

87  
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

AUTOMATIZACION DE UN SISTEMA DE  
PRODUCCION DE PELICULAS DELGADAS POR EL  
METODO DE SPUTTERING

**T E S I S**

PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**  
**AREA ELECTRICA ELECTRONICA**  
**P R E S E N T A :**  
**HECTOR TOBIAKI IBUKI KASUBUCHI**

DIRECTORES: ING. FRANCISCO J. RODRIGUEZ RAMIREZ,  
FIS. HECTOR CRUZ MANJARREZ.

MEXICO, D. F.

SEPTIEMBRE DE 1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradezco a mi familia el haberme apoyado para la consecución de este trabajo, por que sin su continuo apoyo no hubiera podido llegar hasta este punto.

A mis maestros y amigos por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias.

A Elizabeth por estar conmigo en momentos de duda ya que sin su aliento y cariño jamás se hubiera terminado este trabajo

## **AGRADECIMIENTOS.**

Desco hacer patente mi agradecimiento al Dr. Fernando Alba Andrade, investigador emérito del departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo, por las facilidades brindadas y su continuo apoyo para su realización.

De la misma manera le agradezco a los miembros del departamento y del instituto por el apoyo que me brindaron en diversas actividades.

De manera especial quiero agradecer a Luis Flores Morales por sus consejos y su ayuda diaria en el trabajo dentro del laboratorio.

Finalmente, agradezco a mis asesores, el Ingeniero Francisco J. Rodríguez Ramírez y al Físico Héctor Cruz Manjarrez por su paciencia y su guía durante el tiempo que me ha llevado realizar esta tesis.

## INDICE

## página

1. Introducción.	1
2. Método de sputtering para depósito de películas delgadas.	4
2.1. Sputtering.	4
2.1.1. Descargas gaseosas.	7
2.1.2. Descarga de RF.	9
2.2. Eficiencia del sputtering.	10
2.2.1. Energía de los iones incidentes.	10
2.2.2. Material de los blancos.	13
2.2.3. Efectos del ángulo de incidencia.	15
2.2.4. Estructura cristalina del blanco.	16
2.2.5. Rendimiento del sputtering con aleaciones.	17
2.3. Átomos removidos.	19
2.3.1. Velocidad y distancia media libre.	20
2.4. Sistemas de sputtering.	22
2.5. Factores que afectan la velocidad de depósito.	24
2.6. Aplicaciones.	25

<b>3. Transducción y medición de variables.</b>	<b>27</b>
<b>3.1. Medida del vacío.</b>	<b>27</b>
3.1.1. Manómetro de McLeod.	28
3.1.2. Manómetro de Diafragma.	28
3.1.3. Manómetro Alfatrón.	29
3.1.4. Sensores y manómetros térmicos.	29
3.1.5. Manómetros de ionización.	31
3.1.5.1. Medidores de cátodo caliente.	32
3.1.5.2. Medidores de cátodo frío.	33
3.1.6. Analizadores de gas residual.	35
<b>3.2. Medición de espesor.</b>	<b>41</b>
3.2.1. Métodos ópticos.	41
3.2.1.1. Métodos de interferencia óptica.	41
3.2.1.2. Elipsometría.	46
3.2.1.3. Otros métodos ópticos.	46
3.2.2. Métodos mecánicos.	46
3.2.3. Métodos magnéticos.	48
3.2.4. Métodos eléctricos.	48
3.2.5. Métodos por radiación.	49
3.2.6. Medidor de oscilador de cristal de cuarzo.	50
<b>3.3. Medición de energía.</b>	<b>55</b>

<b>4. Instrumentación y control.</b>	<b>56</b>
<b>4.1. Adquisición de datos.</b>	<b>58</b>
<b>4.2. Determinación de las características dinámicas de un sistema.</b>	<b>63</b>
<b>4.3. Controladores PID.</b>	<b>69</b>
<b>4.4. Métodos de sintonización.</b>	<b>74</b>
4.4.1. Método de oscilaciones sostenidas.	74
4.4.2. Método de oscilaciones amortiguadas.	75
4.4.3. Métodos de curva de reacción.	76
4.4.3.1. Método de Ziegler-Nichols.	76
4.4.3.2. Método de Cohen-Coon.	77
4.4.3.3. Método de criterios de desempeño.	78
4.4.3.4. Método de Dahlin.	79
<b>4.5. Selección de la frecuencia de muestreo.</b>	<b>81</b>
<b>5. Automatización del sistema.</b>	<b>85</b>
5.1. Descripción del sistema.	85
5.2. Secuencia de preparación.	91
5.3. Adecuación de señales.	93
5.4. Diseño del controlador.	96
5.5. Integración del sistema.	105
<b>6. Conclusiones y perspectivas.</b>	<b>107</b>

<b>7. Bibliografía.</b>	<b>111</b>
<b>Anexo A. Bombas de Vacío.</b>	<b>114</b>
<b>A.1. Bombas mecánicas.</b>	<b>115</b>
<b>A.2. Bombas de vapor.</b>	<b>119</b>
<b>A.3. Bombas iónicas.</b>	<b>123</b>
<b>A.4. Bombas de sorción.</b>	<b>124</b>
<b>A.5. Bombas criogénicas.</b>	<b>126</b>



## 1. INTRODUCCIÓN.

Históricamente, el desarrollo de los recubrimientos se inició en la segunda mitad de los años cincuenta con recubrimientos decorativos de aluminio en juguetes, textiles, etc.; desde entonces, esta industria ha encontrado diversas áreas de expansión. El estudio de las superficies se ha convertido en una parte esencial en el desarrollo de bienes de alta tecnología, y su desarrollo ha contribuido a obtener nuevos productos con un conjunto de características que antes no podían obtenerse. Los materiales para aplicaciones de alta tecnología, son generalmente compuestos; en éstos, las características superficiales difieren de las características del material en sí, esto se logra con tratamientos superficiales que incluyen los recubrimientos.

Existen múltiples métodos para producir estos recubrimientos, procesos físicos como la evaporación y el sputtering; químicos como el CVD (chemical vapor deposition), o combinaciones de fenómenos químicos y físicos. Cada método presenta características específicas que las hacen adecuadas para distintas aplicaciones.

Anteriormente, el espesor de los recubrimientos determinaba su clasificación dentro de películas gruesas o películas delgadas. El inconveniente era que el espesor que marcaba la división para su clasificación, dependía de la aplicación; por esto, recientemente se ha optado por designar películas delgadas a aquellas en las que la película es utilizada por sus propiedades superficiales, es decir, la película se produce por el interés de la película misma y el sustrato pasa a segundo plano; y películas gruesas a aquellas en las que las propiedades del sustrato o material recubierto son de importancia y la película se utiliza para darle al sustrato una característica que no posee.

Dentro de las diversas áreas de aplicación de las películas delgadas se encuentra la energética, específicamente en el uso de la energía solar. A partir de la década de los 70's los recursos energéticos ya no son vistos como algo ilimitado y la creciente demanda de energía ha generado la necesidad de una continua labor de investigación y desarrollo de nuevas fuentes energéticas, cada vez más limpias, renovables y eficientes. Dentro de estas investigaciones se cuenta el desarrollo de dispositivos para el aprovechamiento de la energía solar. La energía solar presenta grandes ventajas: es limpia, casi ilimitada y barata para casi todo el mundo. La energía solar se puede aprovechar como fuente de calor (concentradores solares parabólicos) o como fuente directa de electricidad (celdas fotovoltaicas).

Las celdas solares se han venido utilizando desde hace 40 años, para proporcionar energía eléctrica a vehículos espaciales, instalaciones y equipos localizados en zonas remotas y algunos equipos portátiles; y en un futuro se prevé su uso extensivo en otras aplicaciones. Para que este tipo de fuente de energía sea más accesible para otras aplicaciones es indispensable mejorar su eficiencia y reducir su costo de producción. Actualmente, entre las celdas más eficientes se encuentran las producidas químicamente y las que utilizan silicio monocristalino; el precio de estas últimas es muy elevado por lo que se busca sustituirlas por celdas hechas de silicio amorfo en forma de películas delgadas.

En el departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México existe un proyecto en el que se busca desarrollar la tecnología para la producción de celdas fotovoltaicas de silicio amorfo. Para ello se cuenta con varios equipos para la producción y la caracterización óptica y

eléctrica de películas delgadas producidas por el método de sputtering. Como parte del proyecto, se requiere un sistema automatizado de producción de películas con el fin de reproducir con mayor precisión las condiciones y parámetros de depósito, mejorando la eficiencia del proceso y ayudando en la búsqueda de los parámetros para obtener las características deseadas de las películas.

El instituto cuenta con el equipo necesario para la producción de películas con un proceso manual, por lo que se trata de aprovechar dicho equipo y, utilizando una computadora personal, integrarlos a un sistema automatizado para tener un proceso de depósito más eficiente y controlado.

Este trabajo busca establecer los primeros pasos hacia la automatización del sistema, desarrollando los circuitos necesarios para la conexión de los instrumentos a la computadora, así como un controlador digital de la presión de trabajo y un programa que maneje todos los equipos involucrados .

## 2. MÉTODO DE SPUTTERING PARA DEPÓSITO DE PELÍCULAS DELGADAS

El fenómeno de sputtering consiste en la remoción de material de una superficie sólida por la acción del bombardeo de partículas de alta energía. Este fenómeno se reportó por primera vez en 1852 cuando se realizaban experimentos con un tubo de descarga gaseosa [Grove, 1852]; W.R. Grove observó restos del material del cátodo depositado en las paredes del tubo. En ese tiempo el sputtering era un fenómeno no deseado ya que el cátodo y su rejilla se destruyen durante la descarga gaseosa. Sin embargo, hoy en día el sputtering se utiliza ampliamente para la limpieza y el grabado de superficies, depósito de películas delgadas, análisis de superficies y para fuentes de iones.

### 2.1 Sputtering.

El término sputtering se aplica al proceso físico por el que se remueven átomos o moléculas de la superficie de un sólido, llamado blanco, por el bombardeo de partículas incidentes de alta energía, llamados proyectiles. Este desalojo de partículas se debe a la transferencia de momento cinético de las partículas incidentes a los átomos del blanco. En este proceso, es de gran importancia la energía de los proyectiles; si la energía no supera la energía de "blindaje" de los átomos del blanco ( $<5$  eV), los proyectiles son reflejados y si llegan a un equilibrio térmico con la superficie, son posteriormente reevaporados. Si la energía supera este umbral ocurre una migración de átomos superficiales y el desalojo de átomos de la estructura sólida a la fase gaseosa, es decir, se da el fenómeno de sputtering ilustrado en la figura 2.1. En este intervalo de energía, mientras mayor

es la energía de los proyectiles mayor es el material desalojado ya que con cada colisión la probabilidad de que un átomo salga de la superficie a la fase gaseosa aumenta. Si la energía de los proyectiles es mucho mayor al umbral ( $>10\text{keV}$ ), los proyectiles se incrustan a una mayor profundidad en la estructura del blanco por lo que el material desalojado ya no aumenta en relación con la energía de lo proyectiles. Estas consideraciones muestran que el sputtering está confinado en un intervalo de energía desde la energía necesaria para que un átomo pase a la fase gaseosa hasta la energía que provoca la incrustación profunda de proyectiles.

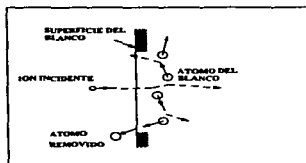


figura 2.1. Fenómeno de sputtering.

En el intervalo de energía en el que se presenta el sputtering, los choques entre partículas se consideran binarios y totalmente elásticos; de la mecánica clásica se sabe que en una colisión elástica se cumplen las leyes de la conservación de la energía y del momento lineal.

Conservación de la energía.

$$\frac{1}{2} m_A v_{A1}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B1}^2 = \frac{1}{2} m_A v_{A2}^2 + \frac{1}{2} m_B v_{B2}^2$$

Conservación del momento.

$$m_A v_{A1} + m_B v_{B1} = m_A v_{A2} + m_B v_{B2}$$

en este caso  $m_A$  y  $v_A$  son la masa y la velocidad de las partículas incidentes y  $m_B$  y  $v_B$  son la masa y velocidad de los átomos del blanco.

De estas ecuaciones, se conocen las velocidades iniciales y la masas de las partículas y se pueden conocer sus velocidades finales. Además, si se considera que el cuerpo B (material blanco) está en reposo antes del choque se obtiene:

$$v_{A2} = \frac{m_A - m_B}{m_A + m_B} v_{A1} \quad , \quad v_{B2} = \frac{2 m_A}{m_A + m_B} v_{A1}$$

La pérdida de energía cinética del cuerpo A es:

$$(K_2)_A = \frac{1}{2} m_A v_{A2}^2 = \left( \frac{m_A - m_B}{m_A + m_B} \right)^2 (K_1)_A$$

La energía cinética que adquiere el cuerpo B es:

$$(K_2)_B = \frac{1}{2} m_B v_{B2}^2 = \left( \frac{4 m_A m_B}{(m_A + m_B)^2} \right) (K_1)_A$$

La eficiencia del proceso de sputtering es proporcional a este cambio de energía; cuando la energía cinética que adquieren los átomos del blanco supera la energía de "blindaje", el átomo pasa al estado gaseoso.

Hasta este momento, solo se han manejado los proyectiles que bombardean el blanco como partículas de alta energía, estas partículas son generadas a través de un campo eléctrico que ioniza

un gas y provoca el desplazamiento de iones hacia la superficie del blanco, es decir, las partículas incidentes se originan en una descarga gaseosa en donde uno de los electrodos es el blanco.

### 2.1.1 Descargas Gaseosas

Si se aplica un voltaje de CD entre dos electrodos separados cierta distancia en un gas a baja presión, fluirá una pequeña corriente debido a un reducido número de iones y electrones. Esta corriente es casi constante aún si el voltaje aumenta. Sin embargo, al aumentar el voltaje, se transfiere suficiente energía a los iones y electrones para que produzcan más partículas cargadas a través de choques con los electrodos (emisión de electrones secundarios) y con átomos neutros del gas (formación de iones). Cuando el voltaje alcanza un valor tal que el número de electrones generados es suficiente para generar un número de iones para regenerar los electrones originales, la descarga es autosostenida, es decir, el gas permanece en un estado de excitación (plasma) mientras se mantenga la diferencia de potencial. En esta condición la corriente sube abruptamente, el voltaje disminuye y el gas emite fotones (se ilumina). El área que cubre esta descarga en estas condiciones es menor a la superficie de los electrodos y se llama descarga normal, pero cuando la potencia suministrada aumenta, el área crece para mantener constante la densidad de corriente hasta que cubre toda la superficie de los electrodos; al aumentar más la potencia, la densidad de corriente tiene que aumentar formándose una descarga anormal. En una descarga anormal, los iones positivos se aceleran con la suficiente energía para desprender átomos del cátodo además de electrones secundarios para el sostenimiento y se produce el fenómeno de sputtering. Los materiales arrancados del cátodo son neutros por lo que viajan sin ser afectados por la descarga gaseosa y se

pueden condensar formando una película en un sustrato colocado en su camino, siempre y cuando no sufran colisiones con otras partículas.

Para evitar las colisiones es necesario disminuir el número de partículas de la descarga (presión del gas) hasta el punto en que el sostenimiento de la descarga no se puede lograr con ningún valor de voltaje y se requiere de una fuente externa de electrones o una mayor eficiencia en el proceso de ionización para mantener y aún para iniciar una descarga.

Un método para suministrar electrones adicionales es a través de un voltaje, independiente a la descarga, aplicado a un filamento que emite electrones por efectos térmicos. Estos electrones adicionales permiten la generación de partículas cargadas para el sostenimiento de la descarga gaseosa aún a presiones muy bajas y se dice que la descarga esta térmicamente sostenida. Además, al incluir un filamento, el control de la densidad de corriente es ahora independiente del voltaje aplicado a los electrodos por lo que las descargas se pueden generar a voltajes menores..

Para mejorar la eficiencia de ionización de los electrones existentes es necesario colocar un campo magnético perpendicular al cátodo, con esto se obliga a los electrones a seguir trayectorias helicoidales en vez de trayectorias rectas . Al aumentar la longitud de la trayectoria de los electrones, la probabilidad de chocar y formar iones aumenta con lo que se consigue una descarga sostenida magnéticamente.

En el caso de que sobre el cátodo se coloque un material no conductor, éste acumula una carga positiva en su superficie la cual termina, en un tiempo dado, por anular el potencial del cátodo y el bombardeo cesa. Sin el bombardeo del blanco, no puede existir la remoción de material aún con una descarga autosostenida. Ahora bien, si el campo eléctrico cambia de



polaridad, la carga acumulada frente al cátodo es eliminada por electrones incidentes por lo que un nuevo potencial negativo reinicia el bombardeo. De esta manera un campo eléctrico alterno con la frecuencia adecuada puede permitir que el bombardeo sea casi constante en el tiempo y que se logre el depósito de una película de un material no conductor .

### 2.1.2. Descarga de RF.

Como se mencionó, si un tubo de descarga gaseosa se alimenta con un voltaje alterno de baja frecuencia, se obtiene una descarga gaseosa similar a la de CD durante un corto intervalo de tiempo para cada electrodo en cada medio ciclo de la señal; pero si la frecuencia aumenta, los electrones pueden seguir la polaridad del campo, sin embargo, ya que los iones tienen una masa mayor, no pueden seguir el cambio de polaridad, sino que responden a un campo eléctrico promedio. De esta forma la corriente iónica y la corriente debida a los electrones son de diferente magnitud y ya que este proceso se da en una descarga gaseosa, que en conjunto es eléctricamente neutra, el sistema responde con una polarización negativa de la superficie del aislante formándose un cátodo virtual que promueve el bombardeo constante del blanco aislante. De hecho, si el material del blanco es conductor y es acoplado capacitivamente a la fuente de alimentación como si fuera un blanco aislante, el efecto es similar, por lo que con una descarga de RF se pueden producir películas de materiales tanto conductores como aislantes.

Finalmente, la consideración de la frecuencia de la señal de alimentación en las descargas de RF es de gran importancia. Con señales de hasta 50 Khz se observa el efecto básico de una descarga de CD, mientras que a frecuencias mayores se presenta la polarización negativa del

blanco y la remoción de material. En las fuentes comerciales, se utilizan frecuencias de 5 a 30 Mhz debido a la asignación internacional de frecuencias de RF [Vossen, 1991].

## 2.2 Eficiencia de sputtering.

La eficiencia  $S$  es una medida de la transferencia de energía de los iones al material del blanco y es el parámetro más importante del sputtering. Se define como:

$$S = \frac{\text{átomos - removidos}}{\text{iones - incidentes}}$$

El sputtering es el resultado de las interacciones entre las partículas incidentes con los átomos de la superficie del blanco por lo que es una función de los siguientes factores:

1. la energía de las partículas incidentes;
2. el material de los blancos;
3. el ángulo de incidencia de las partículas;
4. la estructura cristalina de la superficie de los blancos;

### 2.2.1 Energía de los iones incidentes.

La figura 2.2 muestra una variación típica de la eficiencia con respecto a la energía de los iones incidentes y sugiere que:

1. En una región de baja energía, existe una energía mínima necesaria para que el sputtering se presente.
2. La eficiencia es máxima en una región de alta energía.

El umbral de energía se ha estudiado ampliamente, ya que está relacionado directamente con el mecanismo de sputtering. Los valores que se obtuvieron en los primeros años están en un intervalo desde 50 hasta 300 eV. estos valores no son muy confiables, ya que se midieron a partir de la pérdida de peso de los cátodos en el intervalo de  $10^{-4}$  átomos/ion. El umbral de energía es muy sensible a la contaminación superficial del cátodo, al ángulo de incidencia y la orientación cristalina de los materiales.

Posteriormente se midió el valor del umbral con el método espectroscópico y se encontró que está en el orden de 15 a 30 eV y difícilmente llega a cuatro veces el calor de sublimación de los materiales del cátodo.

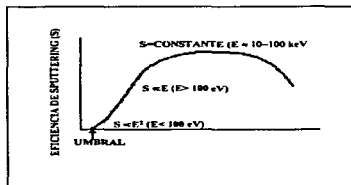


figura 2.2. Variación de la eficiencia con respecto a la energía del ion incidente

Los datos experimentales que se obtuvieron se encuentran en la tabla 2.1 y sugieren que no existe mucha diferencia entre ellos. El valor más bajo de energía se observa cuando existe una mejor correspondencia entre las masas de los átomos del blanco y los iones incidentes. El valor mayor, en consecuencia, se observa cuando la correspondencia es menor.

	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	H
Be	12	15	15	15	—	—
Al	13	13	15	18	18	—
Ti	22	20	17	18	25	4.40
V	21	23	25	28	25	5.28
Cr	22	22	18	20	23	4.03
Fe	22	20	25	23	25	4.12
Co	20	25	23	22	—	4.40
Ni	23	21	25	20	—	4.41
Cu	17	17	16	15	20	3.53
Ge	23	25	22	18	25	4.07
Zr	23	22	18	25	30	6.14
Nb	27	25	26	32	—	7.71
Mo	24	24	28	27	32	6.15
Rh	25	24	25	25	—	5.98
Pd	20	20	20	15	20	4.08
Ag	12	15	15	17	—	3.35
Ta	25	26	30	30	30	8.02
W	35	33	30	30	30	8.80
Re	35	35	25	30	35	—
Pt	27	25	22	22	25	5.60
Au	20	20	20	18	—	3.90
Th	20	24	25	25	—	7.07
U	20	23	25	22	27	9.57
Ir		(8)				5.22

tabla 2.1. Umbrales de energía para distintos blancos e iones incidentes [Vossen, 1991].

La eficiencia varía con la energía de los iones incidentes  $E$ , así, en la región de baja energía, cerca del umbral,  $S$  obedece la relación  $S \propto E^2$  y en la región de energía del orden de 100eV,  $S \propto E$ . En esta región, los iones incidentes chocan con los átomos de la superficie del blanco y el número de átomos desplazados debido a la colisión es proporcional a la energía del ion incidente.

En el intervalo de energía que va de 10 a 100keV, los iones viajan debajo de la superficie y la eficiencia no está gobernado por la dispersión de la misma, sino por la dispersión en las zonas internas del blanco. A energías mayores de 10keV, el rendimiento decrece por la disipación de energía de los iones incidentes que se incrustan en el blanco. Los rendimientos máximos se encuentran en la región de energía de los 10keV.

### 2.2.2 Material de los blancos.

Se han acumulado un gran número de datos sobre el rendimiento con respecto a distintos blancos, la expresión para el rendimiento es:

$$S = 10^4 \left( \frac{W}{AIt} \right)$$

donde W representa la pérdida de peso del blanco durante un tiempo (t) de bombardeo con la corriente de iones I al blanco, y A denota el número atómico del material del blanco.

Los resultados típicos se encuentran en la figura 2.3. Se utilizaron blancos policristalinos por lo que los efectos de orientación cristalina son despreciables. Se debe notar que estos datos corresponden a  $S/(1+\Gamma)$ , donde  $\Gamma$  es el coeficiente de emisión de electrones secundarios del material del blanco.

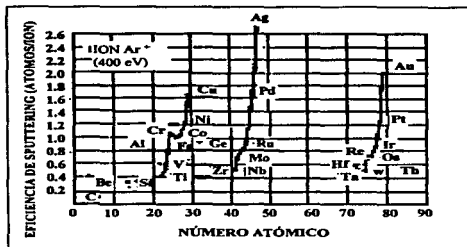


figura 2.3. Eficiencia de sputtering para distintos blancos [Vossen, 1991].

La siguiente tabla contiene algunos valores de  $\Gamma$ .

MATERIALES DEL BLANCO	ION INCIDENTE	ENERGÍA DEL ION (ev)		
		200	600	1000
W	He <sup>+</sup>	0.524	0.24	0.258
	Ne <sup>+</sup>	0.258	0.25	0.25
	Ar <sup>+</sup>	0.1	0.104	0.108
	Kr <sup>+</sup>	0.05	0.054	0.058
Mo	Xe <sup>+</sup>	0.016	0.016	0.016
	He <sup>+</sup>	0.215	0.225	0.245
Ni	He <sup>++</sup>	0.715	0.77	0.78
	He <sup>+</sup>		0.6	0.884
	Ne <sup>+</sup>			0.53
	Ar <sup>+</sup>		0.09	0.156

tabla 2.2. Coeficiente de emisión de electrones secundarios  $\Gamma$  de algunos materiales [Vossen, 1991].

### 2.2.3 Efectos del ángulo de incidencia.

El rendimiento varía con el ángulo de incidencia de los iones, para metales como Au, Ag, Cu, Pt se notan pequeñas dependencias con el ángulo de incidencia ya que la eficiencia es muy alta; no así para materiales como Fe, Ta, y Mo que tienen bajos rendimientos y por lo tanto el efecto del ángulo de incidencia es notable. El rendimiento aumenta con el ángulo y llega a un máximo en ángulos entre  $60^\circ$  y  $80^\circ$ , fuera de estos límites decrece rápidamente. El grado de influencia del ángulo depende de la estructura superficial del blanco.

La figura 2.4 muestra la distribución angular de los átomos removidos para un ángulo de incidencia oblicuo. Los átomos son preferentemente expulsados hacia adelante.

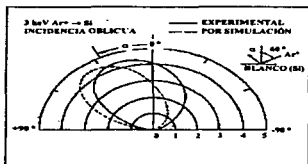


figura 2.4. Distribución angular de los átomos removidos [Vossen, 1991].

La distribución angular de los átomos removidos para un ángulo de incidencia normal, está gobernada por la ley del coseno de Knudsen, la que también es válida en el proceso de evaporación térmica. Los resultados típicos de esta distribución se muestran en la figura 2.5, en la que se sugiere que la distribución angular es "bajo cosenoidal", es decir, hay mayor material expulsado hacia los lados que en la dirección normal a la superficie del blanco. A energías altas, se aproxima a una

distribución cosenoidal, sin embargo, a energías mayores de 10keV se muestra una distribución "sobre cosenoidal".

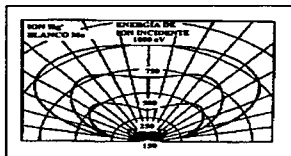


figura 2.5. Distribución angular de partículas removidas de un blanco policristalino [Vossen, 1991].

#### 2.2.4 Estructura cristalina del blanco

El rendimiento y la distribución angular de las partículas removidas se modifica por la estructura cristalina del blanco. En blancos monocristalinos en general no se observa una distribución angular uniforme. En la región cercana a la del umbral, los átomos son expulsados en la dirección de concentraciones compactas y cerradas de átomos. A niveles mayores de energía, átomos adicionales son liberados de diversas posiciones, donde los átomos vecinos interfieren con la trayectoria posible a las concentraciones de átomos, lo que causa un desvío de estas direcciones.

La dependencia angular del rendimiento de un blanco monocristalino muestra distintos picos para diversas direcciones de expulsión; la dirección de expulsión puede ser caracterizada cristalográficamente por los índices de Miller. En la figura 2.6 se muestra un ejemplo de la dependencia angular.



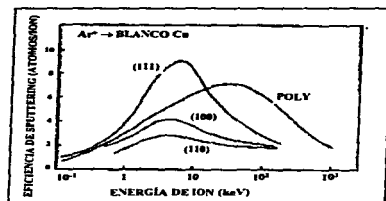


figura 2.6. Dependencia de la eficiencia del Sputtering con  $\text{Ar}^+$  en los planos (110), (100) y (111) de cobre [Vossen, 1991].

### 2.2.5 Rendimiento del Sputtering con aleaciones.

Cuando se emplea una aleación como blanco, la experiencia ha demostrado que la composición química de la película que se deposita es muy parecida a la del material del blanco, esto refuerza la idea de que el sputtering no está gobernado por un proceso térmico sino por un proceso mecánico de transferencia de momento. Cuando la temperatura del blanco se eleva tanto que la composición del blanco cambia debido a la difusión térmica, la película resultante tiene una composición distinta; aún en condiciones en las que la temperatura del sustrato se eleva, las películas resultantes muestran una composición química distinta debido a la reevaporación de las películas depositadas.

La naturaleza de los cambios en la aleación del blanco es significativa y se ha demostrado que la variación de la composición superficial de una aleación binaria A-B puede ser expresada por las siguientes relaciones [Vossen 1991]:

$$A = \left[ A_0 - \frac{S_B N_0 A_0}{A_0 S_B + B_0 S_A} \right] \text{EXP} - \left( \frac{A_0 S_B + B_0 S_A}{N_0^2} F t \right) + \frac{S_B N_0 A_0}{A_0 S_B + B_0 S_A}$$

$$B = \left[ B_0 - \frac{S_A N_0 B_0}{A_0 S_B + B_0 S_A} \right] \text{EXP} - \left( \frac{A_0 S_B + B_0 S_A}{N_0^2} F t \right) + \frac{S_A N_0 B_0}{A_0 S_B + B_0 S_A}$$

donde  $A_0$  y  $B_0$  denotan las densidades superficiales de la composición A B al inicio;  $S_A$  y  $S_B$  son los rendimientos de A y B respectivamente.  $N_0$  es la densidad atómica de la superficie del blanco, F es la densidad de corriente iónica en la superficie del blanco, y t es el tiempo. Estas relaciones fueron obtenidas suponiendo que los rendimientos de los elementos A y B son iguales al actuar como aleación o como elementos independientes. Se sabe que esta relación es válida en conjuntos de elementos cuyos pesos moleculares son parecidos.

Las ecuaciones anteriores indican que la constante de tiempo para el cambio de composición en el blanco es el exponente de la función exponencial. Además al tender t a  $\infty$  se obtiene que:

$$A \rightarrow \frac{A_0 S_B N_0}{A_0 S_B + B_0 S_A}$$

$$B \rightarrow \frac{B_0 S_A N_0}{A_0 S_B + B_0 S_A}$$

y A y B llegan a un valor constante.

Las composiciones instantáneas de las películas para A y B se expresan como las integrales desde 0 a t del producto del rendimiento por la densidad del elemento respectivo. Al hacer que t tienda a  $\infty$  se obtiene que:

$$\frac{A_s}{B_s} = \frac{A_0}{B_0}$$

Esta última ecuación sugiere que la composición de la película depositada debe tener la misma composición que el blanco en estado estable si se desprecia la difusión en el blanco, la que es poco importante a temperaturas ordinarias del proceso (unos pocos cientos de grados centígrados).

Recientemente se observó que algunas aleaciones binarias no siguen las ecuaciones anteriores, en especial, en las que interviene un elemento ligero y uno pesado, ya que la capa superficial es enriquecida por el elemento pesado. Se ha sugerido que este hecho está relacionado con la cascada de colisiones entre dos especies de aleaciones binarias en la capa superficial.

Como se ha descrito anteriormente, el cambio de la composición de la superficie del blanco es un proceso complicado y sin embargo la composición de las películas depositadas, es en general igual a la del blanco cuando éste se mantiene a baja temperatura durante el proceso de depósito.

### 2.3 Átomos removidos.

En un sistema convencional de sputtering, el material que se remueve está compuesto de átomos neutros, que están parcialmente ionizados. A energías mayores de los iones incidentes, se

incluyen grupos de átomos. En un blanco formado por una aleación, el comportamiento es similar al de los átomos de los elementos cuando se utilizan solos.

### 2.3.1 Velocidad y distancia media libre.

La energía promedio de los materiales removidos es mucho mayor que los átomos evaporados térmicamente en el vacío. Datos experimentales indican que la energía de los átomos removidos depende del tipo de ion de bombardeo y del ángulo de incidencia.

Los resultados sugieren, también, que al aumentar la energía de los iones incidentes, las pérdidas de energía en el blanco también aumentan, por lo que el aumento de energía de los iones incidentes no se transfiere de manera efectiva a los átomos removidos.

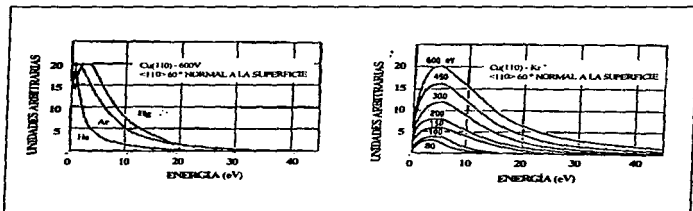


figura 2.7. Distribución de energía de átomos removidos por iones de distinta energía [Vossen, 1991].

En el fenómeno de sputtering, así como en muchos otros procesos, es de gran importancia el medio en el que se lleva al cabo. La presión es de gran importancia, la presión base del sistema debe ser menor a  $10^{-6}$  Torr para asegurar la limpieza del sistema en general (sustrato y cámara de depósito) y prevenir reacciones no deseadas del material de depósito con las impurezas, en este sentido también influye la pureza del gas de trabajo. La presión de trabajo debe ser mayor a  $10^{-3}$  Torr y menor a  $10^{-1}$  Torr para tener suficientes átomos de gas para ionizar, generar la descarga y tener un bombardeo numeroso de iones al blanco.

Además, se debe tener un camino libre medio de orden mayor al camino que los átomos tienen que recorrer del blanco al sustrato. El camino libre medio es la distancia promedio, calculada de manera estadística, que podemos asegurar puede recorrer una partícula sin que sufra un choque con otra partícula.

El concepto de camino libre medio está asociada con la teoría cinética de los gases que se formula a través de los siguientes postulados:

Un gas está compuesto de un gran número de partículas llamadas moléculas. Dichas moléculas están en un estado de constante movimiento rápido y caótico; además están separadas distancias mucho mayores en comparación al orden de sus dimensiones. Se supone que las moléculas no están sujetas a la acción de fuerzas externas a ellas excepto durante los choques.

La mayor parte de los átomos removidos pasan por la zona de descarga en forma de átomos neutros. Su camino libre medio antes de chocar con la zona de descarga es:

$$\lambda = \frac{c_f}{v_{f2}}$$

donde  $c_1$  es la velocidad promedio de los átomos removidos y  $v_{12}$  es la frecuencia promedio de colisiones entre los átomos removidos y las moléculas del gas y es:

$$v_{12} \approx \pi(r_1 + r_2)^2 c_1 n_2$$

donde  $r_1$  y  $r_2$  son los radios atómicos y  $n_2$  es la densidad del gas de descarga. De este modo el camino libre medio es:

$$\lambda_1 \approx \frac{l}{\pi(r_1 + r_2)^2 n_2}$$

#### 2.4 Sistemas de sputtering.

Los sistemas de sputtering utilizan los distintos principios para el autosostenimiento de descargas gaseosas para las distintas configuraciones de los sistemas. de esta forma el diodo plano utiliza la descarga gaseosa simple; el triodo utiliza la descarga sostenida térmicamente y el magnetrón la descarga sostenida magnéticamente.

El diodo plano es la fuente de sputtering más simple; en este arreglo, el cátodo es generalmente un disco del material de interés. El blanco está térmicamente adherido a una placa enfriada con agua. Se utiliza un blindaje a tierra para evitar erosión en las partes laterales y para montarlo al cuerpo principal. Una ventaja de este arreglo es el uso eficiente que se le da al blanco ya que los electrodos pueden ser de gran tamaño, el campo entre ellos es muy uniforme y el flujo de iones es constante sobre el blanco. Su mayor desventaja es la ineficiencia en el uso de electrones

secundarios, provocando que la película en crecimiento sea bombardeada por electrones de alta energía y el sustrato sufra un calentamiento. Por esta razón solo se puede obtener una baja velocidad de crecimiento.

En el arreglo de triodo, un filamento es agregado al arreglo anterior; este filamento se alimenta con una diferencia de potencial, la que provoca un aumento en la temperatura y puede proveer de electrones a la descarga, y permite el auto-sostenimiento de manera independiente al blanco. La eficiencia de ionización de este sistema es mayor que la del diodo simple. Como resultado, se aumenta la velocidad de crecimiento, pero la desventaja principal es la vida útil del filamento en el caso de gases reactivos de descarga.

La fuente de sputtering más eficiente es el magnetrón, que consiste en agregar un campo magnético paralelo a la superficie del blanco adicional al campo eléctrico normal al blanco que se establece por medio de un potencial negativo con respecto al blanco. El efecto combinado de estos campos ortogonales es confinar a los electrones a rutas cíclicas alrededor del blanco mientras son libres de moverse paralelamente al blanco. Estos electrones producen iones por las colisiones con los átomos del gas de trabajo. Los iones no son significativamente afectados por el campo magnético debido a que su masa es mucho mayor que la de los electrones y son acelerados hacia el blanco. Los electrones pierden energía por su acción ionizante y finalmente se difunden por las colisiones que sufren a través de las líneas de fuerza magnética.

El magnetrón se caracteriza por su baja impedancia por lo que sus fuentes de CD o RF deben ser de voltaje o corriente constante y deben estar protegidas contra arcos.

La presión de trabajo y la geometría del sistema determinan si los átomos removidos seguirán una trayectoria directa, conservando casi toda su energía, o se difundirán llegando con solo

una energía térmica. En general, se aplica una condición intermedia. Debido a que la difusión es un proceso estadístico, se presenta una distribución de trayectorias y energías.

En estos sistemas la elevación de temperatura en el sustrato se debe al confinamiento de electrones, de material removido y átomos neutros reflejados.

## 2.5 Factores que afectan la velocidad de depósito.

**Corriente y Voltaje.** En el intervalo de energía empleados para el depósito de películas, la eficiencia mejora al incrementar la energía iónica hasta cierto punto. Por otro lado el número de proyectiles es proporcional a la densidad de corriente, por lo tanto la corriente es más importante que el voltaje para determinar la velocidad de depósito. Cuando se tiene una potencia limitada es mejor trabajar con una alta corriente y un bajo voltaje. Esto se puede lograr con una descarga sostenida de manera térmica o magnética o trabajando a una presión mayor.

**Presión de Trabajo.** Al aumentar la presión en un sistema de sputtering, la densidad iónica aumenta y por lo tanto, la densidad de corriente también aumenta. De acuerdo con lo dicho anteriormente, al aumentar la presión aumenta linealmente la velocidad de depósito. La corriente también aumenta linealmente pero a una velocidad un poco mayor. Esto se debe a que el material removido que se regresa al cátodo por difusión aumenta con la presión. Este proceso es más importante en intervalos de presión mayores de 130mTorr. Así cuando la presión de trabajo aumenta hasta este límite, la velocidad de depósito también aumenta, pero al seguir aumentando la presión la velocidad decrece por los efectos de la difusión. En conclusión, la presión de trabajo debe estar bajo el límite de 130mTorr por los efectos de difusión.



**Impurezas Gaseosas.** Algunas de las múltiples impurezas en el gas de trabajo pueden provocar una reducción en la velocidad de depósito. Gases como el dióxido de carbono y el vapor de agua son descompuestos por la descarga gaseosa y su efecto es similar al del oxígeno puro. El monóxido de carbono aumenta ligeramente la velocidad de depósito, posiblemente porque remueve rastros de oxígeno del gas. El nitrógeno no tiene efecto apreciable.

El hidrógeno tiene un efecto de "robo de corriente". Debido a su gran movilidad, el hidrógeno se lleva parte de la corriente iónica pero no produce la remoción de material del blanco. Así parte de la corriente que se puede medir en un sistema puede ser llevada por proyectiles que no producen material para la película. Este efecto se observa también con el helio.

El efecto del oxígeno se observa en metales y óxidos. Estos materiales están compuestos por capas de algún elemento y de oxígeno, al remover la capa de oxígeno por sputtering, la capa es renovada inmediatamente por el oxígeno en el medio gaseoso. Así teóricamente no se podría pasar de esta capa de oxígeno. En la práctica, el efecto es la reducción de la velocidad de depósito hasta por la mitad.

## 2.6 Aplicaciones.

Las aplicaciones del sputtering se dividen en dos categorías; aquellas en donde el interés se centra en el material removido de la superficie del cátodo y aquellas en donde el material de interés es el material remanente en el cátodo. A pesar de esta división, las dos categorías están interrelacionadas por lo que ambos aspectos deben considerarse en cualquier aplicación.

El interés primordial del Instituto de Física es la preparación de películas delgadas con el material removido del cátodo, pero no debemos olvidar el material remanente ya que este material es el que servirá como blanco para los subsecuentes depósitos.

El campo de aplicación del sputtering es muy amplio por lo que sólo mencionaremos algunas aplicaciones sobresalientes.

Los depósitos de películas delgadas preparadas con este método se utilizan en la electrónica para la fabricación de circuitos, fotodetectores y la preparación de superconductores; en la óptica, para la producción de espejos; en la industria decorativa, para recubrir distintos objetos y en la industria automotriz, para el recubrimiento de plásticos para obtener mayor resistencia.

El sputtering se utiliza para el grabado de patrones definidos, formación de perfiles para análisis y en el análisis de superficies es común utilizarlo para lograr una limpieza óptima de las muestras.

El fenómeno de sputtering es la base de los métodos de análisis de espectrometría de masas por ion secundario, espectrometría de masas por descarga gaseosa y de la espectrometría óptica por descarga gaseosa. Finalmente, este fenómeno ha servido para ayudar a explicar ciertos sucesos en la naturaleza, como la erosión lunar por el viento solar.

### 3. TRANSDUCCIÓN Y MEDICIÓN DE VARIABLES.

#### 3.1 Medida del vacío.

La medida de presión por debajo de la atmosférica se puede obtener de múltiples formas; cada método, será de acuerdo a las condiciones de operación y para un intervalo definido.

Los manómetros se dividen en directos (como el McLeod y el diafragma) con los que se obtiene una medida directa de la fuerza por unidad de área; y en indirectos (como los térmicos y los de ionización), que utilizan una variable intermedia que cambia conforme a la variación de la presión. La figura 3.1, muestra un cuadro con la clasificación de los manómetros y posteriormente, se da una explicación de los más usuales.

INSTRUMENTO	VARIABLE MEDIDA	DEPENDENCIA AL TIPO DE GAS	INTERVALO APROXIMADO DE MEDICIÓN [Torr]
Manómetro de tubo en U.	Altura de una columna de Hg.	No	760-1
Manómetro de Bourdon.	Deflexión de una pared delgada o diafragma.	No	760-1
Manómetros capacitivos.	Capacitancia en función de la posición de un diafragma.	No	$760 \cdot 10^{-3}$
Tubo de descarga.	Apariencia y color de una descarga gaseosa.	Si	$10 \cdot 10^{-3}$
Manómetro McLeod.	Volumen de una cantidad conocida de un gas conocido después de una compresión.	No	$10 \cdot 10^{-3}$
Termopar.	Temperatura de un filamento en función de la presión.	Si	$10 \cdot 10^{-3}$
Pirani.	Resistencia de un filamento en función de la presión.	Si	$1 \cdot 10^{-3}$
Ionización. Cátodo caliente: Triodo. Schulz-Phelps Bayard-Alpert. Redhead. Klopfer. Helmer. Lafferty.	Corriente iónica producida por la emisión constante de electrones.	Si (Todos los tipos)	$1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{17}$ $1 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{11}$ $1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{11}$ $1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{12}$ $1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{12}$
Ionización. Cátodo frío: Penning. Reedhead.	Corriente de una descarga gaseosa.	Si (Todos los tipos)	$1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{13}$ $1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{12}$

figura 3.1. Clasificación de manómetros.

### 3.1.1 Manómetro de McLeod.

Este manómetro se ilustra en la figura 3.2. El depósito móvil baja hasta que la columna de mercurio baja de la abertura O; entonces, el bulbo V y el tubo capilar C quedan a la misma presión que la fuente de presión  $p$ . Posteriormente, el depósito se eleva hasta que el mercurio llega a la marca de cero en el tubo de referencia. La medida de la presión se obtiene a partir de la diferencia de alturas ( $h$ ) con el capilar C. Este manómetro es absoluto, por lo que se utiliza como patrón para calibrar otros tipos de manómetros, pero es muy frágil y presenta problemas por la condensación de vapores y los efectos mecánicos debido a temperaturas altas.

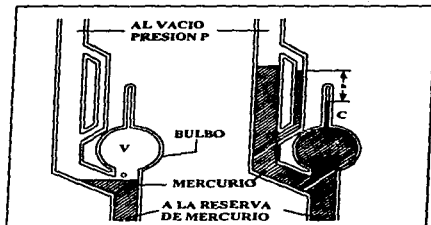


figura 3.2. Manómetro de McLeod

### 3.1.2 Manómetro de Diafragma.

Los manómetros de diafragma miden diferencia de presiones, están formados por membranas muy finas que forman parte de la pared del sistema de vacío, de forma que cuando cambia la presión interna con respecto a la externa, cambia la posición del centro del diafragma y

esta variación se registra en un mecanismo sensible; por ejemplo, se puede usar un diafragma como una de las placas de un condensador. Estos manómetros tienen un intervalo de operación de  $10^{-4}$  a 50 Torr y presentan la ventaja de medir presiones absolutas pero no son recomendables para temperaturas altas.

### 3.1.3 Manómetro Alfastrón.

En este manómetro, se usa una fuente radioactiva que emite partículas alfa que ionizan el gas; la corriente de iones resultante es proporcional a la densidad del gas. Consiste en dos cámaras de ionización de tamaños diferentes que cubren las décadas completas de  $10^{-3}$  a  $10^3$  Torr; la sensibilidad es función del gas. Sus ventajas son: la ausencia de filamento caliente y la extensión del rango de medida a altas presiones, aunque existe un pequeño riesgo por la radiación.

### 3.1.4 Sensores y Manómetros Térmicos.

El principio de operación es la conductividad térmica de un gas en función de su presión y sólo son capaces de medir hasta  $10^{-3}$  Torr. Los sensores tienen dos elementos básicos, un elemento para calentar y un sensor de temperatura; si el proceso al que se va a medir la presión presenta cambios de temperatura, se utilizan elementos de compensación para eliminar el error. Existen dos diseños de manómetros térmicos, el de termopar y el detector de variación resistencia.

La figura 3.3 ilustra el de termopar. Una fuente constante de CD o CA calienta un elemento (alambre) al que se suelda el termopar para obtener una medición de temperatura. La salida del termopar es proporcional a la presión del gas.

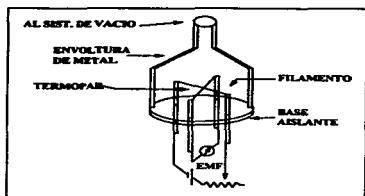


figura 3.3. Manómetro termopar.

La figura 3.4 ilustra el manómetro detector de variación de resistencia, también llamado Pirani. En este dispositivo la medición se obtiene a partir de la variación de la resistencia del material del elemento que se calienta (generalmente un filamento de tungsteno, platino u otro material). La medición de la resistencia se hace con un circuito puente apropiado y con respecto a otro filamento del mismo material sellado en un compartimiento a un alto vacío; El puente se calibra para que existan cero volts en el amperímetro cuando el filamento que va al sistema está a  $1 \times 10^{-4}$  Torr o menos; para compensar las variaciones posibles por efectos ambientales se introduce el filamento de referencia sellado en el mismo compartimiento del filamento de medición. Estos dispositivos requieren de una calibración empírica y tienen un intervalo de trabajo de 1 mTorr a 1 Torr. Esto se debe a que a presiones inferiores a la de este intervalo las pérdidas de calor por radiación, sobrepasan las pérdidas por la conductividad del gas, además la respuesta transitoria es deficiente ya que para llegar a un equilibrio térmico toma varios minutos. A presiones mayores que

las del intervalo señalado, los cambios de conductividad térmica son pequeños comparados con los cambios de presión.

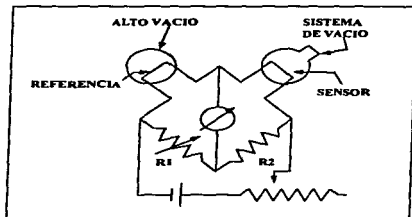


figura 3.4 . Manómetro Pirani

### 3.1.5 Manómetros de Ionización.

Prácticamente todas las mediciones de presión por debajo de 1 mTorr están en función de la ionización del gas residual. Para inducir la ionización, se debe inyectar electrones con una energía mayor a la de ionización del gas. Si estos electrones chocan con partículas de gas, existe la probabilidad de que se ionice, esta probabilidad es función de la energía de los electrones y de la naturaleza del gas. Con una energía del orden de 150 eV se presenta una máxima probabilidad de ionización [Maissel, 1970].

Los iones positivos son acelerados a un colector y la corriente resultante se toma como una medida de la densidad del gas residual y por consiguiente de la presión.

La ionización se puede lograr, fundamentalmente, por dos métodos: uno consiste en la emisión de electrones por un filamento caliente y el otro consiste en obtener una descarga gaseosa sostenida por medio de un campo eléctrico intenso y monitorear la corriente de iones positivos.

#### 3.1.5.1 Medidores de cátodo caliente.

El método del filamento es llamado cátodo caliente y existen varias versiones. El más antiguo es el de triodo, que consiste en un filamento, una rejilla y un colector alrededor de las dos primeras; en este modelo los electrones son atraídos por la rejilla, donde la mayoría logra pasar a través de ella. En el espacio entre la rejilla y el colector, la dirección de los electrones se invierte debido a la dirección del campo eléctrico, por lo tanto los electrones siguen rutas cíclicas hasta que chocan con la rejilla. A lo largo de su trayectoria, algunos electrones forman pares ion-electrón. Los iones positivos de gas son atraídos al colector y generan una pequeña corriente. Si la corriente de emisión del filamento se mantiene constante, la corriente iónica es proporcional a la presión. Esta relación lineal decae a presiones mayores que 1 mTorr debido a que aumenta la frecuencia de choques; como resultado, sólo se producen electrones de baja energía incapaces de ionizar al gas.

A presiones muy bajas, esta geometría está limitada por el efecto de rayos X; ya que la rejilla es bombardeada por electrones con una energía aproximada de 150 eV y con una intensidad igual a la corriente de emisión, estos electrones producen rayos X que pueden chocar contra el colector y causar la emisión de fotoelectrones. La corriente generada por esta emisión se suma a la de los iones positivos que chocan con el colector, por lo que cuando la emisión de electrones secundarios deja de ser despreciable con respecto a la corriente iónica, la corriente en el colector deja de ser proporcional a la presión.



Para ampliar el intervalo de operación de estos medidores se busca minimizar el efecto de rayos X, esto se ha logrado con los siguientes cambios: drástica reducción del área del colector, separación física y blindaje de los electrodos colectores de iones y electrones, y el uso de un campo magnético para alargar las trayectorias de los electrones.

El medidor Bayard-Alpert presenta el primer cambio. En este medidor la posición del filamento y del colector están invertidos con respecto al medidor de triodo y el colector se ha reducido a un delgado alambre en el centro de la rejilla helicoidal. El intervalo en que se ha demostrado su linealidad es de  $10^{-3}$  a la  $10^{-10}$  Torr.

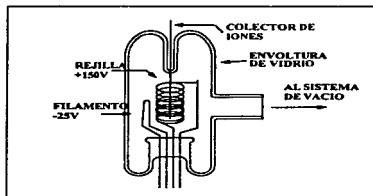


figura 3.5. medidor de ionización de cátodo caliente tipo Bayard-Alpert.

### 3.1.5.2 Medidores de cátodo frío.

El arreglo principal de este tipo de medidor se muestra en la figura 3.6, en él, un potencial de CD de 2 kV se mantiene entre el ánodo con forma de anillo y las dos placas que forman el cátodo, con lo que se inicia la ionización. Los iones positivos chocan contra el cátodo y desprenden electrones secundarios para una mayor ionización del gas, con lo que se obtiene una descarga auto-

sostenida. Las partículas cargadas se confinan en el espacio entre los electrodos a través de un campo magnético y hacen que los electrones viajen en trayectorias espirales, esto permite que la descarga se pueda mantener hasta  $5 \times 10^{-6}$  Torr. Por otro lado, los iones positivos son afectados en muy poca medida por el campo magnético, por lo que viajan directamente al cátodo. La corriente total de la descarga, formada por la corriente de los iones positivos y por la emisión de electrones, se utiliza como medida de la presión. La ventaja de este medidor es la ausencia del filamento caliente y su insensibilidad a la exposición al aire. Sus desventajas son la dificultad para iniciar la ionización a bajas presiones y las oscilaciones en la corriente debido a los cambios en el plasma.

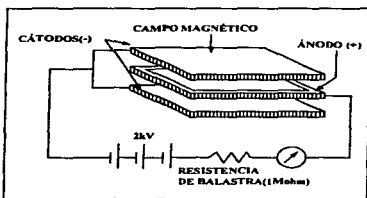


figura 3.6. Arreglo principal del medidor de cátodo frío.

Otro diseño se muestra en la figura 3.7; el cátodo tiene forma de carrete con cilindro central delgado y dos discos, el ánodo es un cilindro con perforaciones para la admisión de gas al interior del medidor. Los potenciales de los electrodos y el campo magnético se escogen de tal manera que los electrones permanezcan en la cavidad. Al ionizarse el gas, los iones viajan directamente al cátodo, mientras los electrones siguen trayectorias espirales, chocan con el ánodo y emiten rayos X;

esta secuencia es proporcional a la densidad de las partículas, por lo tanto, la corriente de emisión es pequeña y no tiene un límite inferior de medición por el efecto de rayos X. se ha comprobado que este medidor es eficiente en el intervalo de  $10^{-3}$  a  $10^{-12}$  Torr, donde tiene respuesta ligeramente no lineal de la forma:  $I_e = Kp^n$ ;

donde n es aproximadamente 1.1.

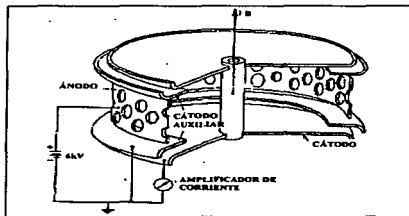


figura 3.7. Medidor de cátodo frío

### 3.1.6 Analizador de Gas residual.

Como en algunos de los procesos que se llevan a cabo en sistemas de vacío es necesario conocer y controlar los gases residuales y las fuentes de degasificación, es necesario incluir dentro del equipo de monitoreo algún sistema que mida las presiones parciales de los gases residuales.

La medición de las presiones parciales se realiza con espectrómetros de masas, que tienen la capacidad de separar moléculas ionizadas de distinta relación masa-carga y medir las correspondientes corrientes iónicas. Dichos espectrómetros se llaman analizadores de gas residual

(RGA), sus características principales son: alta sensibilidad y capacidad para hornearse, por lo tanto se puede identificar gases con muy bajas presiones parciales sin que la contribución del medidor mismo los afecte. Todos los RGA consisten de tres partes fundamentales: un ionizador, un analizador y un detector; la diferencia principal entre ellos es el principio físico para separar las moléculas. La ionización y la detección son similares e independientes del analizador.

Para evaluar los distintos tipos de analizadores, se tienen los siguientes parámetros:

-Sensibilidad. Es la razón entre la corriente iónica y la presión, es una figura de mérito que no es directamente observable. Una cantidad más útil es la sensibilidad en unidades de presión por división de escala del instrumento, ya que ésta toma en cuenta la capacidad del sistema de detección y lo relaciona directamente con la presión mínima que el dispositivo puede mostrar.

-Velocidad de barrido. Es la velocidad con la que un instrumento puede analizar los haces de iones de todas las masas en un intervalo establecido para dar como resultado un espectro. Se expresa en segundos por pico de masa o segundos por intervalo de masa.

-Resolución. Define la habilidad para identificar de manera separada partículas que difieren por una unidad de masa atómica. El uso de este término no es uniforme: una definición enfatiza la identificación cualitativa, considera la altura de un valle entre dos picos adyacentes de igual magnitud y traslapadas (figura 3.8); la otra definición es más significativa para la evaluación de los espectros del RGA ya que considera la contribución de la cola de un pico de masa a otro pico adyacente de igual magnitud (figura 3.9).

-Intervalo de masas. Indica el intervalo de masas moleculares o atómicas que un instrumento puede cubrir sin problemas de resolución; en general, es mayor que el intervalo de resolución.

La conversión de gas residual a iones positivos se logra a través de colisiones con un haz de electrones que provienen de un filamento. Estos aparatos requieren de una presión de operación menor a  $10^{-4}$  Torr; ya que el filamento se destruye si se expone a gases reactivos como el oxígeno.

Los analizadores se pueden clasificar en dos grupos genéricos; la primera categoría emplea campos magnéticos en conjunción con campos eléctricos estáticos o de RF, donde los iones se fuerzan a recorrer trayectorias espirales cuyo radio de curvatura depende de la masa si todos los iones tienen el mismo momento, por lo que para un potencial dado se detectan los átomos o moléculas de un material llegando al colector y al variar el potencial de aceleración se logra que iones de distintos materiales lleguen al colector en tiempos distintos y formar un espectro. Los más representativos son el analizador Dempster, el sector magnético, el analizador cicloidal y el omegatrón. La segunda categoría son los analizadores dinámicos o filtros de masas, que varían el campo eléctrico que utilizan para que las moléculas de distinta relación masa-carga lleguen sucesivamente de manera predecible. Los más representativos son el cuadrupolo el monopolo y el analizador de tiempo de vuelo. Sus ventajas son la excelente resolución con moléculas de masas grandes y las altas velocidades de barrido.

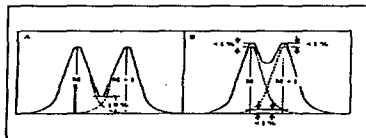


figura 3.8 y 3.9. Resolución de un RGA. (A). 10% de resolución de valle en masa M.

(B). contribución del 1% del traslape de dos picos. para masa M

Los distintos tipos de analizadores se ilustran en la figura 3.10. En el analizador Dempster y en el sector magnético de 60° los iones se aceleran por un campo eléctrico contra una ranura y entran al campo magnético; después de una deflexión de 180° pasan por una segunda ranura y, los que tengan la masa correspondiente al radio de curvatura, terminan chocando con el colector. El poder de resolución de estos analizadores depende de su tamaño y su sensibilidad está en el intervalo de  $10^{-10}$  a  $10^{-11}$  Torr por división si se utilizan electrómetros (se puede ampliar a  $10^{-14}$  si se utiliza un multiplicador de electrones) y su velocidad de barrido es aproximadamente del orden de minutos/intervalo de masa.

En el analizador cicloidial, los iones viajan a través de campos magnéticos y eléctricos cruzados y los iones adquieren una velocidad de arrastre proporcional a la razón de los campos (independiente de la masa iónica). Una combinación de esta velocidad de arrastre y el movimiento circular inducido por el campo magnético enfocan a los iones de igual masa por la ranura del colector después de una deflexión de 360°. Estos analizadores tienen el doble del poder de resolución teórico de los Dempster o del sector magnético de igual tamaño, algunos poseen una resolución hasta de masa 150. Su sensibilidad es aproximadamente de  $10^{-11}$  a  $10^{-12}$  Torr por división y además poseen velocidades de barrido ajustables desde 10 seg. hasta varios minutos.

El omegatrón es un instrumento barato compacto y de construcción simple, donde los iones se generan a lo largo del campo magnético y sólo si tienen energía térmica giran en órbitas circulares. Al aplicar un pequeño voltaje de RF, la mayoría de los iones ganan y pierden energía de manera alterna. Sin embargo, si la frecuencia de la señal de RF iguala la frecuencia de resonancia para una masa en particular, ésta empieza a ganar energía continuamente y giran en espiral hasta

chocar con el colector; de esta manera, al variar la frecuencia de RF se puede lograr la separación de iones. El poder de resolución de los omegatrones aumenta con el número de revoluciones que el ion pueda hacer; pero las trayectorias largas aumentan la densidad iónica y producen cargas espaciales con la consecuente inestabilidad en la operación, por lo que los omegatrones trabajan mejor con moléculas de baja masa y alta velocidad angular. La sensibilidad es de  $10^{-11}$  Torr por división y la velocidad de barrido es del orden de segundos por pico de masa.

En los cuadrupolos se conectan varillas a fuentes de CD y RF y los iones son acelerados a través del espacio axial que se forma entre las varillas. Para un espacio definido entre las varillas, se escogen los voltajes de CD y RF de manera que sólo las moléculas de una masa específica puedan oscilar de manera estable en el espacio y lleguen al colector, las partículas de otras masas terminan en la superficie de las varillas. El barrido y la separación de masas se logra ajustando la frecuencia de RF. La razón de los voltajes de CD y RF puede ajustarse para aumentar la sensibilidad pero al mismo tiempo se disminuye el poder de resolución. En el monopolo se utiliza el mismo principio pero en éste solo se utiliza una varilla en forma de V. Estos instrumentos tienen multiplicadores de electrones por lo tanto su sensibilidad es de  $10^{-14}$  a  $10^{-15}$  Torr por división, la resolución de valle es de masa 1 hasta masa 250 y su velocidad de barrido va desde milisegundos por pico de masa hasta algunos minutos por pico de masa.

En los analizadores de tiempo de vuelo, los iones son acelerados con igual energía a un tubo de deriva libre de campos. De este modo, las moléculas de menor masa llegan antes al colector que las de masas mayores; además el haz de electrones es modulado por pulsos para producir pequeñas ráfagas de partículas separadas según la masa y el tiempo de vuelo de la partícula. Debido a su funcionamiento, este analizador tiene una velocidad de barrido muy alta, que es

aproximadamente de 100 microsegundos por espectro; su resolución es hasta de masa 400 y su sensibilidad no es particularmente alta (del orden de  $10^{-12}$  Torr) debido a la modulación por pulsos.

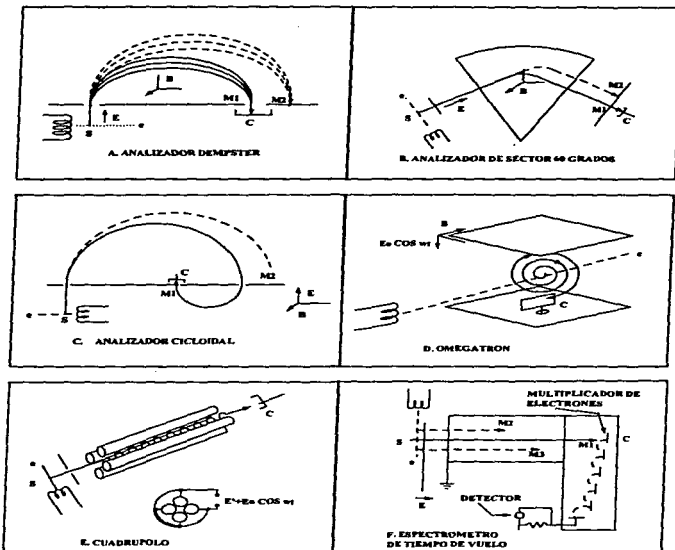


figura 3.10. Analizadores de gas residual.



### 3.2 Medición de espesor.

Existen muchos métodos para determinar el espesor de una película; todos tienen sus limitaciones y son aplicables según las características de la película a la que se le vaya a medir el espesor y a su sustrato. Algunas características que determinan el uso de un método son: el espesor que se pretende medir, la transparencia de la película, la dureza de la película, la uniformidad del espesor, la regularidad de la superficie del sustrato, las propiedades ópticas del sustrato y el tamaño del sustrato entre otras.

Los métodos para la medición de espesores se dividen en ópticos, mecánicos, magnéticos, eléctricos, por radiación y piezoeléctricos.

#### 3.2.1 Métodos ópticos.

Los métodos ópticos son comunes para la medición de espesores de películas delgadas debido a que éstos son comparables a la longitud de onda de la luz.

##### 3.2.1.1 Técnicas de interferencia óptica.

La figura 3.11 muestra un esquema de la interferencia en una película transparente. Parte del rayo  $B_0$  se refleja en la superficie y forma el haz  $B_{12}$ ; parte de este haz se refleja en el límite de los medios 2 y 3 y dan lugar al haz  $B_{23}$ . La interferencia entre estos haces se produce si los límites de los medios no son muy reflejantes. En la figura 3.11 los índices de los 3 medios son  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$ ; el ángulo de incidencia en el medio 1 es  $\Theta_1$ ; el ángulo de refracción en el medio 2 es  $\Theta_2$ ;  $d$  es el espesor de la película;  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación en vacío; y  $k_3 = K_3 \lambda / 4\pi$  es el coeficiente de extinción del medio 3, donde  $K_3$  es el coeficiente de absorción del medio 3 para la longitud de onda  $\lambda$ .

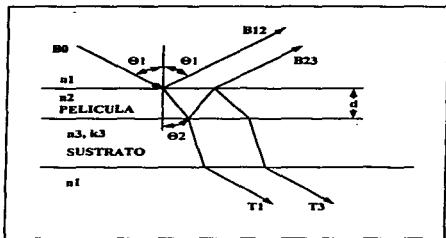


figura 3.11. Diagrama de haces reflejados y transmitidos de una película transparente.

De la figura 3.11 sabemos que la diferencia de la longitud de las trayectorias ópticas entre dos haces es  $2n_2d \cos \Theta_2$ . Si esta diferencia es  $N\lambda$ , donde  $N$  es un entero, los dos haces reflejados estarán en fase produciéndose una interferencia constructiva. Si  $N$  son medios enteros ( $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ , etc.), los haces estarán desfasados  $180^\circ$  y el resultado será una interferencia destructiva (se denota que los cambios de fase en la reflexión se dan simultáneamente en los límites de los dos medios). Las condiciones extremas se representan por:

$$N\lambda = 2n_2d \cos \theta_2 = 2d(n_2^2 - \sin^2 \theta_1)^{1/2}$$

La diferencia de la longitud de las trayectorias entre dos haces sucesivos puede representarse como un atraso de la fase:

$$\beta' = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_2d \cos \theta_2 = 2N\pi$$

Se observa que existen diversas formas para hacer que la luz reflejada sufra variaciones periódicas y con ello se formen bordes o franjas.

La claridad de las franjas aumenta de manera marcada si la interferencia es de haces múltiples; lo que puede lograrse si las reflectividades de los límites de los dos medios son muy altas. Si el material por el que se va a transmitir el haz tiene una baja absorción, la claridad de las franjas aumenta.

Los métodos de medición de espesores por la interferencia de haces múltiples difieren por la manera en que forman sus franjas. Las franjas Fizeau se generan por una luz monocromática y se presenta como contornos de igual grosor surgiendo en un área de espesores variables  $t$  entre dos placas de vidrio, esto se logra si se colocan los vidrios de tal manera que formen una pequeña cuña a un ángulo  $\alpha$ ; así que  $t$  varía entre las placas. Las franjas FECO (franjas de orden cromático igual) se obtienen con una luz blanca a un ángulo de incidencia de  $0^\circ$  y la luz blanca reflejada o transmitida es dispersada por un espectrógrafo con lo que se varía la longitud de onda y las franjas sólo se forman para ciertos valores de  $t/\lambda$ . Los espacios entre franjas en el interferograma son inversamente proporcionales al espesor.

Estos métodos se pueden utilizar para películas transparentes u opacas pero, requieren de un escalón o canal en la película; que el sustrato sea plano y liso, que la película en sí sea muy lisa para la formación de franjas y que la película no se distorsione si se necesita depositar una capa de material reflejante.

Otros métodos de interferencia son los métodos de Michelson y Nomarski. El método de Michelson se ilustra en la figura 3.12. La luz de la fuente luminosa  $L$  se colima en el objetivo  $O_1$  después se divide en el cristal  $S$ , los dos haces obtenidos son de la misma intensidad. El haz vertical

se refleja en el punto B del espejo  $M_1$  y de regreso hacia A a través de S y hacia el objetivo  $O_2$ ; el segundo haz pasa a través de S para reflejarse en D y de regreso a A donde también se refleja a  $O_2$ . Los dos haces combinados apropiadamente dan lugar a una serie de franjas de interferencia que se pueden observar en E. En este sistema, C y S son del mismo espesor y tipo de vidrio para obtener dos haces idénticos.

Si  $M_1$  se sustituye por una película reflejante y se utiliza una luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$ , entonces el espesor se determina con la relación  $d = \Delta N \lambda / 2$ , donde  $\Delta N$  es la altura del escalón en franjas.

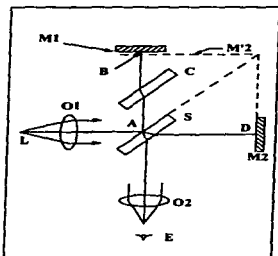


figura 3.12. Esquema de un interferómetro de Michelson.

En el método de Nomarski, un haz polarizado linealmente incide sobre la muestra y se refleja del mismo; este haz es dividido por un prisma de Wollaston<sup>1</sup> en dos haces de igual intensidad y con sus vectores normales entre sí, después de pasar por un segundo polarizador (el analizador), los haces son reorientados a la misma dirección. La división del prisma de Wollaston permite que los dos haces formen imágenes desplazadas lateralmente entre sí y presentan una diferencia de fase entre los frentes de onda, por lo que la muestra genera su propia referencia. Para la medición de espesores, se requiere de un escalón y las franjas de la altura del escalón se forman por el desplazamiento lateral y la interferencia. El control en este método se realiza variando el espacio entre las franjas o variando la distancia de las trayectorias ópticas.

La comparación de color es un método de medición no destructivo para películas transparentes. Consiste en la comparación de una película, con un calibrador formado por películas de distintos espesores pero con un índice de refracción similar a la de la muestra.

Otro método de este tipo se llama CARIS (espectroscopia de interferencia por reflexión a ángulo constante). Consiste en una radiación que se refleja de la muestra en un espectrómetro y las franjas formadas son función de la longitud de onda. En el método VAMFO (observación de franjas monocromáticas con ángulo variable) se forman las franjas por la variación de el ángulo de observación.

Estos métodos de interferencia generalmente requieren superficies reflejantes por lo tanto las mediciones no se logran durante el depósito ni generan una señal manejable para el control de espesores.

---

<sup>1</sup> En prisma de Wollaston es un polarizador de luz que divide el haz de entrada en dos haces separados de salida con polarizaciones ortogonales. La separación de los haces de salida es casi simétrica al eje óptico

### 3.2.1.2 Elipsometría.

Este método se utiliza en películas muy delgadas o para una medición muy exacta de películas gruesas. Se basa en la evaluación del cambio del estado de polarización de la luz reflejada desde un sustrato. El estado de polarización se determina por la amplitudes relativas de las componentes paralela ( $\rho_p$ ) y perpendicular ( $\rho_s$ ) de la diferencia de la radiación y la fase de dos componentes  $\Delta_p$ - $\Delta_s$ . En un haz reflejado, la razón de las amplitudes y la diferencia de fases dependen de las constantes ópticas del sustrato y la película; del ángulo de incidencia y del espesor de la película. Conociendo las constantes se puede determinar el espesor.

### 3.2.1.3 Otros métodos ópticos.

El espesor se puede determinar con las intensidades de las bandas de absorción características. La densidad óptica no es totalmente lineal al espesor así que es mejor utilizar la intensidad de la banda integral. Este método no se recomienda por que la forma de la banda varía con las condiciones de cada depósito.

### 3.2.2 Métodos Mecánicos.

Los métodos mecánicos son los más antiguos que existen; sin embargo, ya que estos métodos involucran otras propiedades de la película, actualmente se utilizan para medir dichas propiedades y el espesor se determina por algún otro método.

El método gravimétrico es el más antiguo de todos; consiste en pesar el sustrato antes y después de realizar el depósito, el espesor se determina con la siguiente relación:

$$d = \frac{100W}{Ap}$$

donde  $W$  es la diferencia de pesos en microgramos,  $A$  el área de la muestra en  $\text{cm}^2$  y  $\rho$  es la densidad de la película en gramos por centímetro cúbico.

Existen grandes dificultades en este método, aún con un sustrato liso y de una geometría simple; la exactitud es del orden de  $\pm 1\%$ ; además el sustrato no debe afectar su peso durante el proceso de depósito, no debe ser propenso a astillamientos y la acumulación del material en el sustrato sólo debe ser de la película; finalmente, la densidad depende de las condiciones de depósito y debe conocerse con exactitud para obtener mediciones exactas. Hoy en día, este método se utiliza en los laboratorios para determinar la densidad en lugar del espesor de las películas.

Existen varios métodos para la medición de espesores que utilizan un estilete. Estos métodos requieren de un escalón en la película ya sea por enmascaramiento de una parte del sustrato durante el depósito o por la remoción de parte de la película una vez finalizado el mismo.

En principio, se requiere de un instrumento para comparar los movimientos verticales del estilete al cruzar la superficie de la película contra los movimientos de una "zapata" sobre una referencia. Este método se utiliza más para determinar la rugosidad y el terminado superficial de las películas que el espesor de las mismas.

Se puede utilizar el seccionamiento para determinar el espesor de una película, midiendo directamente su borde; cuando la película tiene un espesor de más de 1 micrómetro, la medición se puede realizar con un microscopio; si es demasiado delgada se realiza un corte con un ángulo para aumentar el borde de la película. También se necesita tratar químicamente la película y el sustrato con colorantes para hacer que la diferencia entre ellos sea mayor, el espesor de la película con este método es:

$$d = L \sin \alpha$$

donde  $L$  es la distancia medida y  $\alpha$  es el ángulo del corte. Este procedimiento tiene como inconveniente que se necesita destruir parte de la película.

Otro método mecánico consiste en maquinar una ranura estriada en la película y según el número de hilos de la cuerda se determina el espesor.

Todos estos métodos son imposibles de realizar durante el depósito así que es imposible su aplicación en sistemas de monitoreo o control.

### 3.2.3 Métodos Magnéticos.

Los métodos magnéticos están basadas en la fuerza de atracción entre un imán y un sustrato magnético cubierto por una película no magnética, de este modo, al aumentar el espesor de la película la fuerza de atracción disminuye. Otros se basan en el flujo magnético, las corrientes de eddy y la saturación magnética. Todos estos métodos están limitados a espesores en el orden de milímetros por lo que su aplicación para las películas delgadas es muy limitada.

### 3.2.4 Métodos Eléctricos.

Las propiedades eléctricas que se utilizan para la medición de espesores son la rigidez dieléctrica, la capacitancia y la resistencia de la película. La poca confiabilidad de los valores de ruptura de los dieléctricos como un indicador del espesor hacen que este parámetro sea rara vez utilizado. La capacitancia se utiliza algunas veces para medir el espesor de películas dieléctricas en sustratos conductores pero la película debe cubrir ciertos requisitos para obtener una medición



confiable. La película no debe tener ningún orificio por pequeño que sea, además, se debe conocer el coeficiente dieléctrico del material con suma exactitud, lo que es casi imposible ya que éste depende de las condiciones del depósito.

La medición de la resistencia de una película es una operación fácil de realizar y se puede utilizar para determinar el espesor de películas conductoras en sustratos aislantes. La resistividad del material de la película debe conocerse con exactitud y debe ser invariante con el espesor lo que es difícil de conseguir ya que la resistividad es dependiente de las condiciones de depósito y generalmente es distinta a la del material original. Sin embargo, es de los pocos métodos no destructivos para películas y sustratos conductores.

El problema de todos estos métodos, a pesar de que proporcionan variables eléctricas que se pueden manejar y controlar, es que no son prácticos para la medición del espesor durante el proceso de depósito.

### 3.2.5 Métodos por radiación.

La técnica de la absorción está basado en la medición de la atenuación que produce una película a un haz de rayos X apropiado y difractado por un sustrato cristalino. Estos métodos están limitados ya que las mediciones varían por las características estructurales de la película, como el tamaño de los cristales, el esfuerzo y la orientación preferencial.

Un método alternativo es medir la atenuación de la radiación característica del material del sustrato debido a la película, esta atenuación es una función exponencial del espesor de la película y el coeficiente de absorción del material depositado, además, está limitado a películas de un sólo material aunque es inmune a pequeñas impurezas.

Otro método por radiación consiste en medir la emisión de rayos X, en el cual, el sustrato es excitado por una fuente de alta energía (rayos X, haz de electrones o una fuente radioactiva) y se mide la intensidad de la radiación característica del material depositado. Esta intensidad es casi linealmente proporcional al espesor y crece exponencialmente a un valor máximo para espesores del orden de 50 micras. Se puede utilizar para películas multicapa pero el único requisito es que el sustrato no tenga ningún elemento de la película.

Existe un método de medición de espesores de películas por la cantidad de retrodifusión de partículas beta de una fuente radioactiva, la intensidad de las partículas difundidas depende del espesor de la película y aumenta con el número atómico del material depositado, que debe ser distinto al material del sustrato. Tiene las ventajas de ser barato, fácil de realizar, rápido y no destructivo; se puede usar en películas opacas o transparentes pero no se puede utilizar durante el depósito.

### 3.2.6 Medidor de Oscilador de Cristal de Cuarzo.

Este medidor de espesores aprovecha las propiedades piezoeléctricas del cuarzo. Se utiliza una delgada lamina de cuarzo como parte de un circuito oscilador. El campo de CA induce oscilaciones en el cristal cuya frecuencia natural de oscilación es:

$$f = \frac{C_t}{2d_q}$$

donde  $C_t$  es la velocidad de propagación de la onda elástica en la dirección del espesor y  $d_q$  es el espesor del cristal.

Una consideración en la preparación de láminas de cuarzo para los osciladores a partir de un cristal, cuyas superficies mayores son antinodales, es la dependencia de la frecuencia natural con la temperatura, la que se relaciona con las constantes elásticas. Dichas constantes son positivas y negativas y sus magnitudes dependen de la dirección de la vibración con respecto a los ejes naturales del cristal, para minimizar su efecto se busca que los términos positivos y negativos se anulen entre sí como ocurre en un cristal cortado a 35° con respecto al eje vertical. Esta orientación es conocida como corte AT y se utiliza en todos los cristales para medidores de espesor. La frecuencia de estos cristales es:

$$f_0 = \frac{N}{d_q}$$

donde  $N=1.67 \times 10^6$  Hz mm.

Cuando se agrega una pequeña masa  $\Delta M$  al cristal, ya sea por una cara o por las dos; las superficies originales del cristal permanecen como antinodos de vibración, es decir, la materia extraña no almacena energía de deformación elástica durante la vibración, por lo tanto, el cristal altera su frecuencia de oscilación debido al material agregado y las propiedades de dicho material son intrascendentes, lo que permite la medición de espesores de películas de distintos materiales. El efecto del depósito se obtiene al diferenciar la ecuación de  $f_0$  con respecto a  $d_q$  y sustituyendo el incremento de espesor de cuarzo por un incremento  $\Delta M$  cuyo valor es igual a la masa de material depositado y la variación de frecuencia  $\Delta f$  es:

$$\Delta f = - \frac{K f_0^3 \Delta M}{N \rho_q A_m} = - \frac{KN}{\rho_q d_q^3} \frac{\Delta M}{A_m}$$

donde  $\rho_q$  es la densidad del cuarzo ( $2.65 \text{ g cm}^{-3}$ );  $K=1$ , es una constante que depende de la distribución del depósito sobre el área de monitoreo y  $A_m$  es el área del cristal; sin embargo, normalmente, estos cristales utilizan electrodos para la conexión del cristal al circuito oscilador en cuyo caso el área  $A_m$  es el área de dichos electrodos. Se ha demostrado que las oscilaciones fuera de esta área son despreciables y el depósito fuera de esa zona solo contribuyen con un 1% del cambio de la frecuencia.

El factor de proporcionalidad en la ecuación anterior,

$$\frac{f_0^2}{N \rho_q} = \frac{N}{\rho_q d_q^2} = C_f \quad \text{Hz g}^{-1} \text{ cm}^2$$

se llama sensibilidad de determinación de masa del cristal y está graficada en la figura 3.13.

De la figura 3.13 observamos que los cristales más delgados producen cambios mayores de frecuencia por unidad de masa depositada, por lo que se busca que los cristales sean lo más delgado posible. Cuando el espesor del depósito llega a ser comparable con el espesor del cristal, el material depositado empieza a almacenar energía elástica e introduce vibraciones adicionales a las causadas por la adición de masa al cristal lo que provoca que  $\Delta f$  y  $\Delta M$  dejen de ser proporcionales. Los cristales de 0.3 mm de espesor y frecuencias naturales de 5 a 6 MHz ofrecen el mejor desempeño de sensibilidad y linealidad según se muestra en la figura 3.14.

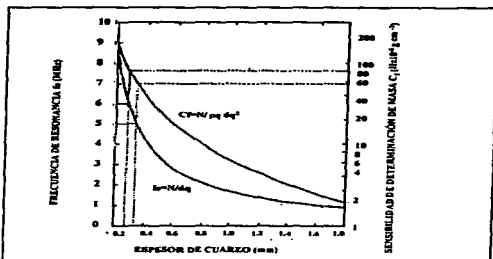


fig. 3.13. Frecuencia de resonancia y sensibilidad de determinación de masa para cristales AT en función de su espesor.

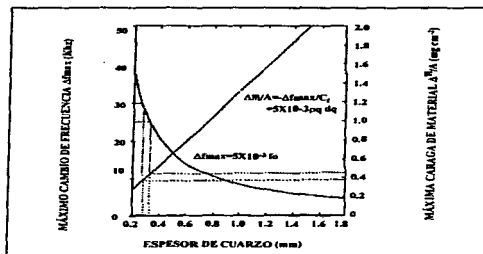


figura 3.14. Máximo cambio de frecuencia y carga de material en función del espesor del cristal.

El efecto de la presión sobre estos sensores es despreciable ya que no existen fenómenos de adsorción o desorción en la superficie del cristal. En los medidores con este tipo de sensores es necesario que se contemple la localización del sensor ya que en los procesos de preparación de películas los espesores no son uniformes.

Los circuitos requeridos para operar este tipo de sensores son un oscilador y un medidor de frecuencia; se recomienda mezclar la frecuencia del cristal con un oscilador de frecuencia fija para obtener una diferencia de frecuencias. Después, esta diferencia se mezcla con un generador de frecuencias variables. Este arreglo proporciona una mayor sensibilidad sin importar el espesor de la película acumulada en el cristal. La señal de salida es de audiofrecuencia y después es manejada por un circuito contador (figura 3.15).

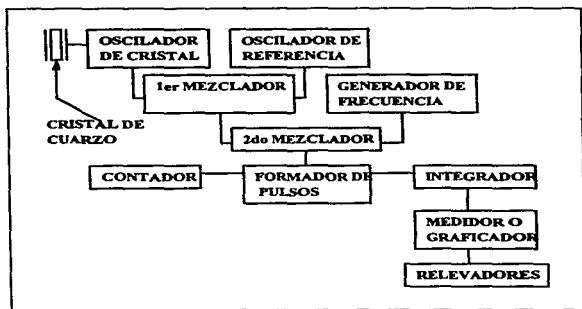


figura 3.15. Diagrama de bloques de medidor de espesores con cristal de cuarzo.

### 3.3 Medición de energía.

La energía de las partículas incidentes es un parámetro de gran importancia ya que determina en gran medida la eficiencia del proceso. A pesar de su importancia, rara vez es medida directamente debido a la complejidad que esto representa. En lugar de medir la energía se opta por hacer una medición indirecta, se mide alguna variable asociada y con ella se infiere la energía de los proyectiles.

La energía que produce la remoción de material en el blanco es igual a la energía cinética de los iones incidentes. Esto se basa en la consideración de que en este proceso las colisiones que intervienen son totalmente elásticas. La energía cinética de los iones se debe al efecto del campo eléctrico aplicado. Ahora bien, este campo se puede medir a través de la diferencia de potencial aplicada, la corriente consumida o la potencia suministrada ya que estas variables, dependientes entre sí, son proporcionales a la intensidad del campo eléctrico.

#### 4. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL.

El control de sistemas físicos a través de una computadora digital es cada vez más común, y los sistemas de medición y registro de datos presentan alguna forma de procesamiento o transmisión de datos digital. Las computadoras en un inicio realizaban sólo un control supervisorio, es decir, la computadora sólo cambiaba los valores de referencia en los controladores analógicos; posteriormente, se desarrolló el control digital directo en donde las computadoras, a través de un algoritmo programado, mandan señales directamente a los actuadores del sistema.

En general, todos los sistemas de control requieren de transductores y sistemas de medición y en el caso de sistemas digitales, requieren de un sistema de adquisición de datos que realice el muestreo y la conversión de señales analógicas a digitales (figura 4.1).

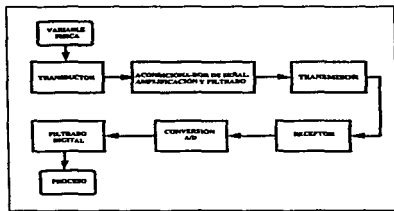


figura 4.1. Estructura general de controladores y sistemas de medición digitales

La técnica del control digital directo ofrece grandes ventajas sobre otras utilizadas en el pasado, algunas de éstas son:



- Flexibilidad de los programas de control, que facilita y disminuye el costo de las modificaciones.
- Capacidad de tomar decisiones, permitiendo combinar la capacidad lógica con el control de la dinámica y cubrir requerimientos más amplios y complejos.
- Aumento en la sensibilidad
- Mayor confiabilidad
- Menor sensibilidad al ruido y las perturbaciones
- Menor costo.

Para realizar el control de un sistema dado es necesario conocer las características dinámicas y estáticas del mismo.(fig. 4.2). Generalmente se utiliza un enfoque de sistemas para realizar este análisis. El primer paso consiste en identificar las señales de entrada y salida de interés con el objetivo de modelar la causalidad de las señales de entrada con la salida. Una vez identificadas las entradas y salidas se procede a construir un juego de ecuaciones diferenciales ordinarias que nos muestren el comportamiento macroscópico del sistema. Una vez obtenidas dichas ecuaciones, se procede a linealizarlas, si es necesario. Finalmente se transforman las ecuaciones del dominio del tiempo al dominio de Laplace, en el caso analógico, o en el dominio de la transformada Z, en el caso discreto. Esta transformación facilita el manejo de las ecuaciones y permite la aplicación de técnicas desarrolladas para la síntesis de controladores.

La simulación es de gran importancia en esta tarea. Actualmente existe un conjunto de programas que ayudan al diseñador a simular el comportamiento del proceso y el desempeño del controlador, lo cual permite probar y optimizar los diseños antes de implantarlos en el proceso real. Esta ventaja agiliza el trabajo de diseño.

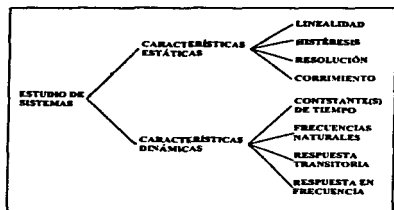


figura 4.2. Características dinámicas y estáticas de un sistema.

#### 4.1 Adquisición de datos.

La obtención de datos puede consistir desde un sistema simple en el que una persona lee la carátula de un instrumento y hace anotaciones, hasta sistemas automáticos, complejos y rápidos para altos volúmenes de datos.

En todos estos sistemas el elemento más importante es el transductor, el cual proporciona una señal eléctrica que indica la variable física que se está midiendo. Esta señal puede ser en forma de corriente, voltaje, frecuencia o la representación digital de alguna de las anteriores. El objeto de cualquier sistema de adquisición de datos es coleccionar los datos, procesarlos y dejarlos disponibles para su uso posterior. Los elementos principales de un sistema de adquisición de datos se muestran en la figura 4.1 La primera parte consiste en un transductor y un circuito de entrada, después los circuitos de acondicionamiento donde se amplifica y se filtra la señal. La segunda parte está compuesta por los circuitos de transmisión y recepción (en el caso de que el transductor o el fenómeno a medir se encuentren a una distancia considerable del sitio de procesamiento) y los

circuitos de conversión de señales analógicas a digitales; finalmente, la preparación para su utilización ya sea su visualización, almacenamiento, procesamiento o análisis. Es raro que los datos que se van a coleccionar sean de una sola variable experimental por lo que el sistema de procesamiento y obtención de datos debe contar con canales múltiples de entrada; el costo de tal equipo puede ser muy alto, por lo que se utiliza un explorador o barredor (multiplexor) en una configuración como la mostrada en la figura 4.3. El barredor explora cada canal según una programación por lo que sólo requiere una etapa de conversión y entrada. Además se incluye un reloj digital como patrón de tiempo del barredor o de la etapa de conversión. Esto se utiliza en las aplicaciones en las que la lectura debe realizarse a intervalos regulares o sincronizarse con algún evento externo. Finalmente, es ventajoso contar con una etapa que acondicione la señal después de la conversión.

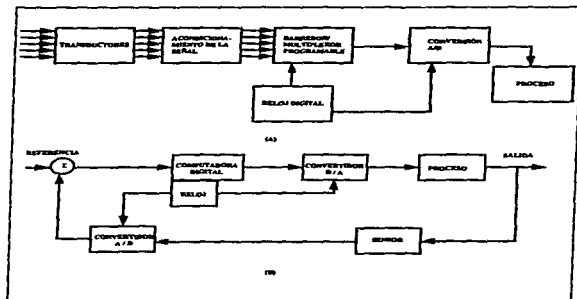


figura 4.3 Sistema de adquisición de datos de canales múltiples (A) y sistema de control digital (B).

Para el acondicionamiento de la señal del transductor se utiliza el amplificador operacional en distintas configuraciones. Los circuitos principales son el amplificador seguidor, inversor, no inversor, integrador, logarítmico y de instrumentación. En la figura 4.4 se muestran dichas configuraciones y su relación entrada-salida.

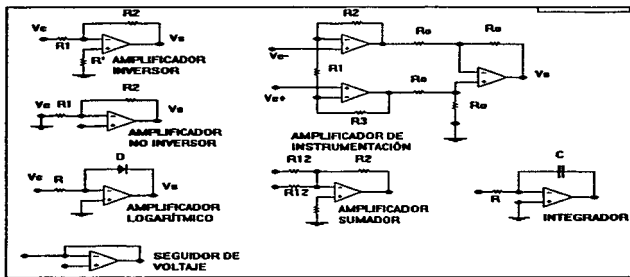


figura 4.4. Circuitos básicos del amplificador operacional.

Seguidor de voltaje.  $V_s = V_e$

Amplificador inversor.  $V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e$

Amplificador no inversor.  $V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e$

Amplificador sumador.  $V_s = -\left(\frac{R_2}{R_{11}} V_{e1} + \frac{R_2}{R_{12}} V_{e2}\right)$

Amplificador de Instrumentación.  $V_s = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (V_{e^+} - V_{e^-}) R_2 = R_1$

Integrador. 
$$V_s = -\frac{I}{RC} \int V_e(t) dt$$

Amplificador logarítmico. 
$$V_s = -\eta V_r \left( \ln \frac{V_e}{R} - \ln I_0 \right)$$

En cuanto al filtrado se pueden utilizar circuitos pasivos pero en general se prefieren los filtros activos ya que con ellos se puede amplificar además de filtrar. Para la síntesis de filtros se utilizan tablas de datos de las funciones de transferencia normalizadas de distintos tipos de filtro como son los Bessel o los Butterworth. Para la realización existen varias configuraciones entre las que se cuentan las mostradas en la figura 4.5 [Tobey, Graeme, Huelsman, 1989].

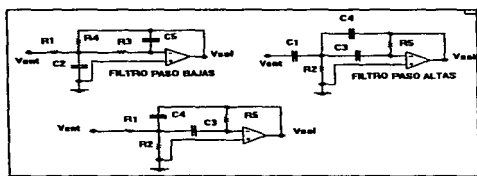


figura 4.5a. Configuración de ganancia infinita y realimentación múltiple de filtros activos.

Fórmulas para diseño de filtros activos en configuración de ganancia Infinita y realimentación múltiple.

Filtro paso bajas.

Dado  $H_0$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ; escoger  $C_2 = C$  un valor conveniente,

$$C_5 = KC_2; \quad R_4 = \frac{\alpha}{2\omega_0 C} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4(H_0 + I)}{K\alpha^2}} \right]; \quad R_1 = \frac{R_4}{H_0}; \quad R_3 = \frac{I}{\omega_0^2 C^2 R_4 K}$$

Filtro paso altas.

Dado  $H_o$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_o=2\pi f_o$ ; escoger  $C1=C3=C$  un valor conveniente,

$$R5 = \frac{1}{\alpha \omega_o C} (2H_o + 1); \quad R2 = \frac{\alpha}{\omega_o C (2H_o + 1)}; \quad C4 = \frac{C1}{H_o}.$$

Filtro paso banda.

Dado  $H_o$ ,  $\alpha=1/Q$ ,  $\omega_o=2\pi f_o$ ; escoger  $C4=C3=C$  un valor conveniente,

$$R1 = \frac{Q}{H_o \omega_o C}; \quad R2 = \frac{Q}{(2Q^2 - H_o) \omega_o C}; \quad R5 = \frac{2Q}{\omega_o C}.$$

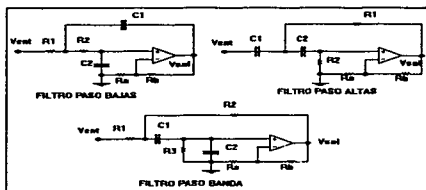


figura 4.5b. Configuración de fuente de voltaje controlada por voltaje de filtros activos.

Fórmulas para diseño de filtros activos en configuración de fuente de voltaje controlada por voltaje.

Filtro paso bajas.

Dado  $H_o > 2$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_o=2\pi f_o$ ; escoger  $C1=C2=C$  un valor conveniente,  $K=H_o > 2$  donde  $K=1+(Rb/Ra)$ ,

$$R2 = \frac{\alpha}{2\omega_o C} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4(Ho-2)}{\alpha^2}} \right]; \quad R1 = \frac{1}{\omega_o^2 C^2 R2}.$$

Filtro paso altas.

Dado  $Ho$ ,  $\alpha$ ,  $\omega_o = 2\pi f_o$ ; escoger  $C1=C2=C$  un valor conveniente.

$$R1 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8(Ho-1)}}{4\omega_o C}; \quad R2 = \frac{1}{\omega_o C \sqrt{\alpha^2 + 8(Ho-1)}}.$$

Filtro paso banda.

Dado  $Ho$ ,  $\alpha=1/Q$ ,  $\omega_o=2\pi f_o$ ; escoger  $C1=C2=C$  un valor conveniente;  $Ho$  es un parámetro libre,

$$K = 5 - \frac{\sqrt{2}}{Q}; \quad R = \frac{\sqrt{2}}{\omega_o C}; \quad Ho = \frac{5}{\sqrt{2}} Q - 1.$$

Finalmente, cuando se requiere de filtrado después de la conversión A/D se utiliza algún filtro analógico como los mencionados anteriormente y para su realización se discretiza por la aproximación bilineal para obtener un algoritmo programable.

#### 4.2 Determinación de características dinámicas de un sistema .

Los sistemas lineales, causales, invariantes con el tiempo y de parámetros concentrados tienen una respuesta característica y bien definida a entradas específicas, lo que permite que a través de datos experimentales se pueda obtener un modelo aproximado; estos métodos consisten, en su mayoría, en un análisis gráfico de la respuesta escalón de lazo abierto del sistema, es decir, de la curva de reacción.

Para sistemas no auto-regulados la repuesta típica a un escalón es:

$$Gm(s) = \frac{Ke^{-\Theta s}}{s}$$

donde K es la ganancia del modelo y  $\Theta$  es el tiempo muerto.

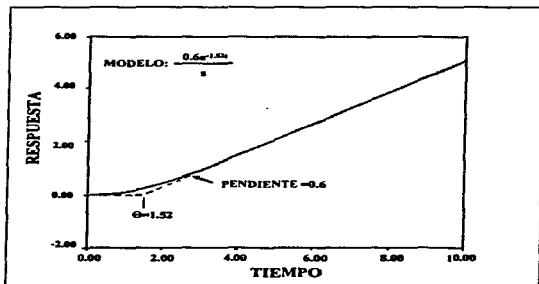


figura 4.6. Respuesta típica de un sistema no auto-regulado.

De la gráfica 4.6 se pueden obtener los parámetros del modelo trazando una tangente a la curva en donde la razón de cambio es casi constante. La pendiente de esta línea es la ganancia K del modelo y donde se cruza con la línea base es el tiempo muerto.

El modelo más simple para los sistemas auto-regulados es el de un sistema de primer orden con tiempo muerto

$$Gm(s) = \frac{Ke^{-\Theta s}}{\tau s + 1}$$

donde K es la ganancia del proceso,  $\Theta$  es el tiempo muerto y  $\tau$  es la constante de tiempo.



La figura 4.7 muestra la respuesta escalón del modelo de primer orden con tiempo muerto. Es de notar que la respuesta llega al 63.2 % de su valor final en el transcurso de una constante de tiempo. Además, una línea tangente al punto de máxima razón de cambio pasa por el valor final en un tiempo igual a una constante de tiempo. Con alguna de estas características es posible obtener el valor del tiempo muerto y la constante de tiempo. La ganancia es el cociente del valor final de la salida entre el valor del escalón.

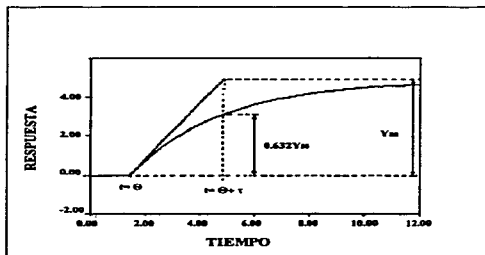


figura 4.7. Respuesta típica al escalón de un sistema de primer orden.

La línea tangente a un punto es un concepto simple, pero en la práctica, el trazado de ella sobre una curva puede llegar a ser de gran dificultad si se busca cierta exactitud. Un método alternativo es utilizar la solución analítica de la respuesta escalón, que es:

$$y(t) = K \cdot u(t - \Theta - \tau) \cdot (1 - e^{-(t - \Theta - \tau)/\tau}), t > \Theta$$

Si calculamos  $y(t)$  en dos instantes distintos, como  $\Theta + \tau/3$  y  $\Theta + \tau$ , obtenemos que:

$$y(\Theta + \tau / 3) = 0.284K \cdot u$$

$$y(\Theta + \tau) = 0.632K \cdot u$$

De esta forma el tiempo que tarda la respuesta en llegar al 28.4% y al 63.2% de su valor final se igualan con las ecuaciones anteriores y se obtienen la constante de tiempo y el tiempo muerto.

También es posible aproximar el sistema a un modelo de segundo orden con tiempo muerto, al aumentar el orden del modelo se obtiene una mejor aproximación con respecto al sistema real. El modelo se puede expresar en términos de sus constantes de tiempo o de su coeficiente de amortiguamiento y frecuencia natural como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$Gm(s) = \frac{Ke^{-\Theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

$$Gm(s) = \frac{Ke^{-\Theta s}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

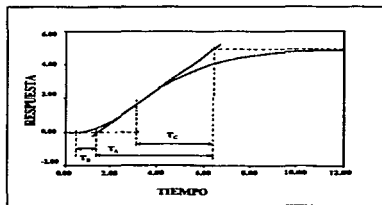


figura 4.8. Método para obtener modelo de segundo orden a partir de la curva de reacción.

Para los modelos de segundo orden, se traza una tangente sobre la curva de reacción en su punto de inflexión y se obtienen los tiempos  $T_A$  y  $T_C$  como lo muestra la figura 4.8. El cociente de estos tiempos está relacionado con las constantes de tiempo por la ecuación:

$$\frac{T_C}{T_A} = (1+x)x^{x/(1-x)}$$

donde  $x$  es  $\tau_1/\tau_2$ , además la suma de las constantes es igual a  $T_C$ . Con estas ecuaciones se obtienen las constantes y la ganancia es el cociente del valor final de salida entre el valor del escalón.

Para facilitar el cálculo de las constantes se utiliza la curva A que se encuentra en la figura 4.9.

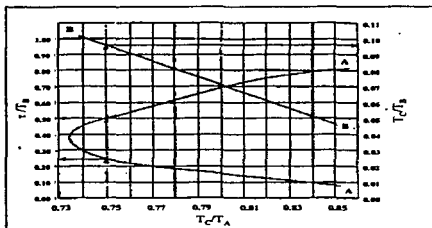


figura 4.9. Curvas para el cálculo de constantes de tiempo y tiempo muerto para sistemas de segundo orden sobre amortiguados

Para el cálculo del tiempo muerto, se utiliza la curva B de la gráfica anterior. El valor de  $T_B$  se puede obtener como se indica en la figura 4.8 o de la siguiente ecuación.

$$\frac{T_B}{T_d} = -0.4729 \frac{T_C}{T_d} + 0.4512$$

Otra forma de calcular el tiempo muerto es por el método de Smith y Cox que consiste en trazar una tangente en el punto de inflexión de la curva de reacción, considerando el valor de la curva de reacción en el punto en que la tangente cruza la línea de base (punto a de la gráfica 4.10). Se localiza el punto b que esta en 2.718\*a y se traza una línea paralela a la tangente y que pase por b. La intersección de esta última línea con la línea base es el tiempo muerto.

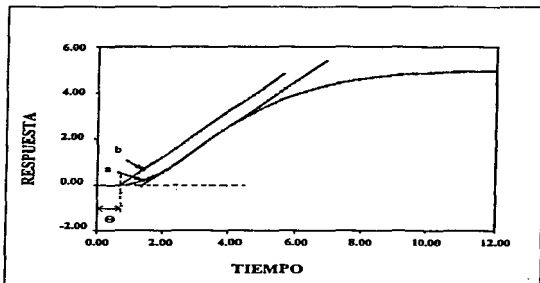


figura 4.10. Gráfica para el cálculo de tiempo muerto por el método de Smith y Cox.

La técnica anterior para el cálculo de constantes de tiempo sólo se puede utilizar para sistemas sobre amortiguados, para sistemas subamortiguados se puede utilizar la gráfica 4.11. Para ello se necesita el tiempo que tarda el sistema en llegar al 20% y al 60% de su valor final a entrada escalón. Con estos datos y la gráfica se obtienen el factor de amortiguamiento relativo( $\xi$ ) y la frecuencia natural del sistema ( $\omega_n$ ). El tiempo muerto se obtiene de alguna de las maneras ya mencionadas.

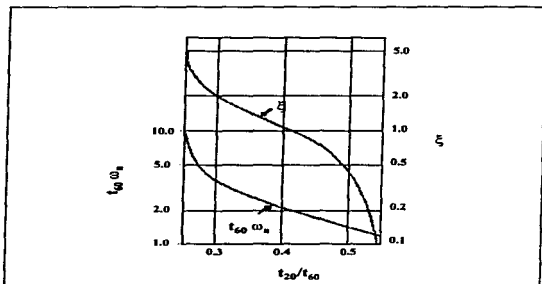


figura 4.11. Gráfica para el cálculo de  $\xi$  y  $\omega_n$  para sistemas subamortiguados

#### 4.3. Controladores PID.

En la teoría de control existen métodos para desarrollar algoritmos de control a partir de la función de transferencia de la planta y de la función de transferencia de lazo cerrado que representa el comportamiento deseado. Sin embargo, existen también esquemas de control ya

establecidos en los que el ajuste de sus parámetros permite obtener el comportamiento deseado de la planta en lazo cerrado. De estos esquemas se destacan los controladores PID (Proporcional Integral Derivativo). Los controladores PID son esquemas de control bien definidos y estudiados que se utilizan en la industria con gran éxito desde hace 60 años. Actualmente con el advenimiento de la tecnología digital, frecuentemente se utiliza un equivalente discreto de los controladores PID originales. Además se cuenta con distintas estructuras del mismo PID, algunas de ellas tienen consideraciones prácticas como a continuación se describe.

Dado un lazo cerrado de control como el de la figura 4.12, se tiene en principio las estructuras ideal y clásica de la figura 4.13. La estructura clásica deriva del hecho de que un sistema puramente derivativo es físicamente irrealizable, por lo es necesario aproximar esta acción de control con una red de adelanto-atraso con las constantes de tiempo propiamente escogidas.

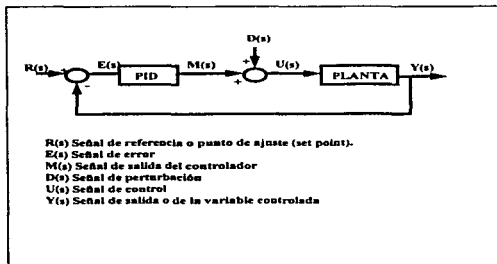


figura 4.12. Estructura de control de realimentación.

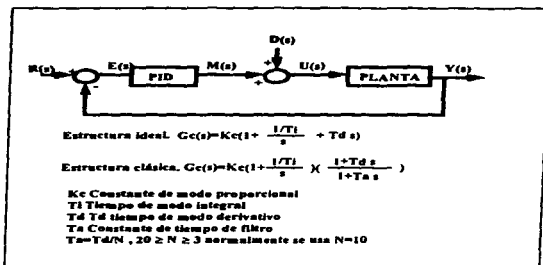


figura 4.13. Estructuras ideal y clásica de controlador PID.

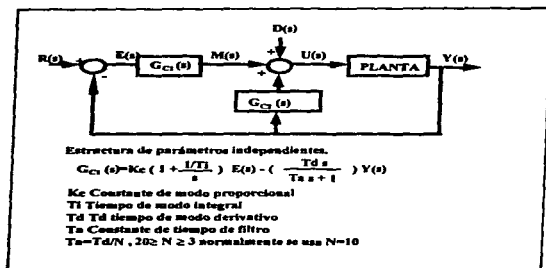


figura 4.14 Estructura de parámetros independientes de controlador PID.

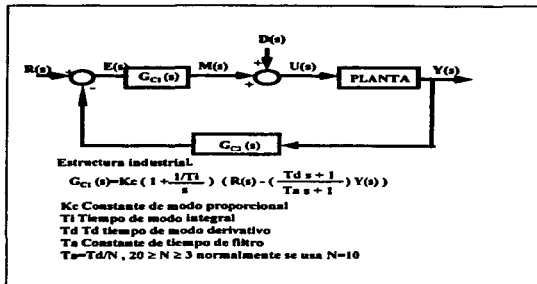


figura 4.15. Estructura Industrial de controlador PID.

En la mayoría de los casos no existe ninguna ventaja al derivar la señal de error al cambio de un punto de ajuste ( $R(s)$ ), por lo que en muchas ocasiones se deja esta acción solo a la señal realimentada como se observa en las estructuras de parámetros independientes y la industrial de las figuras 4.14 y 4.15 respectivamente.

Como se observa, los controladores de las figuras anteriores son analógicos; para su uso en un sistema digital se requiere un equivalente discreto, que para cada acción de control es:

Proporcional:  $K$

Integral:  $\frac{\alpha}{1 - z^{-1}}$

Derivativo:  $\frac{1}{\beta} (1 - z^{-1})$



Filtro:

$$\frac{1}{\gamma - (\gamma - 1)z^{-1}}$$

donde:

$$\alpha = \frac{Kh}{Tl}, \quad \frac{1}{\beta} = \frac{KTd}{h}, \quad \gamma = \frac{Td}{Nh} + 1.$$

Para las estructuras clásica y de parámetros independientes, se obtienen dos ecuaciones distintas que en una forma general se pueden expresar como:

$$U(z) = \frac{T(z)}{S(z)}R(z) - \frac{Q(z)}{S(z)}Y(z)$$

donde:

$$S(z) = s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} = \gamma + (1 - 2\gamma)z^{-1} + (\gamma - 1)z^{-2}$$

y en el caso de la estructura clásica Q(z), que es igual a T(z), es:

$$Q(z) = q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}; \quad q_0 = K\gamma + \frac{1}{\beta}; \quad q_1 = K(1 - 2\gamma) + \alpha\gamma - \frac{2}{\beta};$$

$$q_2 = (K - \alpha)(\gamma - 1) + \frac{1}{\beta}$$

Para la estructura de parámetros independientes T(z) es:

$$T(z) = t_0 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2}; \quad t_0 = K\gamma; \quad t_1 = K(1 - 2\gamma) + \alpha\gamma; \quad t_2 = (K - \alpha)(\gamma - 1)$$

Sustituyendo en cada caso, despejando y antitransformando se obtienen las siguientes expresiones:

Para la estructura clásica:

$$s_0 u(kh) = -s_1 u(kh - 2h) - s_2 u(kh - h) + q_0 [r(kh - 2h) - y(kh - 2h)] + q_1 [r(kh - h) - y(kh - h)] + q_2 [r(kh) - y(kh)]$$

Para la estructura de parámetros independientes:

$$s_a u(kh) = -s_1 u(kh - 2h) - s_2 u(kh - h) + t_1 r(kh) + t_2 r(kh - h) + t_3 r(kh - 2h) - q_1 y(kh - h) - q_2 y(kh - 2h)$$

En estas ecuaciones  $h$  es el período de muestreo y las señales  $R$ ,  $U$  y  $Y$  son los equivalentes discretos o en el dominio  $Z$  de las mostradas en las figuras 4.13 y 4.14 .

#### 4.4 Métodos de sintonización.

La sintonización de un controlador realimentado es el ajuste de los parámetros del mismo para obtener la respuesta de lazo cerrado deseada. Esta labor se complica más cuanto mayor es el número de parámetros involucrados. Existen varios métodos experimentales que nos proporcionan una primera aproximación de los parámetros.

##### 4.4.1. Método de oscilaciones sostenidas.

Este método, propuesto por Ziegler y Nichols en 1942, consiste en calcular los parámetros del controlador a partir de la ganancia límite y el periodo límite. Se utiliza un controlador proporcional en la siguiente estructura.

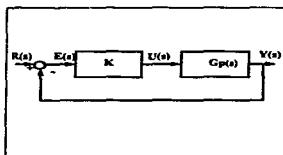


figura 4.16. Estructura de controlador proporcional para método de oscilaciones sostenidas.

La ganancia del controlador se varía hasta obtener oscilaciones sostenidas, se mide el periodo de oscilación y con la ganancia que produjo las oscilaciones (ganancia límite) se utilizan las siguientes fórmulas:

Tipo de controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$K_u/2$		
PI	$K_u/2.2$	$T_u/1.2$	
PID	$K_u/1.7$	$T_u/2$	$T_u/8$

tabla 4.1. Fórmulas para método de oscilaciones sostenidas.

donde  $K_u$  es la ganancia límite y  $T_u$  es el periodo de oscilación. Este método de sintonización produce una respuesta de lazo cerrado de oscilación amortiguada de 0.25, es decir, la razón entre la primera oscilación y la segunda debido a una entrada escalón es de 0.25 (figura 4.17).

#### 4.4.2. Método de oscilaciones amortiguadas.

En algunas ocasiones el sistema no permite oscilaciones sostenidas por lo que usando la estructura de Ziegler-Nichols se varía la ganancia hasta obtener justo la razón de 0.25 entre la primera y la segunda oscilación como se ilustra en la figura 4.17.

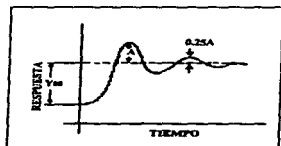


figura 4.17 Razón de amortiguamiento de 0.25.

Al lograr esta condición el factor de amortiguamiento relativo de los polos dominantes es de 0.2176. Con los valores de  $K_o$  y  $T_o$ , ganancia que produjo la razón de oscilación y el periodo de oscilación respectivamente, se utilizan las siguientes fórmulas.

Tipo de controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$K_o$		
PI	$K_o$	$T_o$	
PID	$K_o$	$T_o/1.5$	$T_o/6$

tabla 4.2. Fórmulas para método de oscilaciones amortiguadas.

#### 4.4.3. Métodos de curva de reacción.

Otra manera de sintonizar los algoritmos PID es a través de la curva de reacción. Como ya se dijo los sistemas lineales presentan una salida característica a una entrada escalón, de hecho es el mismo concepto utilizado para la obtención de modelos aplicado a la obtención de los parámetros de un controlador PID.

##### 4.4.3.1. Método de Ziegler-Nichols.

En la respuesta escalón de lazo abierto, se traza una línea tangente al punto de inflexión. Las fórmulas de la tabla 4.3 utilizan el valor de la pendiente de la tangente y el del punto donde intersecta la línea base. Este método ofrece una respuesta de lazo cerrado de amortiguamiento de oscilaciones de 0.25.

Tipo de controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$1/RL$		
PI	$0.9/RL$	$3L$	
PID	$1.2/RL$	$2L$	$0.5L$

tabla 4.3. Fórmulas para método de curva de reacción de Ziegler-Nichols.

#### 4.4.3.2. Método de Cohen-Coon.

Con los parámetros del modelo de primer orden, ganancia  $K$ , tiempo muerto  $\Theta$  y constante de tiempo  $\tau$ , se utilizan las siguientes fórmulas:

Controlador proporcional: 
$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\Theta} \left[ 1 + \frac{\Theta}{3\tau} \right]$$

Controlador proporcional-integral: 
$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\Theta} \left[ \frac{9}{10} + \frac{\Theta}{12\tau} \right]$$

$$T_I = \Theta \frac{30 + \frac{3\Theta}{\tau}}{9 + \frac{20\Theta}{\tau}}$$

Controlador proporcional-derivativo:

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\Theta} \left[ \frac{5}{4} + \frac{\Theta}{6\tau} \right]$$

$$T_d = \Theta \frac{6 - \frac{2\Theta}{\tau}}{22 + \frac{3\Theta}{\tau}}$$

Controlador proporcional-integral-derivativo:

$$K_c = \frac{1}{K} \frac{\tau}{\Theta} \left[ \frac{4}{3} + \frac{\Theta}{4\tau} \right]$$

$$T_I = \Theta \frac{32 + \frac{6\Theta}{\tau}}{13 + \frac{8\Theta}{\tau}}$$

$$T_d = \Theta \frac{4}{11 + \frac{\tau}{2\Theta}}$$

#### 4.4.3.3. Método de criterios de desempeño.

Se basa en la minimización de distintas integrales de la función de error, las integrales más comunes son:

La minimización de la integral de la función de error al cuadrado,

$$ISE = \int [e(t)]^2 dt$$

La minimización de la integral de la función del valor absoluto del error,

$$IAE = \int |e(t)| dt$$

la minimización del valor absoluto del error por el tiempo,

$$ITAE = \int t|e(t)| dt$$

Para el uso de este método se requiere un modelo de primer orden con tiempo muerto y la aplicación de las siguientes fórmulas:

Sintonización para perturbaciones

$$Kc = \frac{\alpha \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{\beta}}{K}$$

$$Ti = \frac{\tau}{\alpha \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{\beta}}$$

$$Td = \frac{\left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{\beta}}{\alpha}$$

Sintonización para entradas escalón

$$Kc = \frac{\alpha \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{\beta}}{K}$$

$$\pi = \frac{\tau}{c + d \frac{\Theta}{\tau}}$$

$$Td = \frac{e \left( \frac{\Theta}{\tau} \right) f}{\tau}$$

los valores de a, b, c, d, e, y f se encuentran en tablas para este propósito.

Es difícil predecir el comportamiento de cada criterio, pero, se puede decir que el criterio ISE es más afectado por errores grandes que el criterio IAE por lo que el criterio ISE tendrá sobrepasos menores a cambios de carga. Se observa también en la figura 4.18 que el tiempo de asentamiento de un criterio ISE es más largo que los demás; y ya que el tiempo aparece en el criterio ITAE, el tiempo de asentamiento es más corto aunque es el de mayor sobrepaso.

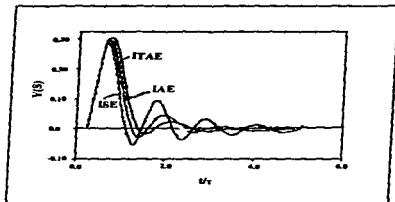


figura 4.18. Comparación de distintos criterios de desempeño.

#### 4.4.3.4. Método de Dahlin.

Dahlin propuso que el comportamiento de lazo cerrado se aproximara a un sistema de primer orden con una constante de tiempo  $\tau_c$ ; sin embargo, si el proceso tiene tiempo muerto, este tiempo muerto aparecerá generalmente en la respuesta de lazo cerrado; aún así, este método

es útil si se quiere una respuesta en la que se deba limitar el sobrepaso. Dahlin desarrolló fórmulas para distintos tipos de proceso o modelo, éstas se encuentran en la tabla 4.4 [Smith, Corripio,1985].

Proceso	Controlador	Sintonización
$G(s) = K$	I	$Kc = \frac{1}{K\tau_c}$ sintonizable
$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$	PI	$Kc = \frac{\tau}{K\tau_c}$ sintonizable $Ti = \tau$
$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$ $\tau_1 > \tau_2$	PID	$Kc = \frac{\tau_1}{K\tau_c}$ sintonizable $Ti = \tau_1$ $Td = \tau_2$
$G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau s + 1}$	PID*	$Kc = \frac{\tau}{K(t_0 + \tau_c)}$ sintonizable $Ti = \tau$ $Td = \frac{t_0}{2}$

tabla 4.4. Fórmulas de diseño de Dahlin.

\* Estas fórmulas se aplican tanto para controladores PI como PID se recomienda el uso de PID cuando  $t_0$  sea mayor que  $\tau/4$ . Además estas fórmulas son para estructura clásica si se desea utilizar la estructura ideal los valores de estas fórmulas deben de convertirse en las siguientes:

$$K^*c = Kc \left( 1 + \frac{Td}{Ti} \right)$$

$$Ti' = Ti + Td$$

$$Td' = Td \frac{Ti}{Ti + Td}$$



Las fórmulas de Dahlin ofrecen la ventaja de obtener la respuesta deseada con solo ajustar la ganancia a través del valor de  $\tau_c$ . Para un sistema de primer orden con tiempo muerto, al igualar  $\tau_c$  al valor del tiempo muerto se obtiene un máximo de 5% de sobrepaso. Para controladores PID en los que  $t_d/\tau$  está en el intervalo de 0.1 a 0.5 y controladores PI en los que  $t_d/\tau$  está en el intervalo de 0.1 a 1.5, la integral del criterio IAE se minimiza con  $\tau_c=0$  para la sintonización para perturbaciones. Para sintonización para entradas escalón, la integral se minimiza, cuando  $t_d/\tau$  está en el intervalo de 0.1 a 1.5 si:

$$\tau_c = \frac{2}{3}t_d \text{ para controladores PI}$$

$$\tau_c = \frac{1}{5}t_d \text{ para controladores PID}$$

#### 4.5 Selección de frecuencia de muestreo.

La selección de la frecuencia de muestreo, para un controlador digital, no es tarea fácil. Mientras más alta sea la frecuencia de muestreo, el desempeño del controlador mejora pero, esto implica una mayor carga de trabajo al equipo de cómputo y los equipos y elementos que trabajan a altas velocidades aumentan el costo del controlador. Por otro lado al tener una frecuencia de muestreo baja se tiene más tiempo para que el procesador realice los cálculos del algoritmo de control, lo cual permite que procesadores más lentos realicen la misma función de control y se disminuyan los costos. Estos argumentos sugieren que la frecuencia de muestreo ideal es la frecuencia más baja que cumpla con los requisitos del sistema. Otro punto de vista surge cuando el número de controladores a producir es muy bajo, entonces, el tiempo dedicado a lograr el desempeño deseado para una frecuencia de muestreo baja puede no estar justificado y es mejor utilizar la frecuencia más alta posible. Un límite inferior absoluto y teórico para la selección de la

frecuencia de muestreo es el teorema de muestreo, que establece que, para reconstruir una señal continua de ancho de banda limitado a partir de datos muestreados, es necesario muestrear cuando menos a dos veces la frecuencia más alta de la señal continua. En la práctica, este límite inferior no se utiliza si se desea una respuesta suave del sistema y un número reducido de pasos del controlador. Para obtener una respuesta suave se recomienda una frecuencia de muestreo que cumpla con [Franklin, Powell, 1990]:

$$6 \leq \frac{\omega_s}{\omega_b} \leq 40$$

donde  $\omega_s$  es la frecuencia de muestreo y  $\omega_b$  es el ancho de banda del lazo cerrado. La suavidad de respuesta es algo muy subjetivo y depende del sistema y del diseñador. La selección de la frecuencia de muestreo afecta la capacidad de rechazo de las perturbaciones. Si la frecuencia de muestreo es muy baja al presentarse la perturbación pasa hasta un periodo completo de muestreo antes de que el siguiente dato proporcione datos del efecto de la perturbación, por lo que al disminuir la frecuencia de muestreo el efecto de las perturbaciones aumenta. Se recomienda, para evitar este efecto que [Franklin, Powell, 1990]:

$$\frac{\omega_s}{\omega_b} \geq 20$$

Un fenómeno que ocurre al muestrear una señal con contenido frecuencial mayor a la frecuencia de muestreo es el enmascaramiento de frecuencias. Si se muestrea periódicamente una señal continua con transformada de Fourier  $F$ , la transformada de la señal muestreada es la repetición periódica de la transformada  $F$  en cada periodo de muestreo. Si el ancho de banda de la señal continua supera la frecuencia de muestreo, se presenta un traslape de frecuencias como el mostrado en la figura 4.19.

En la figura 4.19 se observa que frecuencias que antes no existían en la señal continua o que se valor era muy pequeño ahora son de valor significativo después de realizar el muestreo. Para

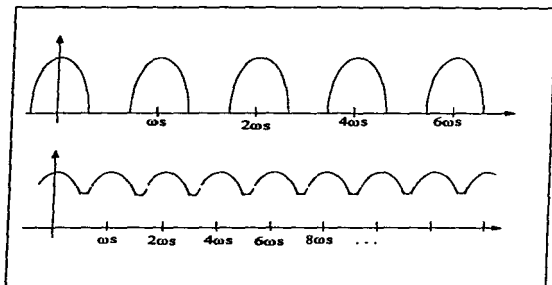


figura 4.18. Enmascaramiento de frecuencias.

evitar este fenómeno se recomienda el uso de un filtro analógico antes del circuito de muestreo con una frecuencia de corte de la mitad de la frecuencia de muestreo. En algunas ocasiones la señal continua no tiene un ancho de banda limitado sino por el contrario es tan amplio que el fenómeno de enmascaramiento no se puede evitar, pero se puede reducir por la acción de filtros en la entrada y/o después del muestreo y la conversión A/D.

Existen reglas experimentales que establecen que para sistemas de control en el que la variable controlada es un flujo, el tiempo de muestreo es de alrededor de 1 seg.; para sistemas de control de nivel o presión de 5 seg. y para controladores de temperatura, de 20 seg. esto solo

implica que la respuesta de un sistema térmico es más lento que uno de presión y que los sistemas de flujo son los de respuesta más rápida. La selección final se deberá realizar en base a pruebas en el sistema y de ser posible con la simulación.

Cuando el tiempo de muestreo es lo suficientemente corto el diseño digital se aproxima al diseño analógico; experimentalmente se ha comprobado que cuando es del orden de un décimo a un vigésimo de la constante de tiempo del proceso, el muestreo se puede incluir en las fórmulas de sintonización aumentando el tiempo muerto con la mitad del periodo de muestreo y utilizar este tiempo muerto corregido en las fórmulas de sintonización [Smith, Corripio, 1985].

## 5. AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA.

### 5.1. Descripción del sistema.

El sistema consiste en una cámara cilíndrica de acero inoxidable 304 de 24.765 cm (9.75 pulgadas) de diámetro y 288.8925 cm (11.375 pulgadas) de altura; con tres puertos o bocas de 7.2644 cm (2.840 pulgadas) de diámetro colocadas a 120 grados, a una altura de la base al centro de la boca de 8.89 cm (3.5 pulgadas) una, a 16.51 cm (6.5 pulgadas) la segunda y a 21.59 cm (8.5 pulgadas) la tercera; en el puerto superior está instalado un magnetrón plano, y en los dos restantes existen ventanas. Existen tres puertos menores en los que están conectados los sensores de presión. En la platina están montados el cristal del medidor de espesores, el portasustratos y las salidas para el sistema de bombeo. El sistema de bombeo está formado por una bomba mecánica, una bomba difusora de aceite con trampa de nitrógeno líquido(LN<sub>2</sub>), válvulas de paso, válvula de venteo y una válvula solenoide para la admisión del gas de trabajo. El proceso se realiza con una fuente de CD o con una fuente de RF, el espesor se mide con un medidor de cristal de cuarzo, ya que es el único método disponible para realizar la medición en tiempo real; la presión se mide con un sensor capacitivo (baratrón), un Pirani y un cátodo frío para cubrir todo el intervalo requerido por el proceso. Se muestra un esquema del sistema en la figura 5.1.

A continuación se enlistan las características más importantes de los elementos que forman el sistema.

Se dispone de un magnetrón plano que admite blancos de 7.62 cm (3 pulgadas) de diámetro y de 0.15875 a 0.635 cm (1/16 a 1/4 de pulgada) de espesor y potencia de entrada de 1000 Watts

máxima, 13.56 Mhz RF o 1500 Watts CD, requiere agua para refrigeración y su montaje es horizontal.

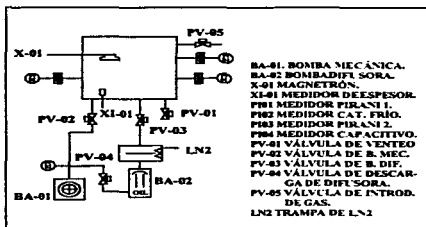


figura 5.1. Esquema del sistema.

Su intervalo nominal de operación es de  $2 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-2}$  Torr; la fuente de CD tiene una potencia de salida de 0-1000 Watts, corriente de salida de 0-1.0 A, voltaje de salida de 0-1000V (1500V a circuito abierto) y rizo de 5% máximo; cuenta con un conector para operación remota con el que se puede obtener lecturas de potencia, corriente y voltaje de salida, se puede fijar el nivel de salida y la rampa de tiempo para llegar al nivel fijado. Se tiene una salida digital para la indicación de salida presente y entradas para el encendido y apagado de la fuente a través de su conexión a un punto común. Las salidas digitales son de nivel lógico alto de +15 V y bajo de 0 V; las entradas y salidas analógicas son en el intervalo de 0-5 V. La fuente de RF tiene una potencia de salida de 600 Watts a una carga de 50 Ohms, tiene una distorsión armónica de 50 dB por debajo de la fundamental; el ruido y el rizo están 30 dB por debajo de la fundamental, la frecuencia fundamental es de

13.56 MHz  $\pm 0.005\%$ , la impedancia de entrada es de 50 Ohms, tiene una regulación de potencia de  $\pm 3\%$  de la potencia fijada, proporciona regulación de la potencia o de la polarización de CD de la carga, puede configurarse para operación independiente, como maestro o esclavo. Tiene un conector para operación remota con señales similares a las de la fuente de CD. Se cuenta con entonador a 13.56 Mhz nominales con una capacidad de 600 Watts y un conector para operación remota.

La bomba mecánica es de paletas giratorias de 2.77 lts/s, con una presión última menor a  $1 \times 10^{-3}$  Torr. La bomba difusora es de 400 lts/seg, una presión última de  $1 \times 10^{-9}$  Torr y una presión máxima de inicio de  $1 \times 10^{-2}$  Torr.

La válvula tipo solenoide es operada electromagnéticamente, la presión de entrada máxima es de 8517.2434 Torr (150 psig), tiempo de respuesta de 15 ms, conductancia máxima con la válvula cerrada  $10^{-7}$  scc/seg He (Standard Centímetro Cúbico por Segundo), flujo máximo (con una presión de entrada de 760 Torr) 50 SLM ( Standard Litros por Minuto), intervalo de presión controlable  $10^{-4}$  a 5000 Torr.

El medidor de bajo vacío es del tipo Pirani, con intervalo de medición desde presión atmosférica hasta  $10^{-3}$  Torr, el medidor de alto vacío es un cátodo frío de tipo Penning y su intervalo de operación va desde  $5 \times 10^{-3}$  a  $7.5 \times 10^{-7}$  Torr. Estos dos sensores tienen un controlador que permite la conmutación entre ambos dependiendo de la presión del sistema de vacío. El controlador ofrece salidas analógicas logarítmicas de 1 a 8 V (1 V por década) para cada canal y comunicación serial con protocolo RS-232 para configurar la unidad.

El otro sensor de presión que existe es un baratrón o sensor capacitivo que consiste en un diafragma de metal que divide una cámara que está sellada de un lado a una presión de referencia y

el otro extremo se conecta al sistema de vacío. El diafragma y una de las paredes de la cámara forman un capacitor. Al variar la presión, el diafragma se desplaza y la capacitancia varía. El baratrón cuenta con un circuito puente, un circuito oscilador y un amplificador que acondicionan la señal para obtener una señal de 0 a 10 V lineal. El baratrón tiene un intervalo de operación de 2 a  $2 \times 10^{-4}$  Torr, obteniéndose voltajes de 1 mV a 10 V.

Se cuenta también de un analizador de gas residual de tipo cuadrupolo con intervalo de masas de 1 a 200, pero este equipo no está siempre disponible para este sistema de depósito. Se utiliza solamente en experimentos específicos por lo que no se tomó en cuenta como parte del sistema de depósito.

El medidor de espesores tiene como principio de operación las propiedades piezoeléctricas del cuarzo ya que utiliza una lamina delgada de cuarzo con contactos de oro como elemento principal de un circuito oscilador. Un campo eléctrico de CA induce oscilaciones en el cristal, esta oscilación cambia de frecuencia cuando varía la masa del cristal.

El medidor de espesor que se utiliza en el sistema tiene las siguientes características: intervalo de operación 1-999.9 kÅ, resolución 1 Å, frecuencia natural 6 MHz, período de medición de 0.25 S, desviación máxima de frecuencia de 1 MHz; maneja variables fijadas por el usuario como la densidad del material, el factor Z o impedancia acústica, compensación geométrica, reloj y espesor final; cuenta con un conector para comunicación serial RS-232 y manejo remoto con funciones de encendido, apagado e inicialización y señal de lectura remota de 0 a 10 V.

Para realizar el control del sistema se dispone de una computadora personal con un procesador Pentium a 75 MHz y para adquirir las señales de los instrumentos al computador se



utilizan dos tarjetas de adquisición de datos PCL812PG de Advantech Co. Ltd. cuyas características básicas son:

- 16 entradas analógicas con 12 bits de resolución, intervalos de entrada programables a  $\pm 10$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 2.5$ ,  $\pm 1.25$  y  $\pm 0.625$  V, rapidez de conversión 30 KHz máximo, linealidad  $\pm 1$  bit y error de 0.015%.

- 2 salidas analógicas con 12 bits de resolución, salida de 0 a +5 o de 0 a +10 V seleccionable en la tarjeta, linealidad  $\pm 1/2$  bit.

- entrada digital de 16 bits, compatible con TTL, nivel bajo 0.8 V máximo y nivel alto 2.0 V mínimo.

- salida digital de 16 bits, compatible con TTL, nivel bajo 0.5 V máximo y nivel alto 2.4 V mínimo.

La tarjeta utiliza 16 direcciones de puertos de entrada salida para su manejo y control. El uso de cada registro se encuentra en la tabla 5.1.

La tarjeta de adquisición de datos permite la conversión de señales analógicas a digital en tres modalidades. La primera, es por control del programa, consiste en una función que verifica el valor del bit 4 del registro base + 5 y al cambiar de estado lógico, se indica que la conversión ha finalizado y se puede transferir el valor de la conversión. El segundo método es por rutinas de manejo de interrupciones. La tarjeta genera una señal de interrupción de nivel dos al siete elegibles en un conector de la tarjeta, al terminar el proceso de conversión. Una rutina de manejo de interrupción transfiere los datos de la dirección de puerto a una variable o localidad de memoria. Se puede fijar una frecuencia de muestreo a través de los contadores 1 y 2 que están conectados en cascada al reloj principal de 2 Mhz como divisores, así al fijar distintos valores a los contadores se puede obtener frecuencias distintas de muestreo. La tercera modalidad es el uso del acceso directo a

memoria (DMA). En esta modalidad cuando una conversión A/D se ha efectuado, la tarjeta manda una señal al controlador de DMA para que transfiera los datos de la conversión de la localidad de puerto a una localidad de memoria preestablecida sin pasar por el procesador. En esta modalidad

DIRECCIÓN	LECTURA	ESCRITURA
BASE+0	CONTADOR 0	CONTADOR 0
BASE+1	CONTADOR 1	CONTADOR 1
BASE+2	CONTADOR 2	CONTADOR 2
BASE+3	SIN USO	CONTROL DE CONTADORES
BASE+4	BYTE MENOS SIGNIFICATIVO DE CONV. A/D	BYTE MENOS SIGNIFICATIVO DE CONV. D/A # 1
BASE+5	BYTE MAS SIGNIFICATIVO DE CONV. A/D	BYTE MAS SIGNIFICATIVO DE CONV. D/A #1
BASE+6	BYTE MENOS SIGNIFICATIVO DE ENTRADAS DIGITALES	BYTE MENOS SIGNIFICATIVO DE CONV. D/A # 2
BASE+7	BYTE MAS SIGNIFICATIVO DE ENTRADAS DIGITALES	BYTE MAS SIGNIFICATIVO DE CONV. D/A #2
BASE+8	SIN USO	LIMPIAR SENAL (IRQ) DE INTERRUPCIÓN
BASE+9	SIN USO	CONTROL DE GANANCIA
BASE+10	SIN USO	CONTROL DE MULTIPLEXOR
BASE+11	SIN USO	CONTROL DE MODO DE OPERACIÓN
BASE+12	SIN USO	DISPARO DE CONV. A/D POR PROGRAMA.
BASE+13	SIN USO	BYTE MENOS SIGNIFICATIVO DE SALIDAS DIGITALES
BASE+14	SIN USO	BYTE MAS SIGNIFICATIVO DE SALIDAS DIGITALES
BASE+15	SIN USO	SIN USO

tabla 5.1. Función de las direcciones de la tarjeta de adquisición de datos

también se utiliza el reloj interno como disparo para iniciar la conversión A/D a intervalos regulares.

Las lecturas de entradas digitales y las salidas digitales y analógicas se realizan leyendo o escribiendo directamente a las localidades asignadas para este fin.

## 5.2. Secuencia de preparación.

La secuencia de preparación que se describe es el utilizado actualmente y es manual. Inicia con la colocación del sustrato en la cámara de depósito con el material a depositar previamente instalado en el magnetrón. Con la cámara a presión atmosférica se inicia el bombeo mecánico hasta llegar a una presión de 1 mTorr. Al alcanzar esta presión, se cierra la válvula de la bomba mecánica y se abre la válvula para conectar la bomba mecánica a la descarga de la difusora. Con la cámara de depósito aislada y en vacío, se enciende la bomba difusora y se inicia la circulación de la refrigeración (agua) de la misma. Se espera, de 30 min a 1 hora hasta que el aceite en la bomba difusora llegue a la temperatura de operación y el efecto de bombeo haya comenzado. Se abre la válvula de la bomba difusora para iniciar el vaciado principal de la cámara de depósito. Es de importancia notar que si la presión de la cámara sube a más de  $2 \times 10^{-2}$  Torr durante el proceso de calentamiento de la difusora, es necesario cerrar la válvula de descarga de la difusora y reiniciar el bombeo mecánico hasta que la cámara vuelva a una presión de 1 mTorr y después regresar el bombeo mecánico a la descarga de la difusora y posteriormente, abrir la válvula de la difusora hacia la cámara. El abrir la válvula de la difusora cuando la cámara se encuentra a una presión muy alta puede provocar la degradación prematura del fluido de trabajo o la contaminación de partes del sistema de vacío con vapores del fluido. Se mantiene el bombeo de la difusora hasta llegar a la presión última del sistema que actualmente es de  $2 \times 10^{-6}$  Torr. Esta presión se alcanza aproximadamente en 2 horas si la trampa contiene LN2 y en cuatro sin LN2. La presión base a la

cual se debe iniciar el proceso se deja a elección del usuario una presión de alrededor de  $5 \times 10^{-5}$  Torr es suficiente para obtener películas de calidad aceptable. La aplicación final de dicha película es lo que determinará esta condición inicial del proceso. Una vez alcanzada la presión base, se utiliza la válvula de admisión del gas de trabajo para obtener una presión constante del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  Torr con la apertura y cierre manual de la válvula de admisión. Nuevamente se debe tener precaución de no sobrepasar el intervalo de operación de la bomba difusora durante un tiempo prolongado durante el proceso de introducción de gas ya que al sobrepasar el intervalo la acción de bombeo cesa y los vapores de fluido de trabajo pueden llegar a contaminar partes del sistema. Si la presión de trabajo es mayor al intervalo de operación de la bomba difusora, se debe reiniciar el bombeo mecánico aislando temporalmente la bomba difusora. Una vez alcanzada y estabilizada la presión de trabajo, se fija la potencia que se desea aplicar en la fuente de CD o de RF y se enciende la fuente. Se espera un tiempo para lograr un depósito del espesor deseado (tiempo que se calcula empíricamente). Al transcurrir el tiempo se apaga la fuente y se cierran las válvulas para aislar la cámara del sistema de bombeo y se mantiene la bomba mecánica en la descarga de la difusora. En este momento se admite aire hasta la presión atmosférica y se saca el sustrato con la película depositada y se puede meter otro sustrato o cambiar de material para reiniciar el proceso nuevamente.

Esta secuencia se pretende mantener, ya que no se cuenta con los dispositivos necesarios para automatizar por completo el proceso. Sin embargo, se trata de facilitar el proceso automatizando el manejo de las fuentes, el medidor de espesores y el sistema de introducción del gas de trabajo (fijar automáticamente la presión de trabajo). Además se busca tener la posibilidad de obtener una medición del espesor que no sea empírica y sea en tiempo real y ayudar al usuario en el

manejo del sistema de vacío con indicaciones de cual válvula abrir o cerrar dependiendo de la presión de trabajo o de la presión en el sistema, asegurando en lo posible la operación segura del equipo.

### 5.3 Adecuación de las señales.

A continuación se enlistan las señales que se manejan de los distintos equipos.

<b>TARJETA PCL812PG # 1</b>	
A/D 0	PIRANI
A/D 1	CATODO FRÍO
A/D 2	MEDIDOR DE ESPESORES
A/D 3	BARATRÓN
D/A 1	SET POINT DE FUENTE DE RF
D/A 2	VALVULA SOLENOIDE
D. OUT 0	APAGAR FUENTE DE CD
D. OUT 1	ENCENDER FUENTE DE CD
D. OUT 2	ENCENDER FUENTE DE RF
D. OUT 3	APAGAR FUENTE DE RF
D. OUT 4	APAGAR MEDIDOR DE ESPESORES
D. OUT 5	ENCENDER MEDIDOR DE ESPESORES
D. OUT 7	RESTABLECER CERO DE MEDIDOR DE ESPESORES
<b>TARJETA PCL812PG # 2</b>	
D/A 1	SET POINT DE FUENTE DE CD

tabla 5.2. Señales para automatización de sistema de sputtering.

Las salidas digitales que proporciona la tarjeta PCL812PG se utilizarán para activar el cierre de contactos de relevadores tipo SPDT de contactos a 1 A y 125 V de CA que se activan con una señal de CD de 5 Volts y corriente nominal de 90 mA. La tarjeta no proporciona la corriente suficiente por lo que se diseñó y construyó un circuito con un transistor TJB tipo npn que pasa de corte a saturación con la señal de la tarjeta PCL812PG. El circuito se muestra en la figura 5.3.

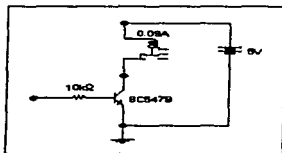


Figura 5.3. Circuito para relevadores.

Las señales de los convertidores D/A que fijan la potencia de las fuentes se conectan de manera directa, para el manejo de la válvula solenoide para la introducción del gas de trabajo se diseñó y construyó una fuente de corriente de 0 a 120 mA a una carga de 110 Ohms. El circuito consiste en un espejo de corriente que utiliza la señal de control para fijar el voltaje a través de la juntura base-emisor y una resistencia conocida con lo que se obtiene una corriente de emisor conocida. La corriente de emisor es aproximadamente igual a la corriente de colector del transistor por lo que se conecta la válvula al colector y se obtiene una corriente controlada por el voltaje de la Tarjeta PCL812PG. El circuito se muestra en la figura 5.4.

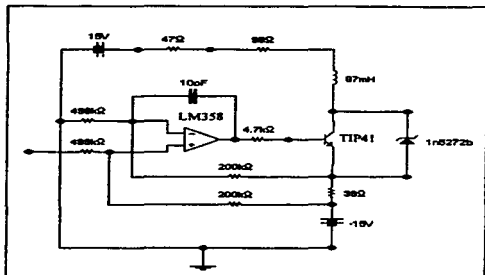


figura 5.4. Circuito de la fuente de corriente.

La lectura de la presión del Pirani, del cátodo frío y del baratrón, así como la señal del medidor de espesores se conectan, cada uno, a un amplificador de instrumentación y después a un filtro paso bajas tipo Bessel de cuarto orden con frecuencia de corte a 10 Hz. Los circuitos utilizados se muestran en las figuras 5.5 y 5.6.

Finalmente se utiliza un filtro digital después de la conversión A/D para disminuir el ruido. Este filtro es la versión discreta de un filtro paso bajas de segundo orden tipo Butterworth con frecuencia de corte de 1/32 de frecuencia de muestreo, discretizado por el método de mapeo de polos y ceros.

La periodo de muestreo es de 25mseg, este tiempo se fijó después de realizar pruebas con la señal tratando de minimizar el ruido y el enmascaramiento de frecuencias.

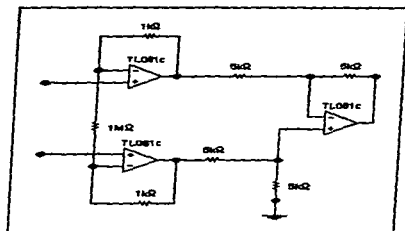


figura 5.5. Circuito de amplificador de instrumentación.

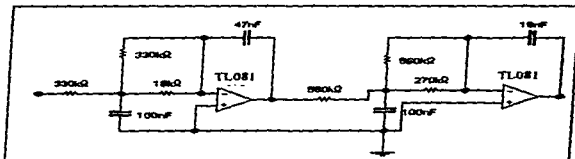


figura 5.6. Circuito de Filtro paso bajas.

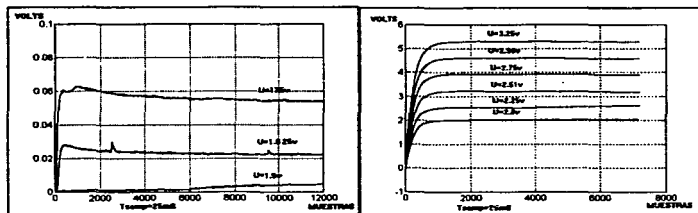
#### 5.4 Diseño de controlador.

Para el controlador de introducción de gas para fijar la presión de trabajo, se establecieron primeramente las especificaciones de desempeño de lazo cerrado. Se estableció que el tiempo de asentamiento fuera de alrededor de 60 seg para agilizar el proceso, ya que el control manual de



válvulas para la introducción de gas puede llevar varios minutos. En cuanto al sobrepaso no existe ninguna restricción para presiones de trabajo por encima del intervalo de operación de la bomba difusora ya que para ello se reinicia el bombeo mecánico que abarca desde la presión atmosférica. Para presiones de trabajo dentro del intervalo de la difusora, se busca que el sobrepaso no llegue a salir de este intervalo para evitar daños al fluido de trabajo y al sistema. Se busca fijar valores de presión representados por 10 mV a 5 V, estos valores abarcan, en general las presiones en las que el fenómeno de sputtering se lleva a cabo.

Para el diseño del controlador se buscó en primer lugar obtener un modelo experimental del sistema. Para ello se desarrollaron programas en Pascal versión 7.0 para obtener la respuesta escalón del sistema con diferentes valores del escalón. Los resultados se observan en la gráficas 5.7.



(a)

(b)

figura 5.7. Respuestas escalón del sistema.

Las gráficas se dividieron en dos condiciones de prueba, la primera, aquellos valores de escalón que dan una respuesta dentro del intervalo de operación de la bomba difusora (a) y los

escalones que dan una respuesta que ya no abarca el bombeo principal y se utiliza el bombeo mecánico (b). Se observa, en las gráficas (b) de la figura 5.7, que para valores de escalón que dan salidas del orden de volts el sistema es casi lineal y la respuesta puede aproximarse a un sistema de primer orden o a uno de segundo orden sobre amortiguado. En cambio, para la gráficas en (a) el sistema presenta un sobrepaso pero la forma de la respuesta no se asemeja a la de un sistema de segundo orden subamortiguado. En este caso, durante las pruebas se notó que existen dos linealidades macroscópicas relevantes. El sistema requiere de un mínimo de gas para que la presión pase de la presión base a cualquier otra. En este caso el sistema requirió de una apertura del 15% o un voltaje de 1.5v para obtener una respuesta en el sensor. El valor de la respuesta (presión) no sobrepasa un valor final determinado, a entradas escalón de valores mayores a 5V, es decir, al aumentar el valor de escalón no se ve un aumento en la señal final del sensor. Esta condición se debe tanto al sensor como al sistema mismo. El sensor tiene un intervalo de medición de  $1 \times 10^{-4}$  Torr a 2 Torr por lo que presiones por debajo de este intervalo son marcados como cero o negativo y presiones por encima (de 2 Torr a presión atmosférica) son marcados como plena escala (10v). Además la cantidad de gas que entra al sistema debe ser superior a la que la bomba difusora puede vaciar por unidad de tiempo para observar cierta reacción en el sistema. Se observó que el sistema, aún con la válvula completamente abierta no alcanza una presión superior a los 5 Torr. En conclusión existe un nivel de umbral y saturación en el sistema. Las presiones de trabajo normales para el depósito de películas no sobrepasan los 1000 mTorr por lo que no es necesario llegar a la saturación para fijar los valores de trabajo, en cambio, el límite inferior de la presión de trabajo es muy cercano al umbral por lo que el sistema en este caso se ve más afectado por esta no linealidad.

Para obtener el modelo experimental se utilizó el método de curva de reacción descrito en el capítulo anterior para modelos de primer orden con tiempo muerto. Se utilizaron las curvas de la figura 5.7b y con la ayuda de la simulación con el paquete de manejo de matrices MatLab se obtuvo el siguiente modelo:

$$G(s) = \frac{K e^{-0.217s}}{5.15625s + 1}$$

La ganancia  $K$  fue un parámetro que presentó gran variación para los modelos de cada respuesta. Los valores varían de 1.6307 a 1.0. En la figura 5.8 se muestra la comparación de los datos experimentales y el modelo obtenido.

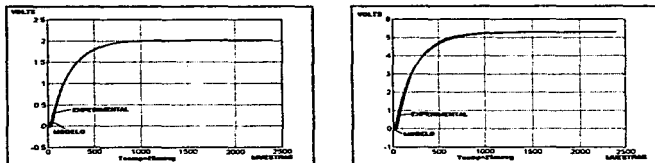


figura 5.8. Comparación del modelo y los datos experimentales.

Se observa que el modelo propuesto se aproxima en gran medida al sistema real por lo que se utiliza para el diseño del controlador. Para el diseño de controlador se utilizaron las fórmulas de Dahlin ya que éstas aproximan la respuesta de lazo cerrado a la respuesta de un sistema de primer orden; evitando así, en lo posible, que la respuesta transitoria pueda presentar sobrepasos

considerables y pueda llegar a salir del intervalo de operación de la bomba difusora para presiones de trabajo dentro de su intervalo de operación. El desarrollo se muestra a continuación.

Dados  $K=1.272$  (promedio de las ganancias de los modelos),  $\tau=5.15625$  seg y  $\Theta=0.9375$ seg, se obtiene:

$$\tau_c = \frac{1}{5}\Theta = 0.1875$$

$$K_c = \frac{\tau}{K(\Theta + \tau_c)} = \frac{5.15625}{1.272(0.9375 + 0.1875)} = 3.6032$$

$$Tl = \tau = 5.15625$$

$$Td = \frac{\Theta}{2} = 0.46875$$

Con el programa MatLab se simuló el comportamiento de dicho controlador con el modelo obtenido, obteniéndose las siguientes gráficas para referencias tipo escalón.

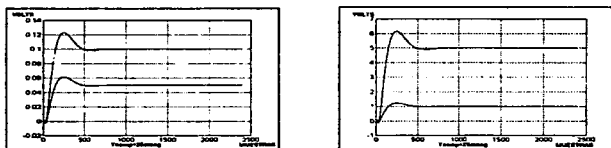


figura 5.9. Simulación del controlador con el modelo.

Se observa que la respuesta transitoria del lazo cerrado presenta un tiempo de asentamiento de aproximadamente 20 seg (800 muestras) y un sobrepaso de 25%, a pesar de esto se considera

que la respuesta es lo suficientemente satisfactoria para realizar pruebas con el sistema real. Para ello se desarrolló un programa en Turbo Pascal 7.00 para programar el algoritmo de control. Estas pruebas abarcaron tanto en el intervalo del cual se obtuvo el modelo y se hizo el diseño, como en el intervalo de operación de la bomba difusora. las gráficas de la figura 5.10 muestran una comparación de los resultados esperados por la simulación y los reales.

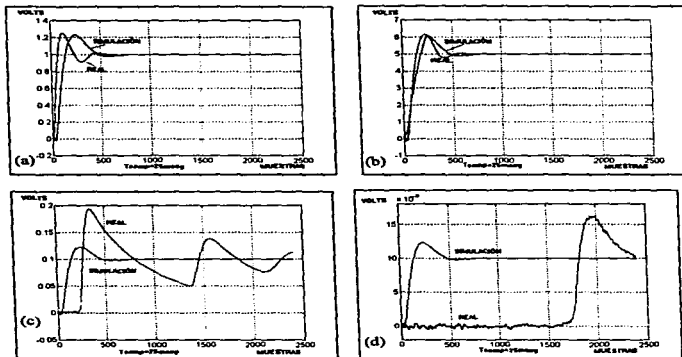


figura 5.10. Comparación de respuestas simulada y real del controlador.

Se observa que el desempeño del controlador en el intervalo donde se obtuvo es muy similar (figuras 5.10a y 5.10b), pero en el intervalo de la bomba difusora la respuesta transitoria se degrada en gran medida, tanto en el aspecto de sobrepaso como en el de tiempo de asentamiento

(Figuras 5.10c y 5.10d). Se observa que la respuesta transitoria de valores de referencia en el intervalo de operación de la bomba difusora se presenta un sobrepaso que va desde 70% hasta 90%, se presenta un tiempo muerto que aumenta conforme disminuye el valor de la referencia ya que el algoritmo está diseñado para que no exista demasiado sobrepaso, los pasos del controlador a valores de referencia pequeños son menores que a valores de referencia mayores. El ruido de la señal se vuelve más significativo a una referencia de 10 mV pero no afecta la estabilidad del sistema en más del 5%. Además de esta comparación se realizaron pruebas al controlador al cambio de referencia y se obtuvieron las siguientes gráficas (figura 5.11).

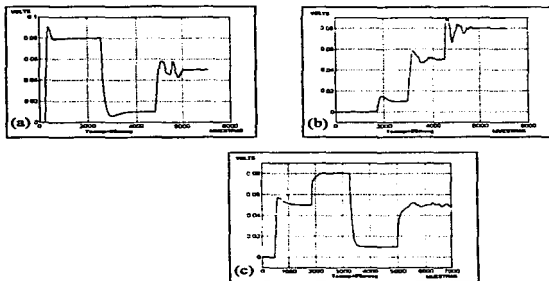


figura 5.11. Desempeño del controlador al cambio de referencia.

Se observa que la respuesta transitoria no es la más deseada ya que existe sobrepaso a cada cambio de referencia y un número de oscilaciones antes de estabilizarse al valor deseado. Para mejorar este desempeño se realizó un ajuste de los parámetros del controlador. Para ello se

realizaron pruebas en el intervalo de la bomba difusora para mejorar el desempeño para estos valores. Al lograr cierta mejoría se probó la respuesta de dichos valores en el intervalo del bombeo mecánico. Los valores finales para el controlador PID fueron  $K_c=10$ ,  $T_i=10$  y  $T_d=0.2$ . Con estos valores se obtuvieron las siguiente respuesta (figura 5.12).

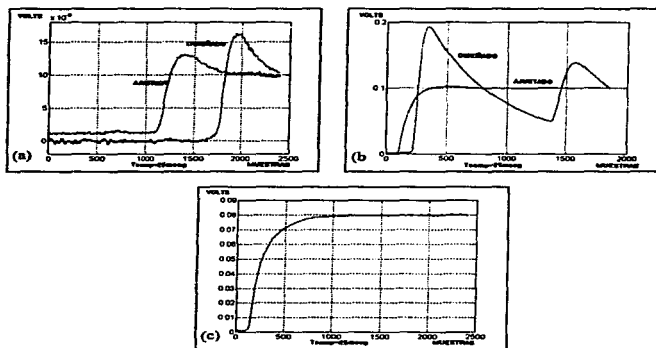


figura 5.12. Comparación de los desempeños del controlador original y del ajustado.

Se observa en las gráficas de la figura 5.12 que la respuesta transitoria del lazo cerrado mejoró en gran medida. Ya no se presentan sobrepasos mayores al 30% y los tiempos muertos para valores de 10 mV se redujeron casi 25 segundos por lo que el tiempo de asentamiento llega a casi 1 minuto aún para valores pequeños de referencia. Este desempeño cumple los objetivos de diseño

propuestos. Se realizaron las pruebas al cambio de escalón y los resultados se muestran en la figura 5.13

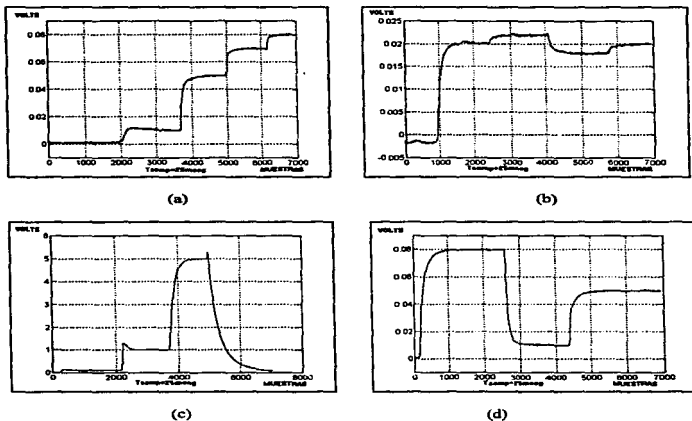


figura 5.13. Respuesta del controlador ajustado al cambio de referencia.

Se observa en la gráfica de la figura 5.13c que este controlador también funciona adecuadamente en el intervalo de la bomba mecánica, aunque para este caso presenta sobrepaso, éste ya no tiene tanta importancia como en el intervalo inferior de presiones donde el



funcionamiento de la bomba difusora se ve comprometido si la presión llega a valores mayores a 20 mTorr.

### 5.5 Integración del sistema.

Finalmente se hizo un programa prototipo que integra todos los equipos, maneja todas las señales y controla el proceso de introducción de gas. Este programa se realizó en Turbo Pascal versión 7.00 utilizando programación estructurada. El algoritmo de control y el monitoreo de presión y espesor se programó como rutina de manejo de interrupción y es un proceso fuera de línea que se realiza en tiempo real. Como proceso en línea se tiene la interacción con el usuario, en ésta se le pide al usuario que proporcione los parámetros iniciales del depósito. Se requiere la presión de trabajo, fuente a utilizar, la potencia de dicha fuente, el espesor final o el tiempo de depósito y el material a depositar. Durante el proceso de vaciado o durante el mismo depósito el usuario puede cambiar los parámetros.

El programa sigue la rutina manual de preparación y ya que en este momento no se cuenta con válvulas automáticas, sólo se le indica al usuario cuando y cual válvula debe de abrir durante el proceso. El programa se encarga de monitorear el proceso de vaciado y una vez alcanzada la presión base inicia con el algoritmo de control para la introducción de gas y fija la presión al valor de la presión de trabajo. Posteriormente, fija la potencia de la fuente escogida y al estar estable la presión de trabajo prende la fuente correspondiente. Se monitorea el crecimiento de la película y el tiempo de depósito, apagando la fuente en el momento en que el espesor o el tiempo final sea alcanzado, dependiendo de la elección del usuario. Finalmente, le indica al usuario el fin del proceso, la secuencia de venteo y pregunta si desea realizar otro depósito. Los parámetros finales de

la película, presión de trabajo, fuente utilizada, potencia, material, espesor final, tiempo de depósito y presión base son grabados en el disco duro de la computadora para llevar una bitácora de películas y condiciones de depósito. De igual forma se guardan la fecha y hora de la finalización del proceso.

Otras funciones que cubre el programa son el cambio de presión de transición entre vaciado primario y principal, presión base para iniciar el depósito, parámetros del controlador y una función de apagado total de fuentes. Este algoritmo es el mínimo requerido para realizar un depósito, pero es posible modificarlo con facilidad para que cumpla con otras rutinas que incluyan procesos de predepósito y postdepósito que vienen incluidos en controladores de depósito comerciales. Además se pueden ampliar el programa incluyendo funciones para configuración de algunos equipos, como el medidor de espesores o el controlador del Pirani y el Penning. estas funciones no son primordiales para el control del proceso de depósito por lo que en esta etapa no fueron incluidos.

Finalmente se elaboraron tres documentos, una memoria técnica de los circuitos desarrollados para la interconexión de los distintos equipos a la tarjeta de adquisición de datos; un manual para el usuario del programa prototipo de depósito de películas delgadas y un manual del programador de dicho programa. Estos documentos se realizaron con la finalidad de dejar constancia del trabajo que se realizó, de las capacidades del sistema y del programa y para ayudar al entendimiento del sistema actual para posteriores modificaciones.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.

Se ha concluido una primera etapa de la automatización del sistema de depósito de películas delgadas en el que se integraron los equipos disponibles para que una computadora personal se encargue del manejo de los mismos y se desarrolló un algoritmo de control automático para la introducción del gas de trabajo.

El desempeño del sistema de control de introducción de gas y presión de trabajo es comparable a los comerciales. Este sistema no requiere de calibración cada vez que se cambia de presión de trabajo, solo requiere calibración si los parámetros del sistema (volumen, velocidad efectiva de las bombas entre otros) varían significativamente. Además el uso de una computadora personal y la programación en Pascal en forma de módulos de procedimientos permite su inclusión en algoritmos en donde se requiera de control de presión, aún cuando el sistema sea para otra aplicación.

En esta etapa se desarrolló un controlador tipo PID debido a su sencillez y buen desempeño, el funcionamiento de éste es aceptable pero, es posible el desarrollo de un algoritmo específico utilizando algún algoritmo adaptable o de lógica difusa para tener un mayor control del proceso de introducción de gas. Esta labor no se considera primordial en este momento ya que el controlador actual satisface las necesidades del proceso.

En general el sistema de control de depósito de películas delgadas ofrece ciertas ventajas comparado con el sistema manual que se utilizaba anteriormente. El sistema ofrece la capacidad de reproducir condiciones de depósito de manera más precisa, con el control manual era prácticamente imposible fijar la misma presión durante dos depósitos distintos;

además el proceso de fijar una presión de trabajo cerrando y abriendo manualmente una válvula de entrada de gas era laboriosa, imprecisa y se corría el peligro de sobrepasar el intervalo de operación de la bomba difusora, afectando su funcionamiento. Los sistemas comerciales de control de depósito no incluyen el control de introducción de gases para fijar la presión de trabajo, solo incluyen el manejo de fuentes y medición de espesor. En general controlan muy poco la lógica del proceso.

El sistema desarrollado tiene la flexibilidad necesaria para desarrollar algoritmos más complejos que el actual sin mucho esfuerzo. Estos algoritmos podrían incluir preproceso de sustratos para obtener mayor limpieza, preproceso del material a depositar para eliminar impurezas superficiales y postproceso de las películas para mejorar sus propiedades.

Para mejorar el sistema de depósito, es deseable la instalación de válvulas neumáticas para la descarga de la bomba difusora, el venteo de la cámara de depósito y una válvula proporcional de conductancia variable entre la bomba difusora y la cámara. Esta última facilitaría el control de la presión de trabajo [Jacobs, 1994]. Con esta válvula se tendría el control de la velocidad de bombeo y una protección para la bomba difusora. La adición de estas válvulas automatizaría por completo el proceso, desde el vacío previo y principal hasta el venteo para sacar las películas ya depositadas sin el peligro de abrir una válvula sin estar en las condiciones adecuadas. El usuario solo tendría que programar los parámetros de la película y el sistema se encargaría de todo el proceso.

El trabajo en este sistema es, principalmente, como prototipo de procesos de depósito, en él se experimentan diversos parámetros de depósito para buscar los óptimos

para obtener las propiedades que se buscan en las películas (adhesión, tasa de depósito, propiedades eléctricas, ópticas etc.). También se busca hacer más eficiente el proceso ya sea modificando algún paso del mismo o incluyendo otros equipos de vacío. Por esta razón el sistema cambia frecuentemente de forma y equipo. Sería de gran utilidad un programa que pueda, automáticamente, calibrar el controlador de presión ya que esto evitaría la tarea de realizar pruebas de calibración cada vez que el sistema de vacío es modificado significativamente.

Se puede mejorar la calidad de las películas producidas en este sistema instalando sistemas que minimicen la necesidad de abrir la cámara de depósito a la atmósfera y por lo tanto minimicen la contaminación de su interior. Actualmente, el sistema necesariamente se tiene que abrir para introducir sustratos y para cambiar los blancos del material a depositar. Para reducir las impurezas se requiere de una cámara de aislamiento de carga y descarga de sustratos y un sistema en el que se pueda tener varios materiales y escoger sólo los que se depositan o el orden en que serán depositados.

El programa desarrollado para la integración de los equipos se considera como un prototipo y solo incluye las funciones necesarias para realizar el depósito de una película. Sin embargo, es posible desarrollar un programa que tenga interfaz amigable y gráfica con el usuario, con funciones de seguridad para el equipo y el usuario así como la programación de algoritmos de depósito predeterminados. Esta labor se deja como una segunda etapa de la automatización ya que requiere de las válvulas antes mencionadas para ofrecer el desempeño adecuado.

Este trabajo ha significado un primer contacto real en los campos de instrumentación y control. Se han aplicado los conocimientos adquiridos en la carrera, y la formación dentro de la misma ha permitido tener la capacidad de asimilar nuevos conocimientos aún cuando éstos no se encuentran en el campo de la ingeniería. Se busca en un futuro poder automatizar un sistema con una cámara de depósito de mayores dimensiones para lo cual la experiencia adquirida en esta fase será de gran utilidad y los trabajos realizados facilitan su implantación en sistemas similares.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Maissel, L.I., Reinhard, G. (editores).  
Handbook of thin film technology.  
McGraw-Hill  
N.Y., E.U.A., 1970.
- 2.- Wasa, K., Hayakawa, S.  
Handbook of sputter deposition technology. Principles, technology and applications.  
Noyes publications.  
Park Ridge, N.J., E.U.A., 1992.
- 3.- Vossen, John L., Kern, Werner.  
Thin film processes II.  
Academic Press, Inc.  
Boston, E.U.A., 1991.
- 4.- Graeme, J.G., Tobey, G.E., Huelsman L.P.  
Operational amplifiers. Design and applications.  
McGraw-Hill  
vigésima primera edición.  
Singapore, 1989.
- 5.- Tietze, V., Schenk, Ch.  
Circuitos electrónicos avanzados.  
Marcombo-Boixareu Editores.  
Barcelona, España, 1983.
- 6.- Smith, C.L.  
Computer process control.  
Intext Publishing Co.  
E.U.A., 1970.
- 7.- Smith, C.A., Corripio, A.B.  
Principles and practice of automatic process control.  
John Wiley and Sons.  
Singapore, 1985.
- 8.- Franklin, G.F., Powell, J.D., Workman, M.L.  
Digital control of dynamic systems.  
Addison-Westley.  
segunda edición.  
E.U.A., 1990.

- 9.- **Manual del laboratorio de control digital.**  
Facultad de ingeniería, UNAM.
- 10.- **User's manual Pc-LabCard PCL812PG.**  
Advantech Co. Ltd.  
Taiwan, mayo 1990.
- 11.- **Instruction manual. Pressure controller. Type Micro-Pascal.**  
Alcatel CIT, Department Industries, Division technologie de vide.  
Francia, 1992.
- 12.- **MKS type 448A/B/C Control valve. Instruction manual.**  
MKS Instruments, Inc.  
Rev. H.  
Andover, Massachusetts, E.U.A. julio, 1992.
- 13.- **MKS Baratron Type 122A Absolute pressure gauge.**  
MKS Instruments, Inc.  
Rev. D.  
Andover, Massachusetts, E.U.A. septiembre, 1990.
- 14.- **Sycon Instruments STM100 Thickness/Rate Monitor. User's Manual.**  
Rev. B.  
Sycon Instruments Inc.  
Syracuse, N.Y. E.U.A. julio, 1989.
- 15.- **The Advanced Energy MDX 1K Magnetron Drive User Manual.**  
Advanced Energy Industries, Inc.  
Fort Collins, Colorado, E.U.A. 1990.
- 16.- **The Advanced Energy RFX 600 Generator. User Manual.**  
Advanced Energy Industries, Inc.  
Fort Collins, Colorado, E.U.A. junio 1991.
- 17.- **The Advanced Energy ATX Tuner. User Manual.**  
Advanced Energy Industries, Inc.  
Fort Collins, Colorado, E.U.A. marzo 1991.



- 18.- Swan, Tom  
Mastering Turbo Pascal 6.  
Hayden books, prentice-Hall.  
cuarta edición.  
Indiana, E.U.A., 1991.
- 19.- Feibel, Werner.  
Turbo Pascal 7 Handbook.  
Osborne, McGraw-Hill.  
california, E.U.A., 1993.
- 20.- Linear and Interface Integrated circuits. (Manual).  
Motorola Inc.  
Serie G. Rev. 3.  
E.U.A., 1990.
- 21.- Jacobs, Richard P.  
Keep your vacuum system under tight control.  
Boletín informativo de MKS Instruments Inc.  
Re-impreso de Instrumentation & control systems, enero, 1994.

## **ANEXO A. BOMBAS DE VACÍO.**

El sputtering así como muchos otros métodos de producción de películas delgadas, procesos industriales y pruebas de laboratorio requieren de un ambiente controlado y una presión menor que la ambiente, tanto para evitar la contaminación del material procesado como para la realización o eficiencia del proceso. En el caso del sputtering es necesario que exista alto vacío (alrededor de  $10^{-6}$  Torr) en la cámara de depósito antes de iniciar el depósito para reducir al máximo los contaminantes y durante el depósito se requiere de una presión de  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$  Torr para tener suficientes iones para iniciar la descarga gaseosa y acelerarlos al blanco, pero no deben existir demasiadas partículas en la cámara ya que con esto el material desprendido del blanco no tiene un camino libre medio suficientemente largo para llegar al sustrato y formar la película.

La tecnología de vacío es la disciplina que estudia la interacción de las moléculas de los gases entre sí y con las superficies, para lograr mantener y medir presiones menores a la atmosférica en espacios cerrados. Esta disciplina considera los materiales más adecuados y los ensambles mecánicos que resisten los esfuerzos de presiones varias décadas menores a la atmosférica minimizando las fugas y la degasificación de las superficies.

Para obtener presiones menores a la atmosférica en una cámara sellada se utilizan dos principios. El primero es el desplazamiento físico de los gases del interior al exterior; las bombas mecánicas y las de flujo o chorro de vapor trabajan bajo este principio. El otro método se basa en la condensación o captura de moléculas de gas dentro de alguna parte de la superficie interna de la cámara de vacío sin sacar el gas; las bombas criogénicas, de sublimación, iónicas y de sorción pertenecen a esta categoría.

Una medida cuantitativa de transporte o de captura de moléculas de una bomba es su caudal o flujo  $Q_a$  expresado en Torr·l/seg a 20°C, que es la cantidad de gas que fluye por la sección transversal de la toma de la bomba por unidad de tiempo y depende de la presión. Otra cantidad que caracteriza el desempeño de las bombas es la velocidad de bombeo  $S$ , ésta es la razón del flujo y la presión parcial de un gas en un punto cercano a la toma de la bomba:  $S=Q_a/p$ . Las unidades de la velocidad de bombeo son litros/seg a 20°C. Esta velocidad es constante sobre varias décadas de presión, pero por debajo y por encima de este intervalo, la velocidad disminuye drásticamente y las bombas se vuelven muy ineficientes. Esta característica define el intervalo de operación de cada tipo de bomba.

#### A.1. Bombas mecánicas.

Estas bombas mueven moléculas por el movimiento cíclico de un sistema de partes mecánicas, esto se logra con diferentes principios de operación. Para la producción de películas, tres tipos de bombas mecánicas son de interés:

a) Bombas rotatoria de paletas. Estas bombas tienen un estator y un rotor excéntrico con dos paletas en una ranura diametral. El estator es un cilindro cerrado de acero inoxidable cuyas tapas sujetan la flecha del rotor y en el estator se encuentran colocados los agujeros de entrada y salida de gas. La flecha del rotor está colocada de tal forma que uno de los lados del rotor casi toca la pared superior del estator (2 a 3 micras de separación) y forma un sello llamado sello superior, el cual se encuentra entre los agujeros de entrada y salida. Las paletas montadas en el rotor utilizan resortes para obtener un buen ajuste contra las paredes del estator, estableciendo un sello y formando dos

cámaras aisladas. Todo el ensamble rotor-estator está sumergido en aceite. La figura a.1 muestra un esquema de este tipo de bomba.

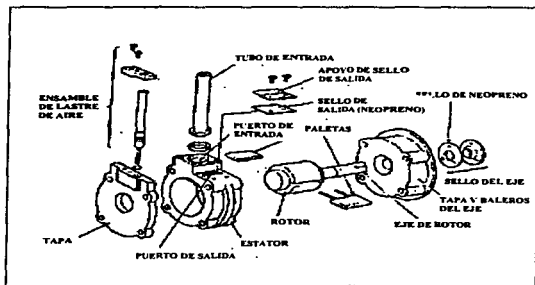


figura a.1 Bomba rotatoria de paletas.

El funcionamiento se muestra en la figura a.2 Cuando la paleta A pasa por el puerto de entrada permite la entrada de un volumen de gas hasta que la paleta B pasa por la entrada y aísla el gas entre las dos paletas. Al pasar por la salida, la paleta A permite la salida del gas a la atmósfera empujado por la paleta B. Finalmente, la paleta B al pasar por la entrada reinicia el ciclo tomando el papel de la paleta A. Su intervalo de operación va desde presión atmosférica a  $5 \times 10^{-3}$  Torr para bombas de 1 etapa y de  $10^{-4}$  Torr para las de 2 etapas.

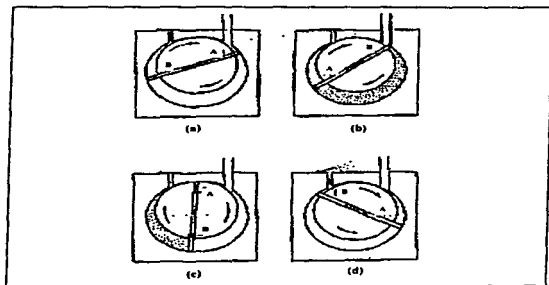


figura a.2. Funcionamiento de bomba rotatoria de paletas.

b) Bombas Roots. Este tipo de bombas están formados por dos impulsores en forma de lóbulos dobles rotando en sentidos opuestos como se muestra en la figura a.3. Los lóbulos se diseñan de tal forma que al rotar siempre exista una máxima superficie de ajuste entre los lóbulos y de los lóbulos con la carcasa de la bomba. La entrada y la salida están aislados por un pequeño hueco por lo que existe un flujo de regreso y la eficiencia de compresión es mucho menor que las bombas de paletas. Sin embargo, ya que no existen superficies de contacto, la velocidad de rotación es alta (1000 a 3000 rpm), obteniéndose altas velocidades de bombeo. En la posición 1 El gas entra y parte de él queda atrapado por el lóbulo inferior como se muestra en la posición 2. Este volumen atrapado es descargado en las posiciones 3 y 4. Además en la posición 4 se muestra un volumen de gas atrapado por el lóbulo superior, el cual será descargado durante el siguiente cuarto de

revolución. Estas bombas son más eficientes en el intervalo de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$  Torr por lo que requieren de una bomba previa para su funcionamiento. La ventaja fundamental de estas bombas es su capacidad para el manejo de grandes volúmenes de gas y su alta velocidad.

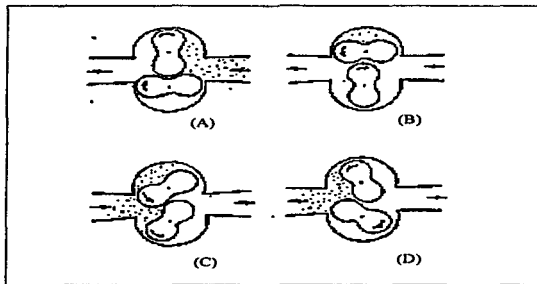


figura a.3. Bomba Roots y su funcionamiento.

c) Bombas de arrastre molecular. Se basan en el momento tangencial que se le imprime a las moléculas de un gas que chocan contra una superficie en movimiento. A una presión cercana a la atmosférica, las moléculas que chocan contra la superficie sólo transmiten el momento recibido a otras moléculas a través de colisiones. Por lo tanto, el flujo resultante depende de la viscosidad del gas. A bajas presiones, el flujo es molecular y casi todas las moléculas chocan con la superficie en movimiento por lo que la eficiencia de bombeo y la relación de compresión aumentan. Este principio se aplica a las modernas bombas turbomoleculares que contienen etapas axiales alternadas

de discos rotatorios y platos fijos. Los discos y platos están cortados con ranuras colocadas a un ángulo tal que las moléculas atrapadas en las ranuras de los discos sean proyectadas preferentemente en la dirección de las ranuras de los platos. Existe una distancia mínima entre platos y discos, típicamente del orden de 1mm. La variación del ángulo de las ranuras modifican la razón de compresión de flujo cero y la velocidad de bombeo; un ángulo de 20° es utilizado en muchas aplicaciones. El intervalo de operación va desde  $10^{-3}$  a  $10^{-9}$  Torr y requiere de una bomba previa y de respaldo.

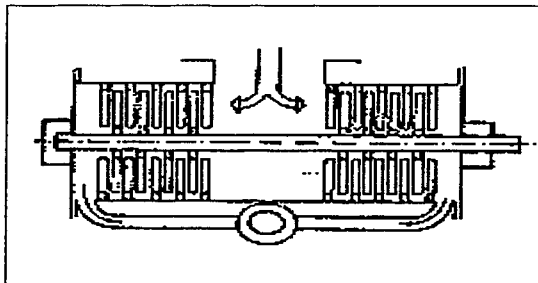


figura a.4. Bomba turbomolecular

#### A.2. Bombas de vapor.

Las bombas de vapor se clasifican en bombas difusoras y eyectores. La distinción entre estas bombas radica en la razón del camino libre medio en la boca de la bomba y el ancho de ésta.

Ambas bombas tienen un calefactor en la base y un fluido de trabajo que proveen el vapor. En el eyector, el camino libre medio  $\lambda$  de las moléculas de gas en la entrada de la bomba es menor que la mitad del espacio libre; la figura a.5 muestra un esquema de un eyector. El fluido de trabajo es calentado en la parte inferior de la bomba y sube por la chimenea hasta la boquilla, que debido a su forma produce un chorro supersónico que entra a los difusores donde termina condensándose en las paredes frías de los mismos y de regreso al calefactor por el tubo de retorno. El gas es sometido a los efectos del arrastre viscoso y flujos turbulentos que lo llevan (a altas velocidades) a la parte inferior del difusor, el cual disminuye de sección transversal, hasta un orificio cerca de la salida. Con este procedimiento se logra, aproximadamente, un factor de compresión de 10. Normalmente este proceso se repite más de una vez con etapas conectadas en serie y en la última etapa el gas comprimido es removido por una bomba de respaldo. Los eyectores pueden llegar a producir una presión de hasta  $10^{-1}$  Torr.

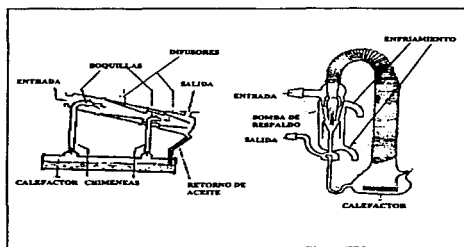


figura a.5. Eyector



En la bomba difusora el vapor sube por una chimenea y se desvía por la acción de una sombrilla colocada en lo alto de la misma. El vapor, al pasar de una región de alta presión a una de baja presión (comparativamente), se expande alterando su distribución normal de velocidades moleculares y creando una componente mayor en la dirección de la expansión por lo que el chorro se mueve a una velocidad supersónica con respecto a su temperatura. Esto es importante ya que un chorro saliendo con una distribución normal de velocidades se esparciría en todas direcciones y no produciría un efecto de bombeo. El chorro choca con las moléculas de gas en la entrada de la bomba y ya que el camino libre medio  $\lambda$  es mayor que a la mitad del espacio libre en la boca, la interacción entre el gas y el vapor se basa en la difusión, que arrastra las moléculas de gas a una región de mayor presión (la salida) . Este efecto produce un gradiente de presión entre la punta y la base de la chimenea, donde una bomba de respaldo desaloja el gas acumulado. Para prevenir un regreso de gas de la zona de alta presión a la de baja, el chorro debe conservar en lo posible su densidad, para esto se disminuye la sección libre de la parte inferior de la bomba y se enfrían las paredes de la misma, consiguiéndose también la recuperación del fluido de trabajo. Las bombas difusoras, al igual que otros tipos de bombas, manejan etapas en serie (normalmente 3) para aumentar su eficiencia, en este caso, al poner etapas en serie se aumenta la velocidad y direccionalidad del chorro. En la figura a.6 se muestra un esquema de una bomba difusora con sus partes.

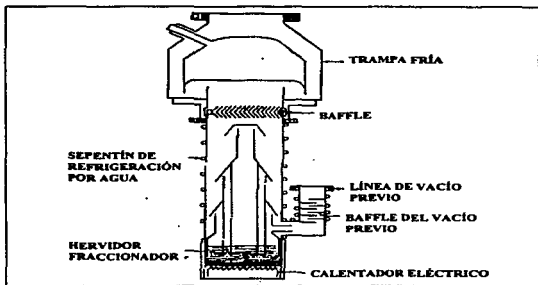


figura a.6. Bomba difusora.

Los fluidos utilizados en las bombas difusoras deben cumplir dos requisitos; uno, es la estabilidad con respecto a la descomposición térmica y la oxidación a la temperatura de trabajo; la otra, es una baja presión de vapor a temperatura ambiente. originalmente el fluido utilizado era mercurio, pero con el desarrollo de aceites sintéticos éstos han sustituido el uso del mercurio.

Teóricamente, la presión última de estas bombas debería ser la presión de vapor del fluido de trabajo a la temperatura de operación, pero se ha visto que en el intervalo de  $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  las difusoras emiten tanto vapor contaminante como el que bombean. El problema de reflujo de contaminantes producidos es de gran importancia ya que contaminan los procesos y degradan las propiedades de las películas delgadas. Algunas medidas para evitar el reflujo consisten en colocar

un anillo enfriado por agua en el borde de las toberas o enfriar la sombrilla superior; otra medida efectiva es la instalación de trampas y deflectores entre la bomba y la cámara.

Los deflectores consisten en superficies que obstruyen el paso de moléculas de gas y existen versiones enfriadas que condensan las moléculas del fluido de trabajo para que regresen al calefactor. Las trampas son grandes superficies enfriadas para atrapar las moléculas de gases y vapores sin posibilidad de que regresen al sistema sin un procedimiento de calentamiento para reevaporar el material acumulado.

La presión última que se puede obtener con bombas de difusión no depende de su razón de compresión sino de la emisión de contaminantes de la bomba y de los materiales del sistema de vacío. En sistemas apropiadamente resguardados del reflujo y con materiales desgaseados, es posible obtener presiones de  $10^{-11}$  Torr. Estas bombas son las más utilizadas para lograr altos niveles de vacío debido a su amplio intervalo de operación y su poca necesidad de mantenimiento.

### A.3. Bombas iónicas.

Si un gas es ionizado y los iones positivos resultantes acelerados a un plato cargado negativamente, los átomos del gas son efectivamente removidos y se produce una acción de bombeo. En términos generales, las bombas iónicas incluyen todos los dispositivos que utilizan la ionización y el transporte de iones por un campo eléctrico. La ionización se puede producir con un filamento caliente o un cátodo frío, dando así bombas iónicas de cátodo caliente o de cátodo frío. Los medidores de cátodo caliente y frío actúan como bombas, y se pueden utilizar para evacuar pequeños volúmenes previamente bombeados a  $10^{-3}$  Torr. Las velocidades de bombeo de los medidores de cátodo caliente alcanzan  $10^{-3}$  lt/seg, mientras los de cátodo frío alcanzan 1 lt/seg.

Con el fin de aumentar la eficiencia de bombeo, se combinan fenómenos de sorción, adsorción y reacción química. Las bombas que combinan estos fenómenos se llaman bombas de sorción-ionización. Las bombas en donde el material de sorción es continuamente o intermitentemente evaporado y condensado para tener una capa de material fresco se llaman bombas de adsorción-ionización. La evaporación se logra por evaporación térmica (bombas de evaporación-ionización) o por sputtering (bombas de sputtering-ionización). A pesar de que existen bombas sólo de ionización o iónicas, las bombas comerciales son de evaporación-ionización o de sputtering-ionización.

Las bombas iónicas no requieren de una bomba de respaldo ya que el gas permanece atrapado en una superficie del interior del sistema (colector), pero sí requieren de una bomba para realizar un vacío previo hasta  $10^{-3}$  o  $10^{-4}$  Torr y con ellas se logran presiones de aproximadamente  $10^{-9}$  Torr.

#### A.4. Bombas de sorción.

Estas bombas consisten en un recipiente con un material adsorbente activado y enfriado, conectado al sistema de vacío. El gas penetra al recipiente y es sorbido por el material hasta que éste se satura, por lo que periódicamente se debe regenerar el material a través de una desorción térmica. Los materiales utilizados son las zeolitas, las cuales poseen la capacidad de adsorber grandes cantidades de gas en su estructura cristalina porosa. La estructura molecular de las zeolitas consiste en cavidades casi esféricas conectadas por diminutos canales cuyos diámetros son del mismo orden que de las moléculas de gas. Las bombas de sorción consisten en un cuerpo de acero inoxidable con aletas internas de cobre para facilitar la transferencia de calor a la zeolita. El

recipiente, una vez conectado al sistema, se sumerge en nitrógeno líquido. Al disminuir la temperatura de la zeolita, adsorbe más gas debido a la reducción de la presión. Una vez llegado a la presión de equilibrio se cierra la válvula hacia el sistema. En este punto la zeolita está saturada y debe regenerarse, para lo cual se puede abrir una válvula de venteo y dejar que el material regrese a temperatura ambiente. Normalmente este es el único proceso necesario para reactivar una bomba de sorción, pero en algunas ocasiones es necesario calentar la bomba hasta 300°C para que los gases adsorbidos salgan completamente.

Las bombas de sorción se utilizan para bombear desde presión atmosférica y se logran presiones de  $10^{-2}$  Torr si la cantidad de material es el adecuado para el volumen a evacuar. Para bombear sistemas grandes se pueden utilizar más de una bomba a la vez o utilizar dos bombas alternativamente, mientras una es reactivada la otra bombea y viceversa.



figura a.7. Bomba de sorción.

#### A.5. Bombas criogénicas.

Las bombas criogénicas condensan gases y vapores a bajas temperaturas con el fin de reducir la presión de un espacio cerrado. Algunas moléculas incidentes a la superficie enfriada pueden ser reflejadas inmediatamente al sistema, mientras otras, son adsorbidas y permanecen en este estado cierto tiempo moviéndose por difusión en la superficie hasta que son permanentemente atrapadas en un sitio energéticamente favorable o algunas otras escapan nuevamente al sistema. En teoría todos los gases pueden ser atrapados de esta manera mientras la temperatura de la superficie sea lo suficientemente baja para que las moléculas que incidan en ella se queden ahí por la pérdida de energía cinética. Normalmente las bombas criogénicas consisten en superficies dentro del sistema de vacío en forma de tubos, cilindros o discos y un sistema de circulación de refrigerante externo. Los únicos refrigerantes que permiten enfriar lo suficiente las superficies son los gases licuados; los más utilizados son el nitrógeno, helio e hidrógeno líquidos. Estas bombas requieren de bombas de vacío previo, ya que para bombear grandes volúmenes de gas se requerirían grandes cantidades de refrigerante y la cantidad de material condensado en la etapa de bombeo de altas presiones reduce la eficiencia de la bomba para las bajas presiones. Las presiones últimas alcanzadas por estas bombas es de alrededor de  $10^{-9}$  Torr y generalmente se combinan con otros tipos de bombas de alto vacío para lograr presiones menores.

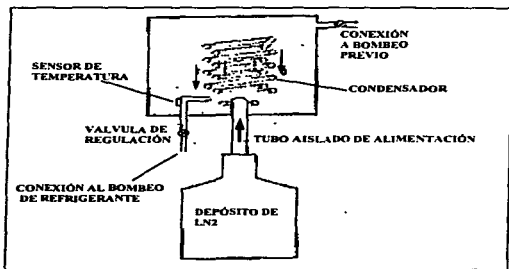


figura a.8. Bomba criogénica.