	2.4m	2.3m
4	3.09	3.03	0.6	0.58	3.1m	3.0m
5	3.89	3.75	0.74	0.72	3.9m	3.7m
6	4.58	4.55	0.88	0.88	4.6m	4.6m
7	5.35	5.17	1.03	1.0	5.3m	5.2m
8	6.02	5.95	1.17	1.15	6.0m	6.0m
9	6.71	6.69	1.3	1.3	6.7m	6.7m
10	7.53	7.53	1.45	1.46	7.5m	7.5m

Luego de aplicar la fórmula de la ecuación (4.11) se tienen los siguientes resultados:

Tabla 4.6: Resistencia en la placa de tungsteno evaporada.

$V_F[V]$	$R_P[\Omega]$
1	193.5484
2	194.8882
3	195.2278
4	192.8105
5	191.0995
6	192.7711
7	192.9658
8	193.8179
9	194.0299
10	193.2271

El promedio de estas medidas es $\bar{R}_P = 193,44[\Omega]$, cuya característica I-V se aprecia en el gráfico de la Figura 4.21.

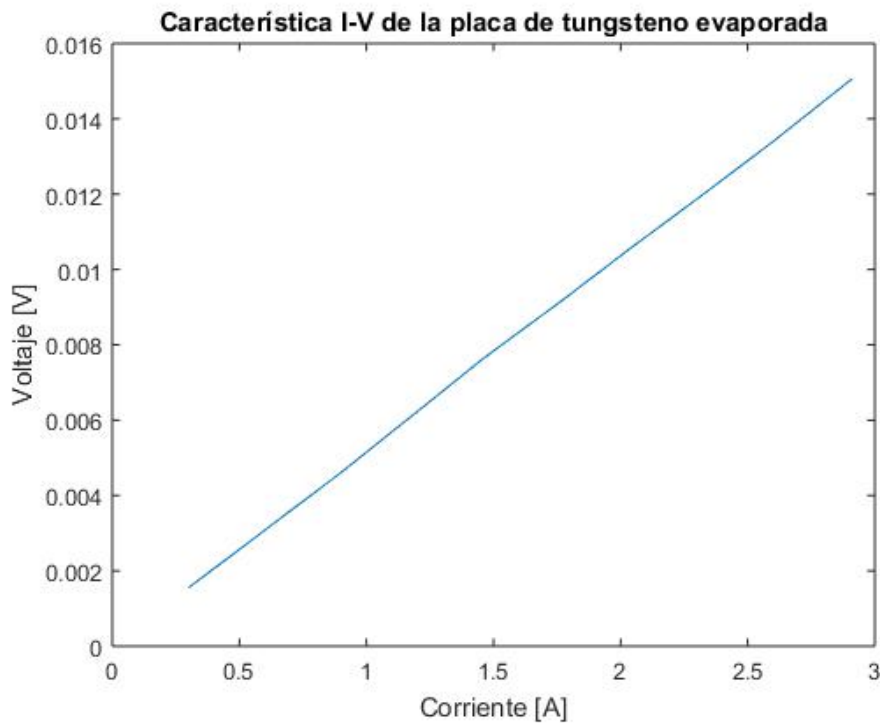


Figura 4.21: Característica I-V de la placa de tungsteno evaporada.

4.7. Conclusiones

La resistencia medida para la placa de tungsteno evaporada entra en el rango de resistencias pequeñas, o, por lo menos, dentro del rango en el cual el error arrojado por un instrumento convencional (como un tester) hubiese sido de orden 0 porcentualmente hablando.

Queda implícito que es posible que el valor difiera del real, esto debido a todos los errores que se mencionaron en la presente unidad. Se hacen relevantes para esta instancia las resistencias de contacto y los efectos por gases adsorbidos.

Aun así, si se observa la Tabla 4.6 y la Figura 4.21 se puede apreciar que el valor obtenido es casi constante, siendo muy pequeño el error.

UNIDAD 5

Tratamiento de Imágenes

5.1. SEGURIDAD

Al trabajar con sustancias químicas se hace indispensable tener una noción de con qué estamos trabajando en términos de seguridad, de manera de salvaguardar a quien esté manipulándola y al ecosistema más cercano a estos. Una ficha de datos de seguridad (FDS, o MSDS por sus siglas en inglés) es un documento que indica las particularidades y propiedades de una determinada sustancia para su uso más adecuado. Las fichas tienen como principal objetivo proteger la integridad física del operador durante la manipulación de la sustancia, por esto contiene instrucciones detalladas para su manejo, persiguiendo reducir los riesgos laborales y medioambientales.

A continuación se disponen de las categorías de una ficha de datos de seguridad estándar de la compañía estadounidense TSI Incorporated:

1. Identificación de la sustancia o mezcla y de la empresa que lo provee.
2. Identificación de los peligros.
3. Composición e información sobre los ingredientes.
4. Medidas de primeros auxilios.
5. Medidas de lucha contra incendio.
6. Medidas de liberación accidental.
7. Manipulación y almacenamiento.
8. Control de exposición y cuidado personal.
9. Propiedades físicas y químicas.
10. Estabilidad y reactividad.
11. Información de toxicidad.
12. Información ecológica.
13. Consideraciones de desecho.
14. Información de transporte.
15. Información reglamentaria.
16. Consideraciones adicionales.

Cabe destacar que el formato de estas fichas puede variar dependiendo de su fabricante o según las legislaciones de los diferentes países. Por lo demás, se disponen de cuatro hipervínculos en la sección de Anexos que dan acceso a las FDS de las sustancias a ser utilizadas en el laboratorio.

Estas sustancias son el etilenglicol, isopropanol, PDMS (polidimetilsiloxano) y agua. La tabla 5.1 da detalle de las gravedades específicas de estos compuestos, los cuales se pueden encontrar en la categoría "Propiedades físicas y químicas" de sus respectivas FDS.

Tabla 5.1: Gravedades específicas a 20°C para los compuestos a ser manipulados en el laboratorio.

Sustancia	Gravedad específica a 20°C
Etilenglicol	1.10
Isopropanol	0.79
PDMS	0.965
Agua	1.0

Además, con el propósito de reducir el riesgo de contacto en el uso de estas sustancias, se presentan a continuación los requisitos de protección personal descritos en las FDS de cada compuesto:

- **Etilenglicol:** se recomienda que exista ventilación local y general en el lugar de trabajo para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional (dosis letal en humanos de 100 ml). Debe disponerse de duchas y estaciones lavaojos. El equipo de protección personal debe incluir gafas protectoras contra productos, guantes protectores de caucho y ropa limpia para cubrir el cuerpo, respirador con filtro para vapores orgánicos. En caso de emergencia disponer de un equipo de respiración autónomo (SCBA) y ropa de protección total.
- **Isopropanol:** se debe contar con una buena ventilación. Se debe usar un respirador autofiltrante para partículas si se exceden los límites de exposición o se experimentan síntomas. Es necesario usar gafas protectoras y guantes químicamente resistentes. Además, se recomienda que haya disponible un lavaojos y una ducha de seguridad en el área de trabajo inmediata.
- **PDMS:** se requiere de instalaciones para el lavado de ojos y ducha de emergencia disponibles cuando se maneja este producto. La ventilación y otras formas de controles de ingeniería se prefieren para controlar las exposiciones. La protección respiratoria y los respiradores con suministro de aire pueden ser necesarios para situaciones no rutinarias o de emergencia. Si se exceden los límites de exposición o si se experimenta irritación respiratoria se debe usar protección aprobada por NIOSH/MSHA. Se recomienda el uso de guantes resistentes a químicos, gafas de seguridad con protección lateral y ropa protectora adecuada; protección para los ojos y la cara en general.
- **Agua:** la única recomendación es llevar gafas de protección contra salpicaduras. Protección de manos, respiratoria o de exposición no son necesarias.

Además, es de suma importancia mantener alejados estos productos de cualquier alimento o bebida y lavar bien las manos, preferentemente con agua y jabón, después de la manipulación y antes de comer, beber o realizar actividades tales como fumar, entre otras.

Al hablar de la toxicidad de una sustancia se torna relevante identificar diferentes consecuencias que estas producen en un organismo al interactuar con él. Un agente teratógeno es toda sustancia química,

agente físico, agente infeccioso o estado carencial que es capaz de producir una alteración morfológica o funcional en el periodo postnatal (no necesariamente hereditaria en la descendencia) y que actúa durante el periodo embrionario o fetal. Por otro lado, el agente mutagénico es un agente físico, químico o biológico que altera o cambia la información genética (usualmente ADN) de un organismo y ello incrementa la frecuencia de mutaciones por encima del nivel natural.

El etilenglicol se considera un agente teratógeno, mas no cancerígeno. El isopropanol se considera mutagénico y teratógeno a una concentración entre el 98 % y 100 % inhalado, de hecho, sus efectos en el feto pueden llevar a la muerte fetal y, en cuanto a efectos reproductivos, se perciben anomalías específicas del desarrollo del sistema musculoesquelético. El PDMS no resulta teratógeno ni mutagénico, a pesar de considerarse levemente relacionado con el cáncer nasofaríngeo, el cáncer nasosinusal y la leucemia mieloide según la OSHA. El agua no encaja en alguna de estas dos clasificaciones.

Con el fin de disponer de más información de estas sustancias se adjuntan enlaces a sitios de descarga de las distintas FDS ya mencionadas.

Para el agua:

<https://www.carlroth.com/downloads/sdb/es/3/SDB3175ES.pdf> ;

para el etilenglicol:

<https://www.gtm.net/images/industrial/e/ETILENGLICOL.pdf> ;

para el PDMS:

<https://www.exdron.co.il/images/Products/files/Momentive-Element14-PDMS-350-E-5-Liter-MSDS.pdf>

y para el isopropanol:

<https://www.dorwil.com.ar/msds/Isopropanol.pdf> .

5.2. Tensión Superficial

Se denomina tensión superficial de un líquido a la cantidad de energía necesaria para aumentar su superficie por unidad de área. Esta se debe a que las fuerzas que afectan a cada molécula son diferentes en el interior del líquido y en la superficie. Así, en el interior de un líquido cada molécula está sometida a fuerzas de atracción que en promedio se anulan (véase Figura 5.1). Esto permite que la molécula tenga una energía bastante baja. Sin embargo, en la superficie hay una fuerza neta hacia el interior del líquido. Rigurosamente, si en el exterior del líquido se tiene un gas, existirá una mínima fuerza atractiva hacia el exterior, aunque en la realidad esta fuerza es despreciable debido a la gran diferencia de densidades entre el líquido y gas.

La tensión superficial, junto a las fuerzas que se dan entre los líquidos y las superficies sólidas que entran en contacto con ellos, da lugar a la capilaridad.

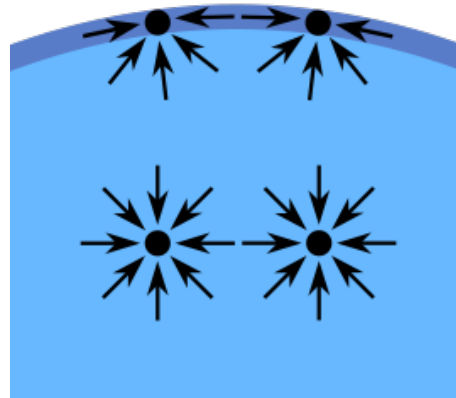


Figura 5.1: Diagrama de fuerzas entre moléculas de un líquido.

A continuación, se presenta la tabla 5.2, la cual dispone de valores de tensiones superficiales para distintos líquidos en contacto con el aire a temperatura ambiente.

Tabla 5.2: Tensiones superficiales de algunos líquidos en contacto con el aire a 20 °C.

Líquido	Tensión superficial [mN/m]
Etilenglicol	49.8
Isopropanol	20.53
PDMS	22.87
Agua	72.8
Benceno	28.9
Tetracloruro de carbono	26.8
Etanol	22.3
Mercurio	465.0
Aceite de oliva	32.0
Glicerina	63.1
Oxígeno	15.7
Neón	5.15
Helio	0.12

En base a los avances tecnológicos de cada época y a la precisión que se quiera conseguir al momento de realizar mediciones, existen diferentes métodos para medir la tensión superficial. En seguida se enumeran los más relevantes:

- **Medición por anillo de Du Noüy:**

El método del anillo de Du Noüy permite determinar la tensión superficial de un líquido a través de la fuerza requerida para retirar un anillo de platino-iridio de la superficie del líquido. El anillo se sumerge en el líquido y luego se lo hace ascender lentamente. A medida que el mismo sube,

se forma un menisco de líquido y la fuerza ejercida pasa por un máximo y luego disminuye, desprendiéndose el líquido del anillo y volviendo a su posición original. El cálculo de la tensión superficial se basa en medir esa fuerza máxima, en la cual el ángulo de contacto es cero. Esto se representa esquemáticamente en la Figura 5.2.

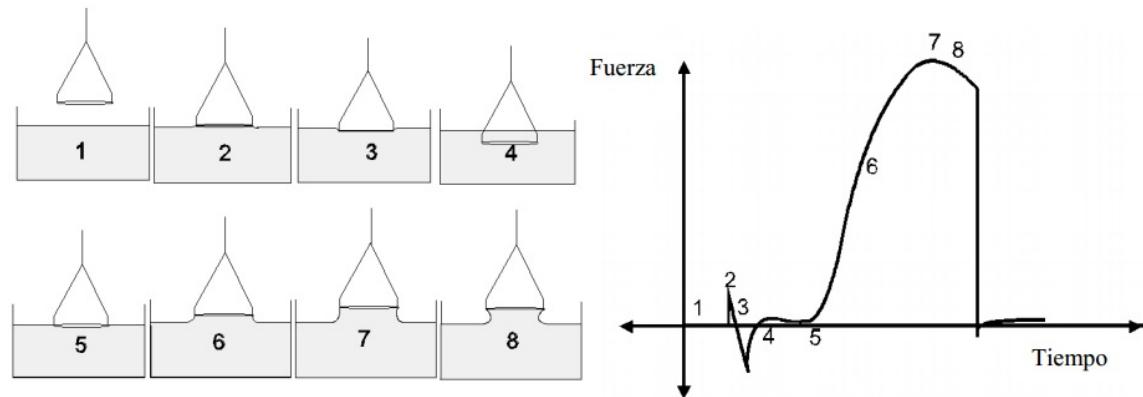


Figura 5.2: Esquema de los pasos que sigue el método del anillo de Du Noüy y representación de la fuerza estimada en relación al tiempo.

El tensiómetro de Du Noüy (Figura 5.3) consta de un fino alambre de torsión de acero asegurado en una grampa fuerte para resistir la tensión del acero en un extremo y una cabeza de torsión en el otro, que permite un ajuste fino. La cabeza de torsión tiene una escala y un vernier que permite la lectura a 0.1 mN/m y una estimación de 0.05 mN/m . La escala está graduada de cero a noventa. La posición cero de la balanza se alcanza cuando el brazo que lleva el anillo coincide con la línea horizontal grabada sobre un pequeño círculo de fondo blanco.

La plataforma que soporta el recipiente de líquido se puede elevar o bajar utilizando una grampa sobre un eje vertical. El ajuste fino de la plataforma se logra a través de un tornillo micrométrico.

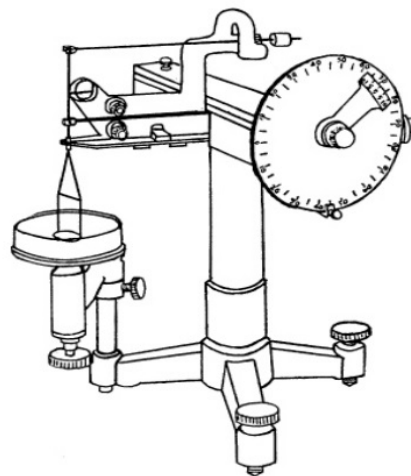


Figura 5.3: Representación gráfica del tensiómetro de Du Noüy.

Para efectuar la determinación de tensión superficial con el tensiómetro de Du Noüy, el líquido por determinar se coloca en un recipiente limpio. El plato que sostiene al recipiente con el líquido es elevado hasta que el anillo se sumerja en el líquido y luego se baja para que el anillo quede en la superficie y el índice esté en posición cero. Este es el punto de partida de la determinación. Se aumenta la torsión sobre el alambre rotando la perilla para llevar el vernier a un punto cercano, pero por debajo del valor de la tensión superficial del líquido. Mientras se gira lentamente la perilla, el plato conteniendo al líquido se baja, manteniendo siempre la posición neutra del brazo de la balanza (coincidiendo con la línea del círculo blanco). Este procedimiento de doble movimiento es seguido hasta la ruptura de la película (despegue del anillo de la superficie del líquido).

La lectura sobre la escala en el momento de la ruptura es el indicativo de la tensión superficial aparente del líquido (γ'_L). Para obtener el valor real (γ_L) se usa un factor de corrección “k”, que se obtiene a partir de un líquido de tensión superficial conocida como $k = \gamma_{H_2O}^{tab} / \gamma_{H_2O}^{ref}$, donde el término en el numerador se obtiene de tablas (71.97 mN/m) y el término en el denominador se determina con el tensiómetro. Concretamente:

$$\gamma'_L = k\gamma_L \quad (5.1)$$

La tensión superficial aparente puede diferir de la real en hasta un 10%. Por ende, al utilizar los anillos de platino – iridio se deben tomar precauciones importantes a efectos de asegurar valores constantes:

1. El alambre del anillo debe estar perfectamente horizontal, libre de dobleces.
2. El anillo debe estar suspendido de tal forma que el plano del mismo esté paralelo a la superficie del líquido.
3. Tanto el anillo como el recipiente que contiene el líquido deben estar perfectamente limpios. La limpieza del anillo se realiza con algún solvente, luego con agua destilada y finalmente se calienta a la llama de un mechero común. La vasija de vidrio debe limpiarse con solución sulfocrómica, enjuagar con agua destilada y secar en estufa.
4. Para cada solución estudiada se realizan tres medidas de tensión superficial, reportándose el promedio.

■ Medición por placa de Wilhelmy:

Se utiliza una placa de geometría rectangular perfectamente conocida suspendida verticalmente a una balanza de precisión. El lado inferior de la placa se pone en contacto (horizontalmente) con la superficie del líquido para que se moje. Luego se ejerce una fuerza vertical sobre la placa para levantarla. La placa se levanta poco a poco, y de cada lado se forma una interfase curva; se levanta la placa hasta que se produzca el arranque. Los pasos se enumeran y esquematizan en la Figura .

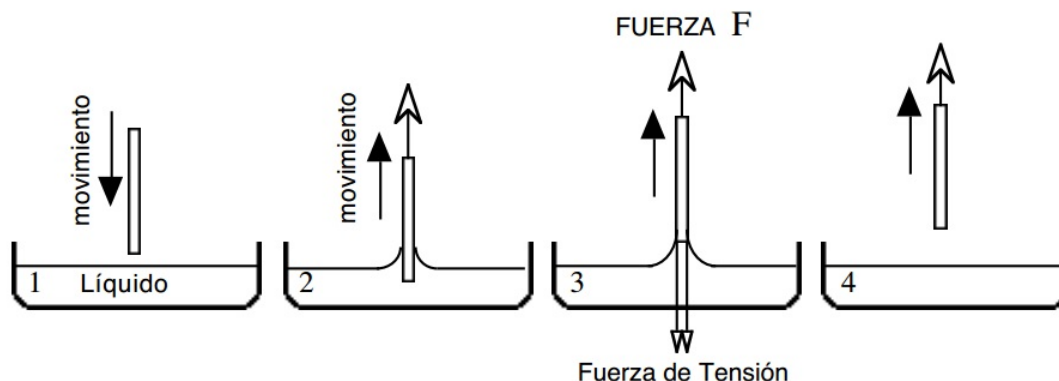


Figura 5.4: Esquema del método de la placa de Wilhelmy.

Se puede apreciar en la Figura 5.5 cómo en la posición justo antes del arranque se puede calcular el equilibrio de fuerzas entre las fuerzas de tensión y de la placa (por eso el factor 2), y la fuerza de levantamiento F .

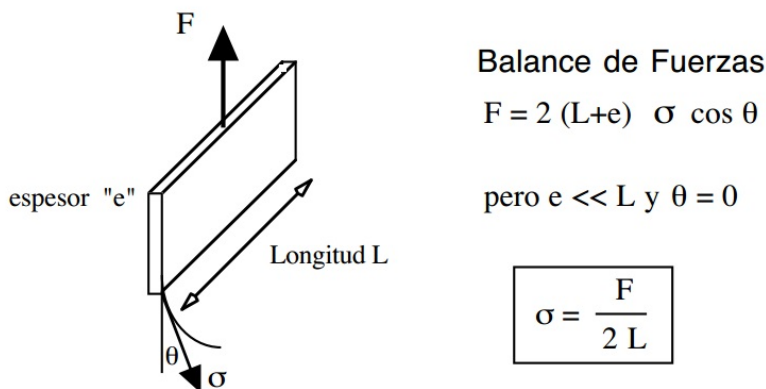


Figura 5.5: Esquema del cálculo de la tensión superficial en el método de la placa de Wilhelmy.

Usualmente la placa es de platino levemente rugoso, de tal forma que el ángulo de contacto sea lo más pequeño posible y se pueda suponer igual a cero. La placa mide típicamente 29,9 mm de largo (L) y 0,1 mm de espesor (e), en cuyo caso el perímetro completo es de 60 mm. La balanza es, en general, una balanza de torsión que el usuario manipula con una palanca. En ciertos modelos (automáticos) es un motor que asegura el levantamiento y un sistema registrador que monitorea la fuerza.

Este método no produce una superficie nueva al momento de producirse la medición. En la práctica se puede colocar el líquido dentro del recipiente varias horas antes y dejar equilibrarse la superficie. Por lo tanto, este método es particularmente bien adaptado a los sistemas que contienen sustancias surfactantes cuyo tiempo de adsorción puede ser largo. Nótese que permite medir la tensión dinámica; basta con verter el líquido en el recipiente justo antes de tomar la medida.

Este aparato permite también evaluar el ángulo de contacto entre un líquido y un material sólido. Basta medir primero la tensión superficial con una placa de platino ($\theta = 0$) y luego medirla con una placa hecha del material a evaluar. La relación entre las dos fuerzas medidas es $\cos(\theta)$.

En teoría la precisión de la medida está solo limitada por el conocimiento de la geometría de la placa (L y e) y la precisión de la balanza. En la práctica, no se puede tener una precisión mejor que $\pm 0,2$ mN/m. Este aparato es muy versátil, en particular para medir tensiones superficiales de soluciones acuosas, en el rango 70 mN/m (agua pura) - 30 mN/m (soluciones de detergentes); permite obtener fácilmente una reproductibilidad del orden de 2%, lo que es suficiente para determinar la concentración micelar crítica de una solución de surfactante.

El método de la placa de Wilhelmy se puede usar también para las interfaces líquido-líquido (esquemático en la Figura 5.6), en cuyo caso hay que proceder de la forma siguiente: primero se vierte en el recipiente el líquido menos denso y se hunde integralmente la placa en este líquido. Se mide entonces la fuerza necesaria para equilibrar el sistema F_1 (esta fuerza toma en cuenta el empuje de Arquímedes sobre la placa hundida en la fase menos densa). Luego se limpia y se seca la placa. Se vierte entonces el líquido más denso en un segundo recipiente y se baja la placa hasta establecer el contacto. Luego se saca la placa hasta una posición levemente más baja que el arranque. Luego se vierte cuidadosamente el líquido menos denso hasta recubrir la totalidad de la placa. Finalmente se procede a levantar la placa hasta producirse el arranque, lo cual ocurre con una fuerza F_2 . La fuerza neta requerida $F_2 - F_1$ permite calcular la tensión como en el caso anterior (Figura 5.5).

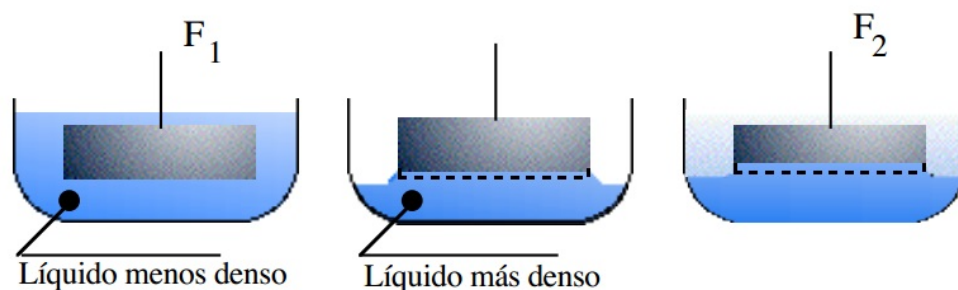


Figura 5.6: Esquema del método de la placa de Wilhelmy para dos líquidos.

Obviamente el método implica que la placa de platino esté más mojada por el líquido más denso que por el líquido menos denso. Si la fase más densa es de tipo acuoso, y la fase menos densa es de tipo aceite, el ángulo de contacto es por lo general nulo y se puede asumir $\cos(\theta) = 1$.

■ Medición mediante frecuencias propias de un fluido en reposo:

Referente a la frecuencia vibracional de gotas levitando:

En experimentos para medir la energía superficial de una gotita de metal fundido levitada magnéticamente mediante la observación de sus frecuencias de oscilación, se usa generalmente la ecuación de Rayleigh. Esto supone que la forma de equilibrio es una esfera, y la fuerza de restauración de la superficie se debe únicamente a la tensión superficial. Este trabajo investiga cómo las vibraciones de una gota de líquido no giratorio se ven afectadas por la asfericidad (referente a una forma no esférica) y las fuerzas de restauración adicionales que introduce el campo

de levitación. Los cálculos muestran que la frecuencia única esperada del modo fundamental se divide en tres, cuando hay un eje de simetría rotacional, o cinco bandas desigualmente espaciadas. Las frecuencias, en promedio, son más altas que las de una gota no restringida; la tensión superficial parece aumentar por encima de su valor normal. Esto requiere una pequeña corrección en todos los análisis de energía de superficie. Una regla de suma de frecuencia se deriva de un modelo simplificado del campo magnético que permite evaluar la frecuencia de Rayleigh correspondiente a partir de las frecuencias observadas de los modos fundamental y traslacional. Un análisis más detallado muestra una corrección similar pero que también es sensible a la posición de la gota en el campo.

Donde la ecuación de Rayleigh es:

$$\frac{P_B(t) - P_\infty(t)}{L} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu_L}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{\rho_L} \quad (5.2)$$

Con $P_B(t)$ la presión al interior de la burbuja, $P_\infty(t)$ la presión externa al fluido a una distancia infinita, ρ_L la densidad del líquido que rodea la burbuja (la que se asume constante), $R(t)$ el radio de la burbuja, ν_L la viscosidad cinemática del fluido que rodea la burbuja (también se asume constante) y S la tensión superficial de la burbuja.

Referente a la resonancia en las oscilaciones de caída de gotas líquidas esféricas y hemisféricas:

La técnica se basa en la medición de la frecuencia de resonancia de gotas colgantes esféricas y hemisféricas impulsadas en oscilaciones por un campo eléctrico modulado. La tensión superficial y la viscosidad se pueden evaluar a partir de las curvas resonantes obtenidas.

■ **Medición por gota colgante (pendant drop):**

Cuando se deja colgar una gota de un gotero se produce una geometría de equilibrio entre la fuerza de gravedad que tiende a estirar la gota y la fuerza de tensión que tiende a encogerla (véase Figura 5.7).

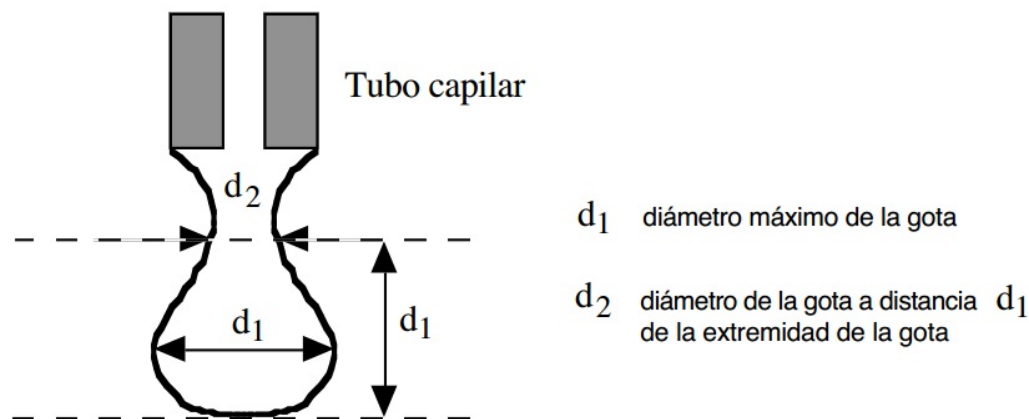


Figura 5.7: Esquema del montaje para el método de la gota colgante.

La medida de los diámetros d_1 y d_2 permite hallar la tensión interfacial mediante los nomogramas de Andreas, Hauser y otros (diagrama bidimensional que permite el cómputo gráfico y

aproximado de una función de cualquier número de variables).

Este método es relativamente simple, ya que exige solamente medir dos longitudes, lo cual se hace fácilmente con un telemicroscopio o sobre una macrofotografía. Sin embargo, se requiere una cierta destreza experimental para formar una gota estable (en general con una bureta micrométrica) y para mantenerla libre de oscilación.

El método se aplica para tensiones intermedias, ya que es poco preciso para tensiones muy altas (la gota es esencialmente esférica) y que por otra parte la gota tiende a descolgarse si la tensión es muy baja ($\gamma < 0,01 \text{ mN/m}$).

■ **Medición por gota depositada (sessile drop):**

Cuando la tensión es particularmente baja, la deformación gravitacional es fuerte y, por lo tanto, no se puede usar el método anterior. Más bien se coloca la gota contra una superficie sólida (abajo o arriba según la diferencia de densidad de los fluidos) como muestra la Figura 5.8.

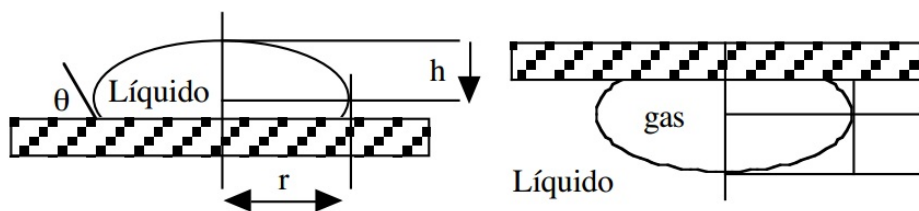


Figura 5.8: Esquema del montaje para el método de la gota depositada.

Si la gota es suficientemente aplastada ($r \gg h$), entonces la curvatura en la extremidad superior o inferior ("polo") es esencialmente cero, y la distancia h del "polo" al "ecuador" es independiente del diámetro de la gota. En tal caso se puede deducir la tensión superficial o interfacial por una relación del tipo:

$$\gamma = \frac{1}{2} \Delta \rho g h^2 \quad (5.3)$$

Donde $\Delta \rho$ es la densidad relativa de un fluido respecto al otro.

Si la gota no está completamente aplastada se puede usar una fórmula más exacta como:

$$\gamma = \frac{1}{2} \Delta \rho g h^2 \left[1 + 0,61 \frac{h}{r} \left(1 - 4 \frac{h^2}{r^2} \right) \right] \quad (5.4)$$

Por supuesto que este método implica disponer de una superficie no mojada por el fluido de la gota (o burbuja), lo que no es difícil en la práctica si se dispone de vidrio, metal y teflón.

Las condiciones de aplicación de la fórmula anterior (gota aplastada) se logran bien sea cuando la tensión es baja y la gota pequeña, bien sea cuando la gota es relativamente grande pero la tensión es alta. Para fijar las ideas se necesita una gota de mercurio del orden de 3 cm de diámetro (tensión superficial = 480 mN/m) y una gota de 2 mm de diámetro para un sistema de tensión interfacial ultrabaja (0.001 mN/m).

El método es por tanto apropiado para un rango bastante amplio de valores de tensión y se aplica con la misma facilidad para tensión superficial como para tensión interfacial. El aparato requiere una celda termostataada (lo que permite trabajar a alta temperatura) y un dispositivo de telemedición de longitud montado sobre un banco óptico como el esquematizado en la Figura 5.9.

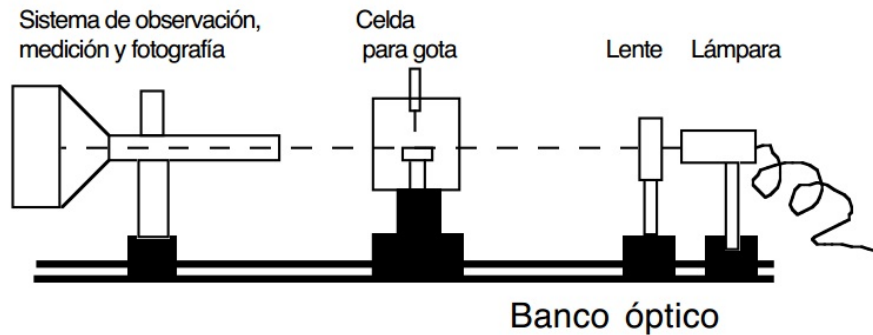


Figura 5.9: Esquema de un banco óptico.

▪ **Medición por gota en rotación (spinning drop):**

Si se coloca una gota de fluido menos denso dentro de un tubo lleno de líquido más denso y se hace girar el tubo sobre su eje de tal forma que la gravedad centrípeta excede considerablemente la gravedad natural, se tiene un sistema en el cual el vector gravedad apunta del eje hacia la pared del tubo. En tal sistema la fuerza de gravedad tiende a reunir el fluido menos denso cerca del eje, lo que resulta en un alargamiento de la gota, mientras que la fuerza de tensión tiende a reducir el área interfacial de la gota, lo que resulta en un encogimiento (véase Figura 5.10).

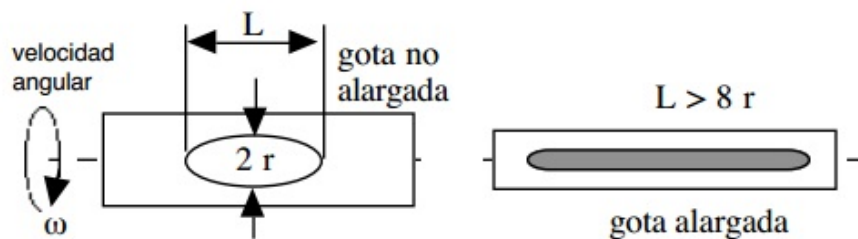


Figura 5.10: Esquema del montaje experimental para el método de la gota giratoria.

La tensión se expresará por:

$$\gamma = \frac{1}{4} \Delta \rho \omega^2 r^3 \tag{5.5}$$

Donde r es el radio de la gota (lo cual se puede medir con bastante precisión) y ω es la velocidad angular del tubo.

En realidad, se usa en general un coeficiente de corrección delante del factor $\frac{1}{4}$ para tomar en cuenta el efecto de lupa que produce la pared del tubo (la cual puede ser muy espesa si se trata de un capilar).

Este método permite medir tensiones interfaciales ultrabajas, hasta 0.0001 mN/m. Ciertos fabricantes pretenden que se pueden alcanzar valores aún menores, pero realmente es solo en casos particularmente favorables. El tensiómetro de gota giratoria es el aparato por escoger cuando se desea medir tensiones debajo de 0.01 mN/m ya que es de uso simple y no hay problema de ángulo de contacto. Sin embargo, es a veces delicado introducir una gota o una burbuja de tamaño apropiado y, por otra, parte es imprescindible que la fase más densa sea transparente.

Se usa frecuentemente para estudiar la variación de la tensión en función del tiempo, ya que obviamente la superficie se forma en el momento de introducir la gota de fase menos densa dentro del tubo.

Se hace conveniente, además, poder manipular y hacer variar la tensión superficial de ciertos líquidos y/o sustancias para diferentes propósitos, tanto domésticos como a nivel industrial. Los tensioactivos (o surfactantes) son compuestos que reducen la tensión superficial (o tensión interfacial) entre dos líquidos, entre un gas y un líquido, o entre un líquido y un sólido. Los tensioactivos pueden actuar como detergentes, agentes humectantes, emulsionantes, agentes espumantes y dispersantes.

Las propiedades de los tensoactivos se obtienen a través de su estructura molecular. Los tensoactivos se componen de una parte hidrófoba y un resto hidrófilo, o soluble en agua (más generalmente podemos hablar de anfóteros y anfifílicos). Al contacto con el agua, por ejemplo, las moléculas individuales se orientan de tal modo que la parte hidrofóbica sobresale del nivel del agua, encarándose al aire, mientras tanto la parte hidrofílica se queda sumergida; de esta manera existen menos moléculas de agua en la superficie, ya que gran parte fueron reemplazadas por moléculas de tensoactivo, lo que reduce la tensión superficial. Otro fenómeno es que las moléculas anfifílicas se alinean de tal manera que las partes hidrofílicas quedan de un lado y las partes hidrofóbicas del otro lado, por lo que empiezan a formar burbujas, las partes hidrofóbicas quedan en el centro, y los restos solubles en agua quedan entonces en la periferia disueltos en el agua. Estas estructuras se denominan micelas.

Existen diferentes clasificaciones de surfactantes, pero solo se hará mención, para efectos prácticos, de tres diferentes tipos de estos en base a su balance hidrófilo-lipofílico:

- **Solubilizantes:**

Son compuestos que permiten preparar disoluciones acuosas de concentración un tanto elevada de sustancias inmiscibles o parcialmente miscibles con el agua. Cuando un tensoactivo se disuelve o dispersa en agua, aquel queda absorbido en la superficie de ésta. Pero si la concentración de éste es elevada, existirá un exceso del mismo que no puede ser absorbido en la superficie del líquido y que formará micelas. La solubilización puede ocurrir en un sistema que consta de un disolvente, un coloide de asociación (por ejemplo, un coloide que forma micelas), y al menos otro componente llamado solubilizador o solubilizante.

- **Detergentes:**

Estos se emplean para separar la suciedad de cualquier tipo de superficie. Una molécula de jabón, por ejemplo, tiene un extremo polar o iónico, mientras que el resto de la molécula es no polar. El grupo polar tiende a hacer el jabón soluble en agua (hidrófilo) mientras que la porción no polar

(hidrocarburo) tiende a hacerlo soluble en grasas (hidrófobo o lipófilo). Los detergentes actúan en la misma forma que los jabones, pero tienen ciertas ventajas sobre estos; son eficientes en aguas duras y, además, por ser sales de ácidos y de bases fuertes producen soluciones neutras, mientras que los jabones que son sales de ácidos débiles con bases fuertes producen soluciones ligeramente alcalinas.

■ **Emulsionantes:**

Este tipo de tensioactivo permite la emulsión de un aceite en una disolución acuosa (emulsionante o/w) o de agua en una disolución orgánica (emulsionante w/o). Debido a la capacidad anfífilica de estos tensioactivos, cuyos HLB (balance hidrófilo-lipófilico) están cercanos a la parte central de la escala, son capaces de mezclar dos fases inmiscibles formando emulsiones estables.

■ **Humectantes:**

Es un tensioactivo con un HLB medio (se sitúa en la parte central de la escala). Cuando se disuelve en agua, hace disminuir el ángulo de contacto, mojando o humectando mayor proporción de superficie.

Habiendo mencionado ya la formación de micelas, es conveniente definir ahora la concentración micelar crítica (CMC). Esta corresponde a la concentración de surfactante a la cual comienza la asociación de moléculas para formar los microagregados. El fenómeno se inicia con la formación de microagregados (pequeños conjuntos constituidos por un número restringido de átomos, desde algunas unidades a varios centenares) pequeños (o premicelas), que crecen rápidamente en un rango de concentraciones específico para cada surfactante. La posterior adición de tensioactivo provoca un aumento en el número de microagregados presentes en solución, mientras el tamaño y forma micelar permanecen relativamente inalterados en un rango dado. La CMC no es un valor preciso, corresponde a un rango de concentración y su magnitud experimental depende normalmente de la metodología empleada para evaluarlo.

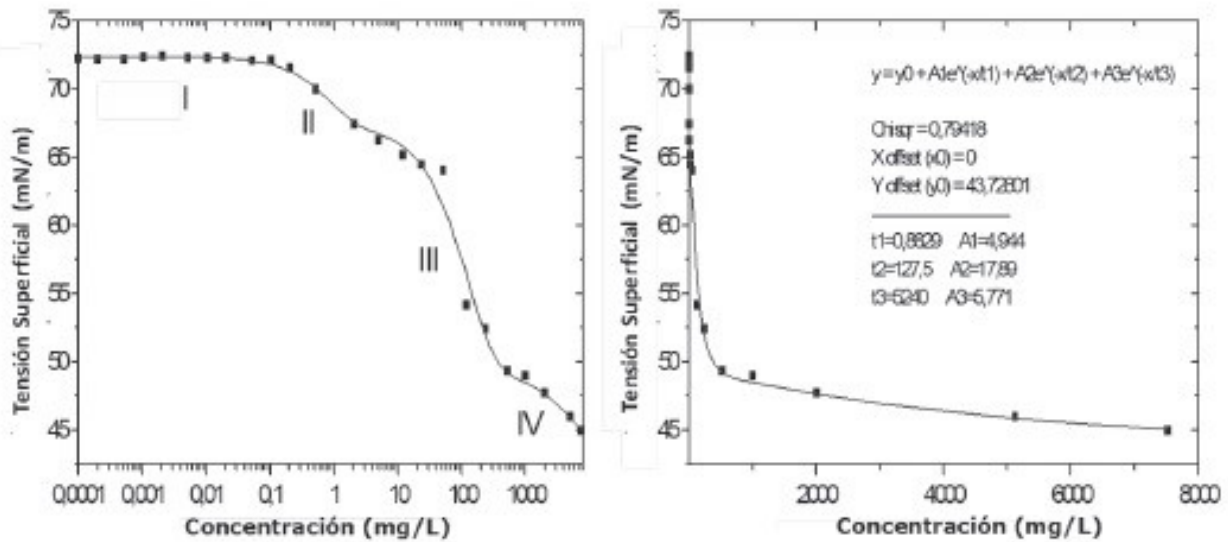


Figura 5.11: Variación de la tensión superficial con la concentración de surfactante en mg/L de PDMS-éster a 20 °C. A la izquierda en escala logarítmica y a la derecha los valores empíricos.

Termodinámicamente, la tensión superficial puede entenderse como la derivada de la energía libre de Gibbs con respecto al área a temperatura y presión constantes, vale decir $dG = \gamma dA$. Esto representará el trabajo realizado por la fuerza tensión superficial ($F_\gamma = \frac{dG}{dr}$).

Realizando un balance de fuerzas de una burbuja con presiones externa e interna, P_{ext} y P_{in} , respectivamente, se tiene:

$$F_{expansión} = AP_{in} = 4\pi R^2 P_{in} \quad (5.6)$$

$$F_{compresión} = AP_{ext} + F_\gamma = 4\pi R^2 P_{ext} + \gamma \frac{dA}{dr} = 4\pi R^2 P_{ext} + 8\gamma\pi R \quad (5.7)$$

Igualando ambas fuerzas (ec. (5.6) y ec. (5.7)) y dividiendo por el factor $4\pi R^2$ queda que:

$$P_{in} = P_{ext} + 2\frac{\gamma}{R} \quad (5.8)$$

Lo que implica directamente:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (5.9)$$

5.3. Análisis de Imágenes Digitales

Una imagen digital es diferente de una fotografía porque la primera está compuesta por un conjunto discreto denominado **pixels**, a los cuales a su vez se les asigna un valor discretizado. Por lo mismo

se pueden modificar de diversas maneras simplificando su mejoramiento (por ejemplo quitar distorsión óptica por aberración cromática, segmentarla, etc).

Existen 3 tipos de imágenes [11]:

- **Binaria:** Son imágenes donde cada pixel está compuesto por 1 bit, luego este puede tomar el valor 0 o 1. Se utilizan generalmente cuando sólo importan bordes o distinguir algún otro elemento particular en la imagen.
- **Escala de Grises:** El pixel en estas imágenes está compuesto por un valor n (definido) de bits que representan una escala donde 0 representa negro y el valor $2^n - 1$ el blanco. En general la escala se representan con 8(3 bits), 16(4 bits), 32(5 bits), 64(6 bits), 128(7 bits) o 256(8 bits) valores. Además esta escala se puede extrapolar a otras máscaras, por ejemplo imágenes de calor (estableciendo más de 2 colores, ejemplo rojo, amarillo, verde y azul).
- **Color Verdadero(True Color en inglés):** Son imágenes cómo dice su nombre que simulan el color verdadero. A diferencia de las demás el pixel es más complejo pues está compuesto por 3 o 4 bytes.
Cada byte representa un color primario de la luz (R(Red),G(green),B(Blue)) compuesto por 8 bits. De esta manera cada byte posee una cardinalidad 256, con lo que se pueden obtener $16.777.216 ((2^8)^3)$ similar a la cantidad de colores que puede distinguir el ojo humano). Respecto al 4° byte, incluirlo no mejora la precisión del color, sin embargo sirve para implementar el **canal** α que guarda la información del nivel de transparencia del pixel. Esto último es muy útil en aplicaciones de edición de imágenes.

En MatLab por ejemplo se puede trabajar con las imágenes de manera rápida. Para procesarla la transforma en Tensores de diferentes ordenes según el tipo de imagen (binaria, escala grises, true color) y se pueden utilizar algunos comandos como [12]:

- **imread(filename):**
Se utiliza para leer la imagen del archivo nombrado filename existente en el actual directorio de trabajo en MatLab. Si está compuesto por más de una imagen sólo leerá la primera. Se le puede agregar el argumento fmt que especifica el formato del archivo (es útil cuando hay más de un archivo con el mismo nombre pero formato diferente).
- **imshow(g):**
Muestra la imagen g en escala de grises. La función optimiza automáticamente las dimensiones del objeto y la figura.
- **pixval on:**
Función obsoleta. Desde R2008b `pixval()` fue removida y reemplazada por `imreadinfo` (Tool-Box). Entrega la información del pixel en la parte inferior de la figura, con el formato: Pixel info: (X,Y) [R G B] donde X,Y son las coordenadas del pixel, R,G y B son los valores de cada byte que va de 0 a 255.

▪ **impixel(i,j):**

Entrega el valor de los bytes del pixel ubicado en la coordenada (i,j). También funciona si i y j son vectores, donde la componente i(n) y j(n) son las coordenadas de el pixel n. En este caso devolverá una matriz de n filas y 3 columnas con los valores de los bytes de cada pixel.

▪ **imfinfo:**

imfinfo('file','fmt') Imprime la información de la imagen "file.fmt". Entrega campos como¹:

- **Filename:** String con el nombre y dirección del archivo.
- **FileModDate:** Fecha última modificación del archivo
- **Filesize:** Indica el tamaño del archivo en bytes.
- **Format:** Entrega el formato del archivo.
- **FormatVersion:** Entrega la versión del formato.
- **Width:** Indica el ancho de la imagen en pixeles .
- **Height:** Da la altura de la imagen en pixeles.
- **BitDepth:** Calcula la cantidad de bits por pixel
- **ColorType:** String que indica el tipo de imagen (binaria, escala grises, true color).
- **BitsPerSample:** Indica la cantidad de bits por byte del pixel.
- **XResolution:** Indica cantidad de pixeles por unidad horizontal
- **YResolution:** Indica cantidad de pixeles por unidad vertical
- **ResolutionUnit:** Indica la unidad de resolución (cm, inch, etc).
- **MaxSampleValue:** Entrega los valores máximos RGB.
- **MinSampleValue:** Entrega los valores mínimos RGB.

Tambien entrega los campos: FormatSignature, ByteOrder, NewSubFileType, Compresion, PhotometricInterpretation, StripOffsets, SamplesPerPixel, RowsPerStrip, StripByteCounts, Color-map, PlanarConfiguration, TileWidth, TileLength, TileOffsets, TileByteCounts, Orientation, FileOrder, GrayResponseUnit, Thresholding, Offset, e ImageDescription.

Como MatLab trabaja las imágenes como matrices (tensor orden 2 para imágenes binarias y escala grises, tensor orden 3 para imágenes true color), se pueden realizar distintas operaciones con ellas, en particular se le pueden restar, sumar o amplificar sus valores.

En el caso de imágenes binarias y escala de grises el resultado es distinto a imágenes true color.

- En el primer caso sumar o restar valores simplemente sube o baja el brillo de la imagen. Multiplicar o dividir el valor de los pixeles cambia el gradiente de la image, luego esta aumenta o disminuye su contraste.

Ambos métodos para trabajarlas son válidos, sin embargo no son los optimos, pues si un valor está por debajo del limite (es decir menor a 0) se considerará cero. Para valores muy altos lo

¹Se enlistan y definen los campos más relevantes concernientes al curso

mismo, su valor sera considerado como el máximo del color map actual (que depende del numero de bits $n \dots 2^n - 1$). Existen mejores métodos para manipular las imágenes como usar convolución (detectar bordes, subir o disminuir brillo, etc) y ecualización (mejorar contraste)

- Una imagen true color es un tensor de orden 3, donde las primeras 2 componentes representan un pixel y la tercera (siempre de cardinalidad 3 o 4) representan los valores RGB y el canal *alpha*. Sumar o restar valores a una de estas componentes aumentan o disminuyen la presencia del color específico en la imagen, (si se aumenta la 1° componente aumenta la presencia del Rojo (red) en la imagen, la 2° aumenta el verde (green), la 3° el azul (blue), y la 4° el nivel de transparencia).

multiplicar o dividir los valores de la componente tiene efecto similar a las imágenes del primer caso, sólo que cambian el contraste del color principal del pixel afectado. Olvidándonos del canal α , hay que considerar un caso particular, si el valor de R, G y B es el mismo, la imagen se comportará como una imagen (valga la redundancia) en escala de grises.

Una imagen en escala de grises puede ser convertida en una imagen binaria mediante el uso de un valor umbral, si un pixel tiene un valor inferior o superior a este se le asigna el valor 1 o 0 correspondientemente. El método dedetección de bordes trabaja con el gradiente de la imagen. Para esto se utiliza una máscara que se centra en un punto. Esta analiza el gradiente de la imagen y en función de este puede detectar bordes:

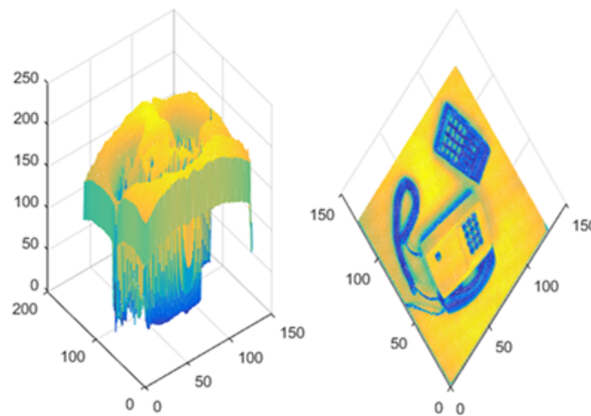


Figura 5.12: La imagen se puede representar en un espacio de 3 dimensiones, donde la altura es representada por el valor del pixel. (Imagen en escala de grises con colormap Parula de 6 bits. En lugar de `imshow(g)` se utiliza `surf(g)` para "graficar".)

Para obtener el gradiente un método común es filtrar usando el **Operador Sobel**[?].

El argumento de esto es el cálculo del gradiente mediante derivada discreta para un pixel de A:

$$\frac{\partial}{\partial x} A(i, j) \approx \frac{A(i - dx, j) - A(i + dx, j)}{2dx}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} A(i, j) \approx \frac{A(i, j - dy) - A(i, j + dy)}{2dy}$$

De esta forma se origina el kernel:

$$S = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Luego se obtienen los gradientes x e y de la matriz A:

$$G_x = S * A \quad \wedge \quad G_y = S^T * A$$

- Donde * representa la convolución de la matriz con el kernel²

Finalmente el gradiente de la imagen se obtiene como:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Para obtener entonces los bordes se obtiene la matriz G' que corresponde a la matriz G con valores absolutos (es decir solo la magnitud de estos) de tal manera que se puede transformar en una imagen binaria: Si la magnitud del gradiente en un pixel supera un umbral, la imagen considera un borde y asigna el valor 1, de lo contrario 0.

5.4. Vocabulario

PIV (particle image velocimetry)

Es un método euleriano³ óptico para estudiar las líneas de flujo de un fluido. Se usa para medir velocidades instantáneas y propiedades del fluido[14].

Se mezcla el fluido con partículas que se asume seguirán las líneas de corriente de este. Luego se deja fluir e impactar contra un obstáculo. Mientras tanto el fluido se ilumina con un láser. De esta manera mediante una cámara se pueden identificar estas partículas.

Las partículas deben ser suficientemente pequeñas (del orden de $10 - 100[\mu m]$), generalmente de cristal, poliéster, polietileno, aluminio o aceite (esta última generalmente para investigar gases), que deben tener un índice de refracción diferente a la del fluido de tal manera que se distinga el reflejo del láser en el fluido.

²Notar que el kernel usa la sub-matriz de A de 3x3 centrada en el pixel n, luego si la matriz A es de h x k, la matriz Gx y Gy serán de dimensión h-2 x k-2 naturalmente. luego la forma de resolver esto es agregar una fila y una columna en los extremos con ceros, representando que en el borde el gradiente es cero, de tal manera que se conserva la dimensión de la imagen.

³Centrado en un conjunto de puntos

PTV (particle tracking velocimetry)

Similar al PIV, sin embargo es un método lagrangiano ⁴ mediante la cual se definen las líneas de corriente[15].

Perfilometría por Transformada de Fourier

Consiste en colocar una superficie sobre la cual se proyecta un patrón, la cual se puede observar desde una cámara recibiendo la imagen en ángulo al plano (es decir apuntando de manera no perpendicular). Al colocar un obstáculo con volumen desde el ángulo de la cámara se puede percibir la deformación de este patrón en la posición del objeto. De esta manera teniendo la información del patrón original, y su deformación al obtener el obstáculo se puede medir el perfil de este cuerpo. Una manera de hacerlo es utilizando el espectro de fourier de la imagen captada por la cámara [16].

Este método se puede extrapolar a encontrar las líneas de corriente de un fluido que circula sobre un patrón conocido. Producto de diferentes velocidades, presiones, temperaturas, etc (variables termodinámicas), la cámara captará que el patrón se deforma puesto que la luz se refracta con distintos índices producto de las variables antes mencionadas. Luego con el espectro de fourier se puede relacionar la "deformación" del patrón con las distintas velocidades en el flujo a lo largo de un eje.

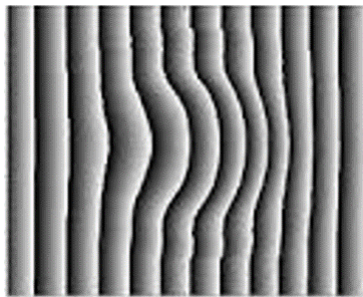


Figura 5.13: Deformación del patrón en una perfilometría.

Técnica de Schlieren

Consiste en un arreglo de 2 espejos cóncavos, una luz, una cámara y una rendija [?]. EL primer espejo desenfoca los rayos de luz de tal manera que viajan paralelos, luego se reflejan en el segundo espejo y se focalizan en el foco. A una distancia algo mayor que la posición del foco respecto al espejo se coloca una cámara con una rendija en frente. Si se coloca un obstáculo entre ambos espejos la cámara captará la silueta muy iluminada (similar a cómo se ve un eclipse de sol)

⁴Se rastrea una partícula individual

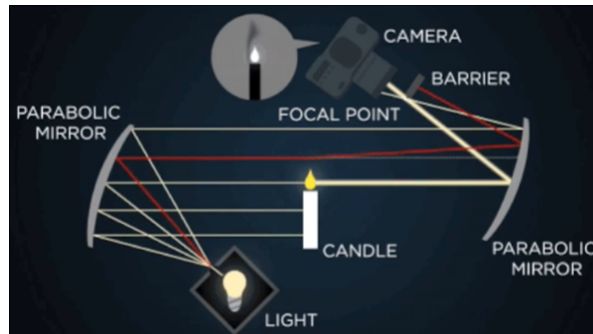


Figura 5.14: Técnica de Schlieren.

Schlieren sintético

Corresponde a una variación de la técnica anterior [18], donde en lugar de 2 espejos cóncavos se utiliza una fuente de luz, una malla semi transparente y la cámara. Los cambios del índice de refracción curvarán la luz, luego se generan "sombras" donde la luz es recibida con menor intensidad producto de esta curvatura.

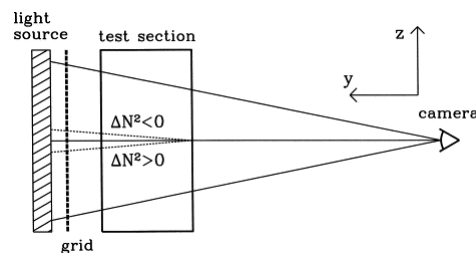


Figura 5.15: Esquema del Schlieren Sintético

Fotoblanqueo

El fotoblanqueo [19] (*photobleaching en inglés*) es destrucción fotoquímica de fluoróforos, disminuyendo la fluorescencia. Se utiliza para estudios de FRAP [20] (*Fluorescence Recovery After Photobleaching*) y FLIP [21] (*Fluorescence Loss In Photobleaching*) donde se puede observar el flujo de tejidos, por ejemplo en la membrana celular.

En el contexto de análisis de imágenes, es necesario tener claro conceptos como:

- **Umbral:** Cota de comparación de valores para reducir la cardinalidad de la muestra a 2.
- **Detección:** Distinguir un valor, clase, objeto, píxel que cumpla una característica deseada, por ejemplo ser un borde.
- **Contorno:** Lugar geométrico que distingue dos objetos distintos en una imagen

- **Pixel:** (*Picture element* en inglés) corresponde a la unidad de color en una imagen digital.
- **Vóxel:** (*Volumetric Pixel* en inglés) es la unidad de un elemento en 3D, como un CAD, CAM, etc.
- **Ajuste:** Se refiere al lugar geométrico al cual los valores de una muestra no se separan más de una distancia definida, generalmente para un valor dato el ajuste se acomodará al promedio de la muestra. También se puede analogar a otros conceptos como direcciones de campos vectoriales, gradientes, etc.

5.5. Metodología

El experimento consiste en medir la tensión superficial entre un fluido de prueba y el aire. El fluido de prueba será agua, mezclado con un surfactante (lavalozas) a una concentración determinada.

Materiales

- Aguja
- Jeringa
- Fluido de Prueba
- Sufractante
- Camara CCD
- Lente telefoto
- Panel de luces LED blancas
- PC con MatLab y ThorCam Instalado.

Para medir tensión superficial se utiliza un método simple de detección de contornos en MatLab. Las imágenes son adquiridas usando la cámara DCC1445M de ThorLabs y el software ThorCam

1. Monte la cámara junto con un lente telefoto sobre el escritorio donde está el PC con Matlab instalada.
2. Delante del lente, monte la jeringa con el fluido de trabajo conectado con la jeringa.
3. Detrás de la aguja, coloque el panel de luces LED blancas.
4. Abra el software ThorCam, seleccionando la cámara que Ud. está usando. Enfoque el lente sobre la jeringa.
5. Haga que una gota cuelgue de punta de la jeringa verticalmente. Tome una serie razonable de fotos que le permitan discriminar el borde de la gota

6. Usando el código descrito anteriormente, calcule la tensión superficial de su fluido de prueba, comparándolo con la posible literatura de ese fluido. Analice las posibles fuentes de error y como mejorar la medida.

5.6. Resultados

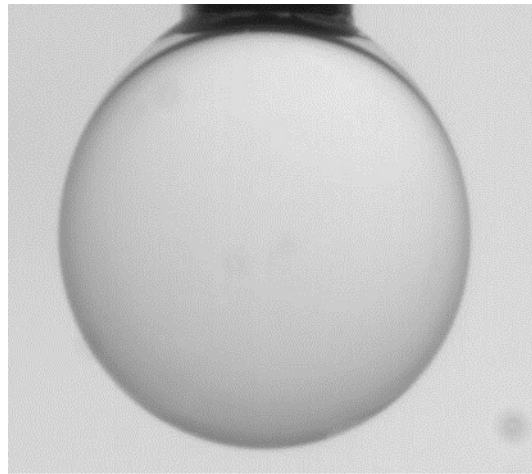


Figura 5.16: Gota de agua pura

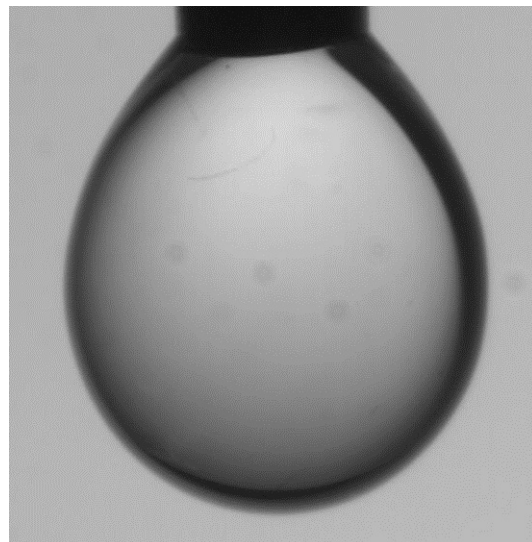


Figura 5.17: Gota de agua con surfactante (detergente) al 10 %

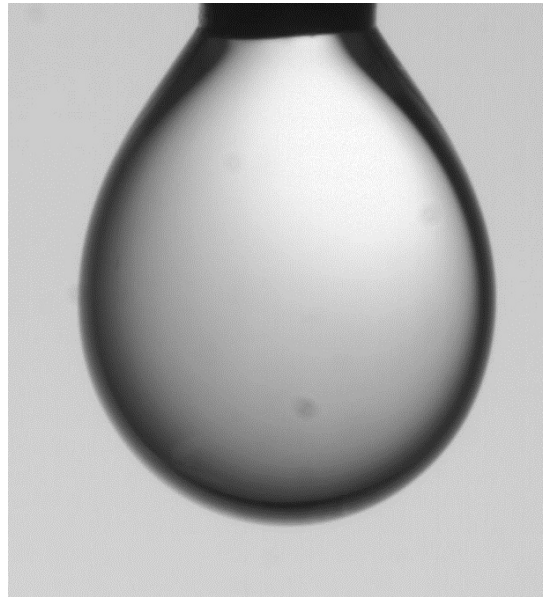


Figura 5.18: Gota de agua con surfactante (detergente) al 1 %

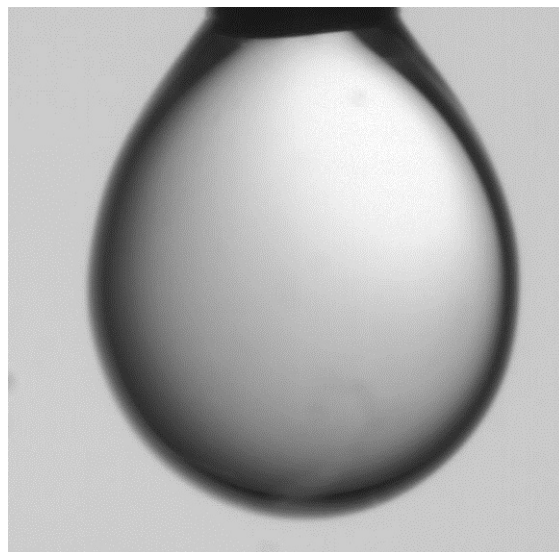


Figura 5.19: Gota de agua con surfactante (detergente) al 0.1 %

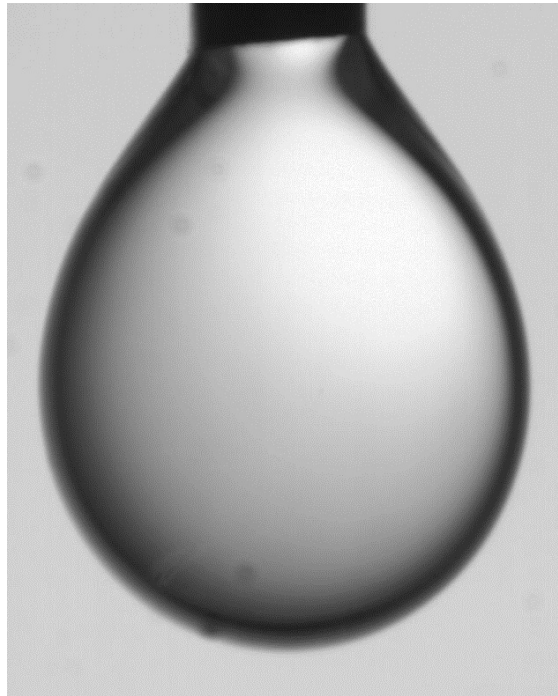


Figura 5.20: Gota de agua con surfactante (detergente) al 0.01 %

Utilizando los archivos matlab proporcionados por el profesor, basados en la teoría del paper : , también proporcionados por el profesor, se calculan las tensiones superficiales:

% Surfactante	Tensión Superficial [N/m]
0	0.082
10	0.1081
1	0.14
0.1	0.1063
0.01	0.3163

Como referencia, la tensión superficial del agua es 0.0728 [N/m] aproximadamente. El primer error claro es la tensión superficial del agua con surfactante al 10 % mayor, lo cual es falso.

Analizando los datos no se observa una relación clara en la cantidad de surfactante añadida y la tensión superficial, lo cual contrasta completamente con lo esperado: A mayor cantidad de surfactante disminuye la tensión superficial. Esto último sólo se observa entre 0.1 a 0.01 % y entre 10 y 1 %.

Conclusión

El trabajo en laboratorio es parte fundamental del desarrollo íntegro de un científico, sobre todo de un físico, quien debe basar sus teorías e ideas en los fenómenos más intrínsecos que rigen el universo y logran ser observados (o no) por el ojo humano.

El proceso de investigación previa sobre los temas con los cuales se experimenta resulta de vital importancia para generar conclusiones sólidas y saber interpretar los resultados obtenidos a modo de poder refutar, validar o contribuir a una teoría científica existente.

Bibliografía

Unidad 1: FabLab

- [1] Pablo Estévez, Análisis y Diseño de Circuitos Eléctricos, Marzo 2017

Unidad 2: Taller

- [2] Definición de Voltaje, <http://definicion.de/voltaje/>

Unidad 3: Vacío

- [3] Definición de Corriente, <http://definicion.de/corriente/>
- [4] E. A. Lacy, Handbook of electronic safety.
- [5] Seguridad con productos electrónicos: <http://www.safetylink.com/>
- [6] Web-based resources in Surfaces and Thin Films <http://venables.asu.edu/grad/appweb1.html>
- [7] John F. O'Hanlon, A User's Guide to Vacuum Technology, Dic. 2004, Wiley
- [8] Armand Berman, Vacuum Engineering Calculations, Formulas, and Solved Exercises, Academic Press

Unidad 4: 4 Contactos

- [9] Mediciones eléctricas: manuales de la firma Keithley
- [10] Edward A. Lacy, Handbook of electronic safety, Prentice Hall (1977)

Unidad 5: Tratamiento de imágenes

- [11] ZAGAL, JUAN C., ME4707 ROBÓTICA, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, Semestre Otoño 2018.
- [12] FUNCIONES EN MATLAB, (s.f). MathWorks: Documentation. Santiago Chile. Recuperado de: <https://la.mathworks.com/help/matlab/functionlist.html>
- [13] OPERADOR SOBEL, (S.F.). En Wikipedia. Recuperado el 22 de 08 de 2018, https://es.wikipedia.org/wiki/Operador_Sobel
- [14] PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, (S.F.). En Wikipedia. Recuperado el 21 de Agosto de 2018, https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_image_velocimetry
- [15] PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY, (S.F.). En Wikipedia. Recuperado el 21 de Agosto de 2018, https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_tracking_velocimetry

- [16] PERFILOMETRÍA, (26 de Abril de 2017). Youtube: Single image Method to depict 3D profiles [SPIE Invited Talk]. Santiago Chile. Recuperado de:https://www.youtube.com/watch?v=qf97_NRwafY
- [17] ZAHUMENSKY C., (04 de Septiembre de 2014). GIZMODO:La sorprendente técnica que consigue fotografiar el sonido o el calor. Santiago Chile. Recuperado de:<https://es.gizmodo.com/la-sorprendente-tecnica-que-permite-fotografiar-el-soni-1561508019>
- [18] SCHLIENER SINTÉTICO, (15 de Enero de 2018). Youtube: Synthetic Schlieren – application to the visualization and characterization of air convection. Santiago Chile. Recuperado de:<https://www.youtube.com/watch?v=lgqk7ld-NvA>
- [19] PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, (s.f.). En Wikipedia. Recuperado el 21 de Agosto de 2018, <https://en.wikipedia.org/wiki/Photobleaching>
- [20] RECUPERACIÓN DE FLUORECENCIA DESPUES DEL FOTOBLANQUEO, (27 de Octubre de 2018). Youtube: Fluorescence recovery after photobleaching — FRAP. Santiago Chile. Recuperado de:https://www.youtube.com/watch?v=_GajEJhbZuo
- [21] FLUORECENCIA PERDIDA EN FOTOBLANQUEO, (17 de Octubre de 2012). Youtube: Fluorescence loss in photobleaching or FLIP. Santiago Chile. Recuperado de:<https://www.youtube.com/watch?v=R6-IJ4WKNn0>

