

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR

DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR
TECNOLÓGICA



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



SEP

TRABAJO PROFESIONAL

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

QUE PRESENTA:

JOSÉ ALFREDO ESPINOZA PINTO

CON EL TEMA:

**“PROCESAMIENTO ÓPTICO-DIGITAL DE
DEFORMACIONES DINÁMICAS DE OBJETOS”**

MEDIANTE:

OPCIÓN III

(Proyecto de investigación)

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

MARZO 2011

AGRADECIMIENTOS

A Dios:

Por permitirme vivir sano y con fuerzas para poder lograr mis metas, sueños, aspiraciones y sobretodo cumplir este gran sueño de lograr mi carrera.

A mis padres:

Principalmente por darme la vida, apoyarme, educarme, orientarme y no permitir que mi vida se fuera a la deriva, por brindarme todas las armas necesarias para lograr mis sueños.

A mis hermanas:

Por ser mis grandes pilares en mi vida y siempre procurar que yo consiga mis objetivos sin perder el rumbo, por ser mis amigas, confidentes y mí gran ejemplo a seguir.

A mis asesores:

El Dr. Carlos Pérez López por brindarme todo su conocimiento y la oportunidad de trabajar junto a él en este proyecto y depositar en mi su confianza.

A mis amigos:

Por ser un gran apoyo en esta etapa de mi vida, por soportar en las buenas y en las malas a mi lado y librar juntos tantas batallas.

El M.C. Álvaro Hernández Sol por su gran apoyo en el desarrollo de este proyecto y la revisión de este documento.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA.....	2
1.2 PROBLEMÁTICA QUE SE PRETENDE SOLUCIONAR	3
1.3 OBJETIVO	4
1.4 JUSTIFICACIÓN	4
CAPITULO 2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 LA LUZ COMO ONDA ELECTROMAGNÉTICA	5
2.2 INTENSIDAD LUMINOSA	9
2.3 INTRODUCCIÓN A LA ÓPTICA.....	10
2.4 LÁSER Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	13
2.5 SUMA DE ONDAS MONOCROMÁTICA	15
2.6 INTERFERENCIA DE DOS ONDAS MONOCROMÁTICAS.....	17
CAPITULO 3.- ELECTRÓNICA	19
3.1 PLL- AMARRE DE FASE	19
CAPITULO 4.- MEDICIÓN DE VIBRACIÓN CON VIBRÓMETRO LÁSER	23
4.1 VIBRÓMETRO.....	23
4.2 MEMBRANA RECTANGULAR Y CICLO LÍMITE.....	25
4.3 ECUACIONES	27
4.4 MEMBRANA NO LINEAL.....	29
4.5 CUASIPERIODICIDAD	31
CAPITULO 5.- EXPERIMENTO Y RESULTADOS	34

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	34
5.2. RESULTADOS	38
5.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEMBRANA	38
5.2.2 APLICACIÓN Y COMPROBACIÓN DE LA TEORÍA DE VAN DER POL.....	44
5.3 COMPARACIÓN CON MODELO TEÓRICO	46
5.4 PLL- AMARRE DE FASE PRACTICAS	47
5.5 TECNOLOGÍA DEL CHIP	50
CAPITULO 6.- CONCLUSIONES	52
6.1 TRABAJO FUTURO	53
Bibliografía.....	54
ANEXOS.....	55
TEJIDOS	55
PROBLEMAS EN TEJIDOS	57

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 2.1 Forma de la onda	5
Figura 2.2 Longitud de onda y espectro de frecuencias	6
Figura 2.3 Camino óptico	10
Figura 2.4 Proyección de objetos.....	11
Figura 2.5 Refracción de la luz	12
Figura 2.6 Luz incoherente	13

Figura 2.7 Luz coherente	13
Figura 2.8 Componentes principales del láser	15
Figura 3.1 Diagrama básico en bloques de un PLL.	19
Figura 3.2 PLL Circuito integrado	21
Figura 3.3 Estructura interna del PLL	22
Figura 4.1 Vibrómetro láser.....	23
Figura 4.2 Membrana rectangular	26
Figura 4.3 Ciclo limite.....	27
Figura 4.4 Ciclo límite para el oscilador de Van der Pol con $\epsilon = 0.05$	28
Figura 4.5 Ciclo límite para el oscilador de Van der Pol con $\epsilon = 1.5$	29
Figura 4.6 Ciclo limite en el modo de amarre para $\epsilon = 0.25$, $f = 3$, $\omega = 1.2$	30
Figura 4.7 Serie temporal para el desplazamiento con $\epsilon=0.25$, $f = 3$, $\omega = 1.2$	31
Figura 4.8 Trayectoria de fase de forma anular con $\epsilon = 0.25$, $f = 0.4$, $\omega = 1.2$	32
Figura 4.9 Desplazamiento oscilatorio de Cuasiperiodicidad	32
Figura 4.10 Espectro de potencia del oscilador de Van de Pol con $\epsilon=0.25$, $f = 3$, $\omega=1.2$	33
Figura 5.1 Diagrama del proceso del experimento	36
Figura 5.2 Arreglo para análisis de la membrana.....	37
Figura 5.3 Primeros resultados	40
Figura 5.4 Bocina - objeto	41
Figura 5.5 Vibrómetro – objeto	41
Figura 5.6 Resultados nuevo arreglo.....	43
Figura 5.7 Curva característica de la membrana.....	44
Figura 5.8 Batido de frecuencias.....	45
Figura 5.9 Muestreo a 5ms.....	45

Figura 5.10 Modelo teórico	46
Figura 5.11 Espectro de frecuencias.....	47
Figura 5.12 Generador de ondas cuadradas	47
Figura 5.13 Circuito VCO	48
Figura 5.14 Amplia gama del VC	49
Figura 5.15 Gama limitada del VCO	50
Figura 5.16 Comportamiento del PLL.....	51

CAPITULO 1.- INTRODUCCIÓN

En el periodo de enero – junio de 2009 se realizó el proyecto de investigación con el título “Procesamiento óptico-digital de deformaciones dinámicas de objetos”, en el cual se estudió la deformación de una membrana por interferometría óptica sometida a distintas excitaciones con la finalidad de comprobar la teoría de Van Der Pol.

A grandes rasgos, se puede encontrar en este material el análisis del comportamiento de la luz como onda y como partícula, su intensidad, su comportamiento bajo distintas circunstancias y medios. También se habla sobre el manejo de la luz para beneficio de la investigación.

También se estudia y analiza el vibrómetro láser, el cual es capaz de medir las vibraciones de cualquier cuerpo, gracias a un arreglo óptico, un láser y un circuito electrónico. Ya por ultimo y no por eso menos importante se estudia el PLL o mejor conocido como circuito de amarre de fase, es circuito tiene la función determinar si una señal se encuentra en fase con un referencia previamente establecida.

1.1 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA

Actualmente el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. se identifica como un Centro Público de Investigación, con la misión de llevar a cabo investigación básica y aplicada en Óptica, la formación de recursos humanos de alto nivel en el este mismo campo del conocimiento, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad, con la misión además de ser un Centro de Investigación de excelencia, con liderazgo nacional y reconocimiento internacional creciente en el campo de la óptica, ocupando un lugar central en el desarrollo de la ciencia y la tecnología en nuestro país.

Los programas de posgrado son desarrollados por los investigadores del Centro, por lo cual siempre se han caracterizado por ser programas de gran calidad y con el desarrollo del Padrón de Posgrados de Excelencia de CONACYT.

El Centro de Investigaciones en Óptica tiene diferentes áreas de investigación como Metrología, Fibras Ópticas y Fotónica, entre ellas la principal la principal función que tienen es el estudio de las características y aplicaciones de la luz a diferentes objetos y materiales.

El área donde se realiza el proyecto de investigación es la de Metrología Óptica que se encarga de aplicar interferometría óptica para el análisis de las deformaciones de distintos objetos y trabaja actualmente en proyectos de diagnóstico no invasivos a membranas biológicas. Con el apoyo del Dr. Carlos Pérez López se llevo a cabo este proyecto de investigación.

1.2 PROBLEMÁTICA QUE SE PRETENDE SOLUCIONAR

La salud es una de las cuestiones que más preocupa a la mayoría de los individuos, para esto existen muchas formas de mantenerse siempre saludable, con una dieta balanceada, ejercicio y distintos cuidados. Pero algo es muy cierto; ni con este tipo de cuidados tenemos la certeza de estar siempre saludables.

Cuando una persona se enferma tiene que someterse a distintos análisis y exámenes médicos, que pueden llegar a ser muy doloroso y en ciertos casos peligrosos, con el fin de descubrir cuál es la causa de su mal estado de salud. Llegando a este punto una persona enferma, puede estar agotada tanto físicamente como económicamente por lo antes mencionado.

Es por esto que en la actualidad se están investigando nuevos métodos de análisis médicos no invasivos, con el fin de poder realizar diagnósticos de ciertas enfermedades en tejidos sin tener que pasar por procesos dolorosos y desgastantes, procurando que sean confiables y con rapidez.

Con el fin de buscar una solución a este problema, se realizaron estudios a objetos y sus diferentes respuestas a distintas estimulaciones; Años atrás se realizó un análisis de campo completo de una membrana de poliéster (con características similares con un tejido humano) con un tamaño de 14x19 cm, y se observó que posee una oscilación propia, ya que la misma presentó modos de vibración sin recibir excitación externa alguna.

Para explicar este fenómeno, se recurrió a la teoría de osciladores libres de Van Der Pol, la cual se encuentra muy relacionada con el problema citado anteriormente.

1.3 OBJETIVO

Estudiar y determinar el comportamiento de una membrana de poliéster de 14x19 cm, determinar su curva característica y aplicar la teoría de osciladores libres de Van der Pol para comprobar la existencia de oscilaciones libres en la membrana.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El análisis sobre deformaciones de cuerpos realizado en el presente proyecto de investigación, no solo se enfoca a ver la deformación del cuerpo, si no a descubrir el por qué de la aparición de los distintos modos de vibración de la membrana sin recibir una excitación externa. Este es uno de los problemas que se han presentado al momento de realizar este tipo de análisis en experimentos realizados años atrás y que es más notorio en cierto tipo de materiales. Es por este motivo, que se realizó el estudio de una membrana de poliéster de 14x19cm y para determinar si este objeto posee una vibración o deformación propia que no es perceptible a la vista.

CAPITULO 2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 LA LUZ COMO ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío. La forma de onda se observa en la figura 2.1 donde λ es la longitud de onda, q es la carga eléctrica, E es el campo eléctrico B es el campo magnético, k dirección de propagación de la onda.

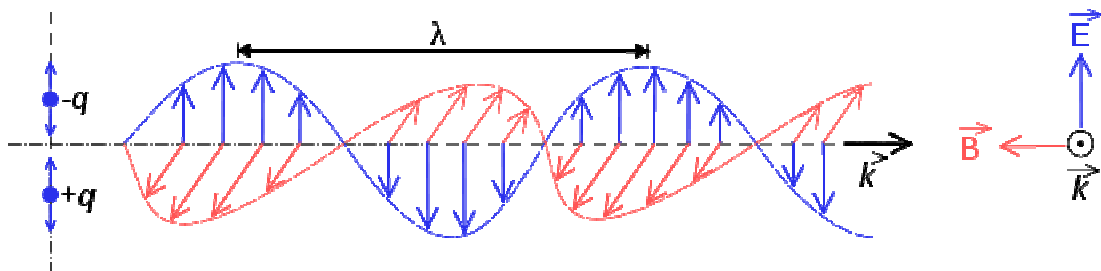


Figura 2.1 Forma de la onda

En espectroscopia, la longitud de onda es el parámetro usado para definir el tipo de radiación electromagnética, y se mide usualmente en nanómetros. Una longitud de onda corta indica que la radiación es muy energética, y viceversa. Por ejemplo, la longitud de onda de la radiación ultravioleta de una lámpara de las usadas para comprobar billetes es de 254 nanómetros, mientras que la longitud de onda de la radiación infrarroja emitida por una bombilla es de unos 700 nanómetros, el rango visible se encuentra de 400nm a 700nm como se puede ver

en la figura 2.2, en esta misma podemos observar algunas de la aplicaciones de algunas de las longitudes de onda.

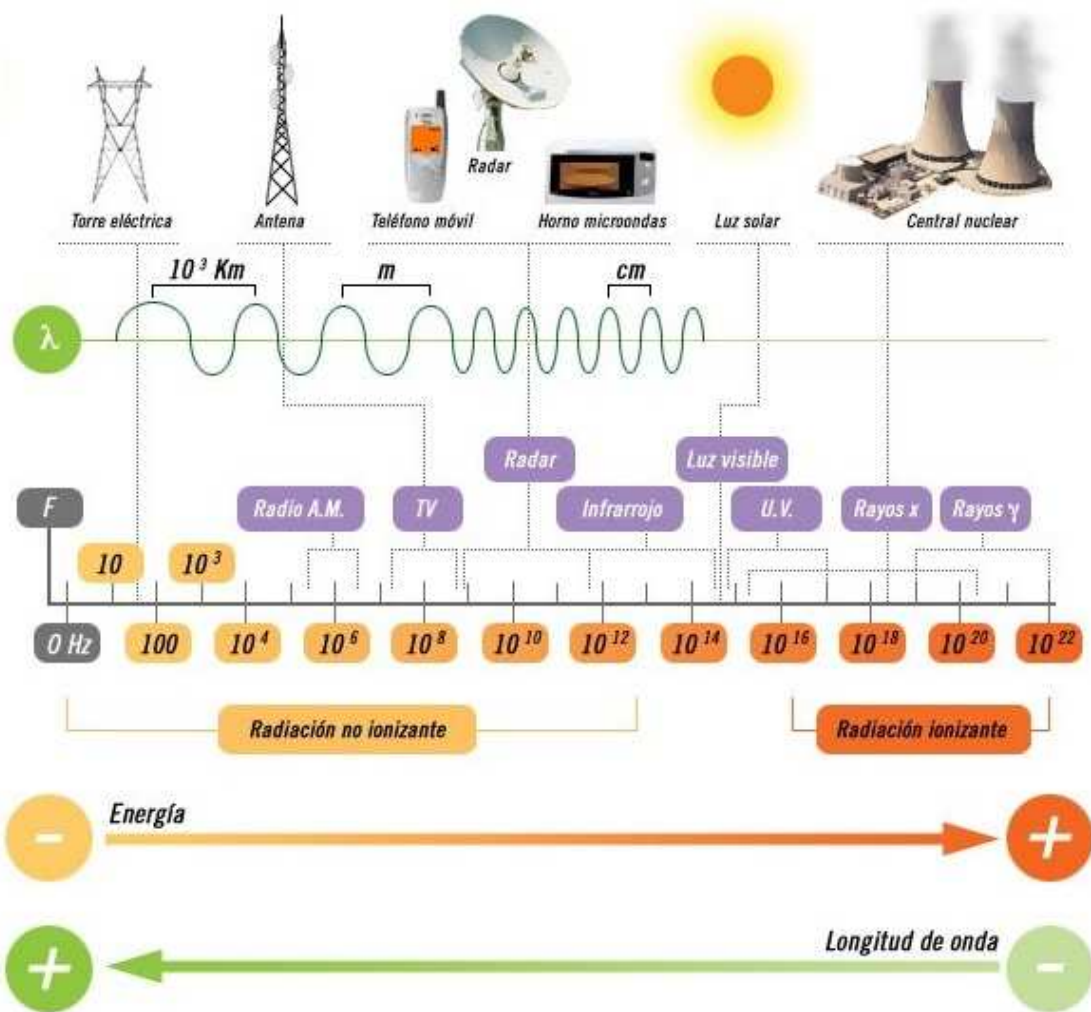


Figura 2.2 Longitud de onda y espectro de frecuencias

La longitud de onda de una radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia a través de la expresión.

$$\lambda = c/f \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

c = velocidad de la luz.

λ = longitud de onda

f = frecuencia

Es decir, que la distancia que existe entre dos alternancias consecutivas o dos pulsos es la longitud de onda (λ) como la distancia que recorre el pulso mientras una partícula del medio que recorre la onda realiza una oscilación completa. El tiempo que tarda en realizar la oscilación se llama período (T) y la frecuencia (f) es el número de oscilaciones (vibraciones completas) que efectúa cualquier partícula, del medio perturbado por donde se propaga la onda, en un segundo, se puede observar en la figura 2.2 y distinguir la longitud de onda.

Las ecuaciones de Maxwell dicen que un campo eléctrico variable en el tiempo genera un campo magnético y, recíprocamente, la variación temporal del campo magnético genera un campo eléctrico. Se puede visualizar la radiación electromagnética como dos campos que se generan mutuamente, por lo que no necesitan de ningún medio material para propagarse. Las ecuaciones de Maxwell también predicen la velocidad de propagación en el vacío (que se representa c , como la velocidad de la luz, con un valor de $299.792,458 \text{ km/s} \pm 0,1 \text{ km/s}$), y su dirección de propagación (perpendicular a las oscilaciones del campo eléctrico y magnético que, a su vez, son perpendiculares entre sí).

El fotón es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo a los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio. El fotón tiene una masa invariante cero, y viaja en el vacío con una velocidad constante c . Como todos los cuantos, el fotón presenta tanto propiedades corpusculares como ondulatorias. Se comporta como una onda en fenómenos como la refracción que tiene lugar en una lente; sin embargo, se comporta como una partícula cuando interacciona con la materia para transferir una cantidad fija de energía, que viene dada por la expresión:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde

h = constante de Planck

c = velocidad de la luz

λ = longitud de onda

Esto difiere de lo que ocurre con las ondas clásicas, que pueden ganar o perder cantidades arbitrarias de energía. Para la luz visible, la energía portada por un fotón es de alrededor de 4×10^{-19} julios; esta energía es suficiente para excitar un ojo y dar lugar a la visión.

2.2 INTENSIDAD LUMINOSA

En fotometría, la intensidad luminosa se define como la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta y específica. Matemáticamente se expresa como campo eléctrico al cuadrado (ecuación 2.3)

$$I = \langle E^2 \rangle \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

I= intensidad

E= campo eléctrico

La intensidad luminosa es detectada por los ojos o sensores, pero para el análisis en la óptica, la intensidad luminosa por sí sola no es visible, solo si se realiza una suma de campos eléctricos (E) y se eleva al cuadrado. Con esto se obtiene la ecuación 2.4.

$$\begin{aligned} I &= \langle E^2 \rangle = \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle && (\text{Ec. 2.4}) \\ &= \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + E_1 \cdot E_2^* + E_1^* \cdot E_2 \end{aligned}$$

Si

$$E_1 = V_{o1} e^{-j\omega t + \theta_1}$$

$$E_2 = V_{o2} e^{-j\omega t + \theta_2}$$

Por lo tanto tenemos que:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\theta) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Este término de la ecuación resultante (ecuación 2.6) es el que interesa ya que muestra las interferencias que se genera entre los dos campos eléctricos que en términos de óptica sería la interferencia entre ondas

$$2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\theta) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

2.3 INTRODUCCIÓN A LA ÓPTICA

La óptica (del griego *optomai*, ver) es la rama de la física que estudia el comportamiento de la luz, sus características y sus manifestaciones. Abarca el estudio de la reflexión, la refracción, las interferencias, la difracción, la formación de imágenes y la interacción de la luz con la materia. Estudia la luz, es decir cómo se comporta la luz ante la materia.

El camino óptico de la luz (figura 2.3) se da en un máximo, un mínimo o un nivel estacionario, debido al principio de Fermat (físico francés). Esto indica que para calcular las distancias entre un punto AB se utiliza la siguiente expresión:

$$AB = \int_A^B \eta ds \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde η es el índice de refracción.

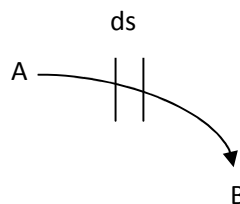


Figura 2.3 Camino óptico

Se puede usar a la luz como un flujo luminoso, se puede dirigir y ampliar o distribuir de la forma más conveniente.

Con la luz es posible realizar proyecciones de imágenes, con el uso las lentes y el fenómeno de refracción. En la figura 2.4 se muestra como un objeto es proyectado a través de una lente este se refracta (por medio de la ley de Snell) y se observa la imagen en otro punto:

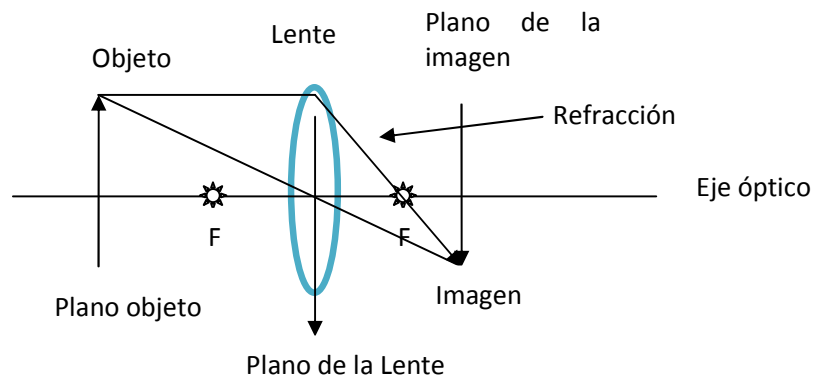


Figura 2.4 Proyección de objetos

Donde

F= distancia focal.

El método utilizado para el cálculo de los índices de refracción (ley de Snell) nos dice que:

$$\eta_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = \eta_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \quad \text{(Ec. 2.8)}$$

Donde:

θ_1 y θ_2 son los ángulos en los que viaja la luz.

η_1 y η_2 son los índices de refracción del medio en el que se desplaza la luz.

Ejemplo:

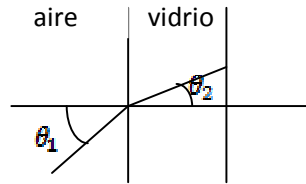


Figura 2.5 Refracción de la luz

En la figura 2.5 tenemos un ejemplo Donde $\theta_1 = 20^\circ$, índice de refracción del aire es 1 y del vidrio 1.5, necesitamos encontrar el Angulo θ_2 , para eso haremos uso de la ecuación 2.8 como se ve a continuación.

$$\eta_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = \eta_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

$$(1)(\text{sen } 20^\circ) = (1.5)(\text{sen } \theta_2)$$

Despejando nos resulta que:

$$\theta_2 = (\text{sen}^{-1})(0.21)$$

$$\therefore \theta_2 = 13^\circ$$

2.4 LÁSER Y SUS CARACTERÍSTICAS

La luz como tal, no tiene color, es oscura y logramos verla cuando esta choca con un objeto, como la luz proviene de una fuente puntual y existen dos fuentes de luz las cuales se denominan como luz incoherente y la luz coherente. La radiación electromagnética es producida a menudo por un gran conjunto de emisores individuales, produciendo cada uno un tren de ondas independiente, a este fenómeno se le denomina luz incoherente (figura 2.6). En general no hay una única frecuencia sino un espectro de frecuencias.



Figura 2.6 Luz incoherente

Se dice que dos puntos de una onda son coherentes cuando guardan una relación de fase constante (figura 2.7), es decir, cuando coincide el valor instantáneo del campo eléctrico en uno de los puntos, es posible predecir el del otro



Figura 2.7 Luz coherente

El láser es una fuente de luz coherente y sus siglas significan *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, y fue descubierto por Charles H. Townes y Nikolai Basor en 1964, Los láseres constan de un medio activo capaz de generar el láser. Hay cuatro procesos básicos que se producen en la generación del láser.

Bombeo - Se provoca mediante una fuente de radiación como puede ser una lámpara, el paso de una corriente eléctrica o el uso de cualquier otro tipo de fuente energética que provoque una emisión.

Emisión espontánea de radiación - Los electrones que vuelven al estado fundamental emiten fotones. Es un proceso aleatorio y la radiación resultante está formada por fotones que se desplazan en distintas direcciones y con fases distintas generándose una radiación monocromática incoherente.

Emisión estimulada de radiación - La emisión estimulada, base de la generación de radiación de un láser, se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones y así retornar a un estado menos excitado. El estímulo en cuestión proviene de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. Los fotones así emitidos por el átomo estimulado poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen. La emisión estimulada descrita es la raíz de muchas de las características de la luz láser. No sólo produce luz coherente y monocroma, sino que también "amplifica" la emisión de luz, ya que por cada fotón que incide sobre un átomo excitado se genera otro fotón.

Absorción - Proceso mediante el cual se absorbe un fotón. El sistema atómico se excita a un estado de energía más alto, pasando un electrón al estado metaestable. Este fenómeno compite con el de la emisión estimulada de radiación.

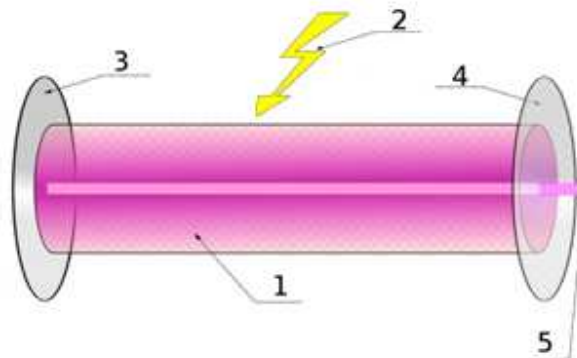


Figura 2.8 Componentes principales del láser

Las partes que componen principalmente el láser son las siguientes y se pueden observar en la figura 2.8.

1. Medio activo para la formación del láser.
2. Energía bombeada para el láser.
3. Espejo reflectante al 100%.
4. Espejo reflectante al 99%.
5. Emisión del rayo láser.

2.5 SUMA DE ONDAS MONOCROMÁTICA

Los patrones de interferencia implican la presencia simultánea de más de una onda, y entonces se debe considerar cómo agregar un número de ondas monocromáticas interferentes, y entonces aplicar la ecuación $I = 2 \langle \vec{v} \cdot \vec{v} \rangle$. Cada onda puede representarse por $\vec{v}_i = \vec{a}_i \cos(2\pi f t + \phi_i)$, donde la frecuencia f tiene un único valor, idéntico para cada onda (\vec{v}_i es el vector de campo eléctrico en la región de interferencia). La suma de estas funciones sinusoidales es una misma senoide, entonces tenemos:

$$\bar{a}_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1) + \bar{a}_2 \cos(2\pi ft + \varphi_2) + \dots = \bar{a} \cos(2\pi ft + \varphi) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Que se puede describir como:

$$\text{Re}[\bar{a}_1 \exp[i(2\pi ft + \varphi_1)]] + \text{Re}[\bar{a}_2 \exp[i(2\pi ft + \varphi_2)]] + \dots = \text{Re}[\bar{a} \exp[i(2\pi ft + \varphi)]] \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

Re[] indica la parte real de la cantidad compleja en el paréntesis.

Los cálculos son más simples usando la notación compleja, y se puede facilitarlos omitiendo el recordatorio de que las funciones de la onda son reales.

En este punto se distinguen varios términos que se aplicaran a la función compleja de la onda de luz como son las funciones del espacio y del tiempo que se ven en el lado derecho de la ecuación de Re[] (ecuación 1.10). La cantidad compleja:

$$\vec{V} = \bar{a} \exp(i\varphi) \exp(2\pi i f t) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

La ecuación 1.11 contiene el factor de la fase temporal, y varía a la frecuencia de oscilación f y es llamado el vector complejo del campo eléctrico.

$$\bar{a} = \bar{a} \exp(i\varphi) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

La ecuación 1.12 contiene solo los factores de la amplitud y fase que no varían a la frecuencia f y se llama vector complejo de amplitud; la cantidad real \bar{a}_1 es simplemente el vector amplitud. Cuando trabaja con ondas escalares el sufijo “vector” puede omitirse.

Omitiendo el símbolo Re[] de su ecuación y dividiendo cada término por $\exp(2\pi i f t)$, se obtiene:

$$\bar{a}_1 \exp(i\varphi_1) + \bar{a}_2 \exp(i\varphi_2) + \dots = \bar{a} \exp(i\varphi) = \bar{a}$$

De este modo el vector de amplitud compleja de una suma de ondas monocromáticas, se obtiene añadiendo vectores de amplitud compleja de las ondas individuales, de acuerdo con las reglas de adición de números complejos.

Ahora se puede escribir la intensidad I en la ecuación $I = \bar{a} \cdot \bar{a}$ en términos de \bar{a} formando el producto:

$$\bar{a} \cdot \bar{a}^* = [\bar{a} \exp(i\varphi)] \cdot [\bar{a} \exp(-i\varphi)] = \bar{a} \cdot \bar{a}$$

Tal que:

$$I = \bar{a} \cdot \bar{a} = \bar{A} \cdot \bar{A}^* = [\bar{a}_1 \exp(i\varphi_1) + \bar{a}_2 \exp(i\varphi_2) + \dots] \times [\bar{a}_1 \exp(-i\varphi_1) + \bar{a}_2 \exp(-i\varphi_2) + \dots] \quad \text{(Ec. 2.13)}$$

Donde el asterisco indica el complejo conjugado.

2.6 INTERFERENCIA DE DOS ONDAS MONOCROMÁTICAS

La interferencia es una característica típicamente ondulatoria, que es el origen de fenómenos inexplicables desde perspectivas corpusculares. Aparentemente, la superposición de luz conduce a su aniquilación en algunos casos o a la multiplicación energética, por encima de la contribución de cada fuente, en otros. Estas aparentes paradojas se explican mediante la interferencia.

Los fenómenos de interferencia, junto a los de difracción, son los más característicos de las ondas y no están presentes en la dinámica de partículas. Por esta razón desempeñaron un papel central en las discusiones sobre la naturaleza de la luz.

Dada la linealidad de la ecuación de ondas, su solución, cuando existen varias fuentes, puede obtenerse sumando las soluciones para cada una de las fuentes. Dado que la solución de la ecuación de ondas es la amplitud de onda, y que ésta es una función del espacio y del tiempo, la superposición siempre conduce a campos espaciales variables en el tiempo. Esta combinación de soluciones se denomina interferencia. En algunas ocasiones las amplitudes resultantes pueden resultar permanentemente nulas en algunas superficies, sin serlo ninguno de los sumandos, dando lugar a las franjas de interferencia.

Cuando se consideran ondas monocromáticas, puede utilizarse la exponencial compleja

$$\exp(ia) = \cos(a) + i \operatorname{sen}(a) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Y escribir

$$U(x, y, z, t) = \operatorname{Re} (u(x, y, z) \exp (iwt))$$

Que permite representar las amplitudes mediante el campo complejo independiente de t

$$u(x, y, z)$$

CAPITULO 3.- ELECTRÓNICA

3.1 PLL- AMARRE DE FASE

Los lazos de seguimiento de fase, bucles de enganche de fase, o PLL (del inglés Phase-Locked Loops) es un sistema de feedback que comprende un comparador de fase, un filtro pasa bajas y un amplificador de error en la trayectoria de la señal hacia adelante y un oscilador controlado por tensión (VCO) en la trayectoria de feedback. El diagrama en bloques de un sistema PLL básico aparece en la figura 3.1

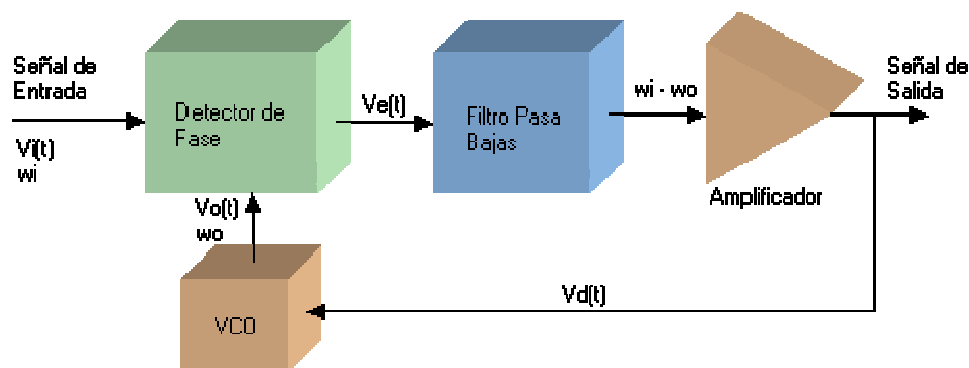


Figura 3.1 Diagrama básico en bloques de un PLL.

El detector de fase, como su propio nombre indica, es capaz de determinar el desfase existente entre dos señales. Existe una gran variedad de ellos, de los que se destacan los siguientes: detectores de fase de muestreo y retención, detectores de fase de tipo discriminador, detectores de fase de tipo multiplicador y detectores de fase digitales. Dependiendo de la aplicación para la que se va a usar el PLL hay que ponerle un detector de fase u otro, ya que no hay uno que sea el mejor sino que depende del uso que se le dé al circuito.

Para elegir un detector u otro hay que tener en cuenta, principalmente, dos factores: el tipo de señal de entrada y el intervalo de error de fase de entrada en el cual la salida es lineal. Dependiendo del tipo de señal de entrada que se va a aplicar al PLL se usará un tipo de detector de fase u otro ya que, por ejemplo, una entrada cosenoidal y una entrada digital requieren detectores de fase diferentes. Por otra parte, según sea el intervalo de error de fase de la entrada en el cual la salida es lineal también se utiliza un detector de fase u otro. Cuanto más amplio sea dicho intervalo más útil va a ser el detector de fase para controlar el lazo y además el ruido va a afectar menos. Los detectores de fase de tipo multiplicador y los digitales son los que más se utilizan. Los primeros son útiles cuando la señal de entrada es de tipo cosenoidal y los segundos, como su nombre indica, son usados para señales de entrada de tipo digital.

Dentro del lazo de realimentación de un PLL aparte de un filtro y de un detector de fase se encuentra un VCO. Como ya se sabe, los VCO son osciladores controlados por voltaje. Hay varios tipos de VCO que se pueden usar en los PLL: osciladores de cristal, osciladores LC y multivibradores RC. Al igual que con los detectores de fase se va a usar un VCO u otro dependiendo del tipo de aplicación se le dé al PLL. Los dos factores que se analizan para elegir el tipo de VCO más adecuado son la estabilidad de fase y el intervalo de control. La frecuencia del VCO está sujeta a la señal de entrada, pero la relación de fase de salida del oscilador con la entrada va a depender de la frecuencia natural del oscilador. Por lo tanto, va a influir mucho el tipo de VCO que se utilice. La frecuencia natural de oscilación va a variar con la temperatura, el tiempo y el ruido de la entrada, produciéndose un cambio en la fase de salida que, si es muy grande, puede llegar a perderse la sujeción. Por lo tanto, para tener una buena estabilidad, la frecuencia del VCO debe ser lo menos variable posible frente a la temperatura, tiempo y ruido. Por otro lado, es conveniente que el VCO esté relacionado en un rango de frecuencias lo más grande posible, debido a que

cuanto mayor sea el intervalo de control resulta más fácil para el lazo mantener dicho control.

Tal vez el punto más importante que hay que comprender cuando se diseña con el PLL es que se trata de un sistema de retroalimentación y, por lo tanto, está caracterizado matemáticamente por las mismas ecuaciones que se aplican a los sistemas de feedback más convencionales. Los parámetros en las ecuaciones son un poco diferentes, sin embargo, dado que la señal de error de feedback, en el sistema de enganche de fase, es una señal de fase antes que una señal de tensión o corriente como es usualmente el caso de los sistemas de feedback convencionales.

La primera gran aplicación del control de fase se encuentra en los receptores de televisión para sincronizar los osciladores del barrido horizontal y vertical con los pulsos de sincronismo proveniente de la estación transmisora. Posteriormente los receptores de banda angosta utilizaron el principio de control de fase y con ello se lograron considerables beneficios en el rastreo de las señales débiles provenientes de los satélites.

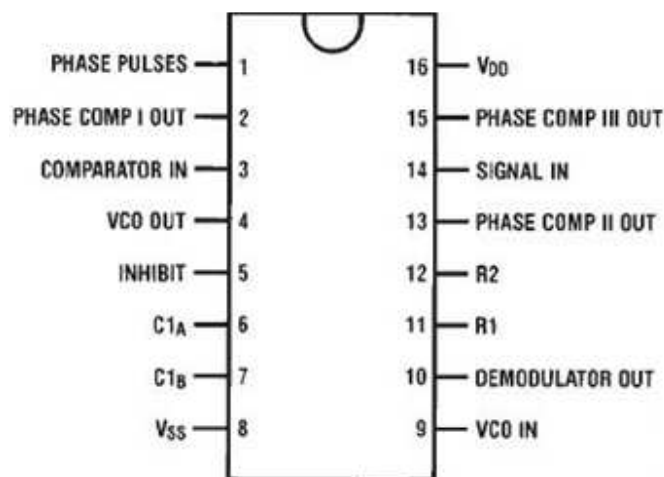


Figura 3.2 PLL Circuito integrado

Aplicaciones como las mencionadas anteriormente se implementaron con componentes discretos y conforme fue avanzando su importancia, esta implementación se fue haciendo cada vez más compleja. Esta complejidad hizo del PLL una técnica poco práctica y antieconómica en la mayoría de los sistemas.

El desarrollo de un solo circuito integrado en el cual se incluyen todos los componentes que permitan la utilización del principio del PLL ha cambiado drásticamente la situación. En la actualidad un simple circuito integrado con pocos componentes externos permite al usuario todos los beneficios de la operación en *Phase Locked Loop* (PLL), incluyendo frecuencia central independiente, ancho de banda ajustable, alta inmunidad al ruido, alta selectividad, operaciones en altas frecuencias y sintonización de la frecuencia central por medio de un simple componente externo como se observa en la figura 3.3.

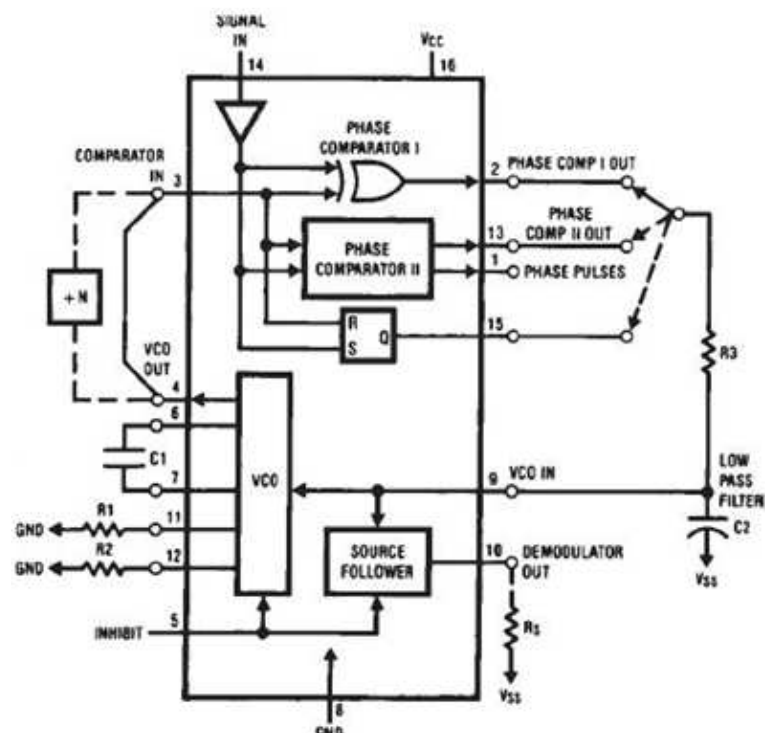


Figura 3.3 Estructura interna del PLL

CAPITULO 4.- MEDICIÓN DE VIBRACIÓN CON VIBRÓMETRO LÁSER

4.1 VIBRÓMETRO

Un vibrómetro (forma abreviada de vibrómetro láser Doppler) es un instrumento de medición para la cuantificación de oscilaciones mecánicas. Un vibrómetro está conformado generalmente por dos haces de láser en un interferómetro que mide la diferencia de frecuencia (o fase) entre un haz de referencia interno y haz prueba. El láser más comúnmente utilizado en un vibrómetro es el de Helio-neón. Un esquema típico de un láser vibrómetro se muestra a continuación en la figura 4.1.

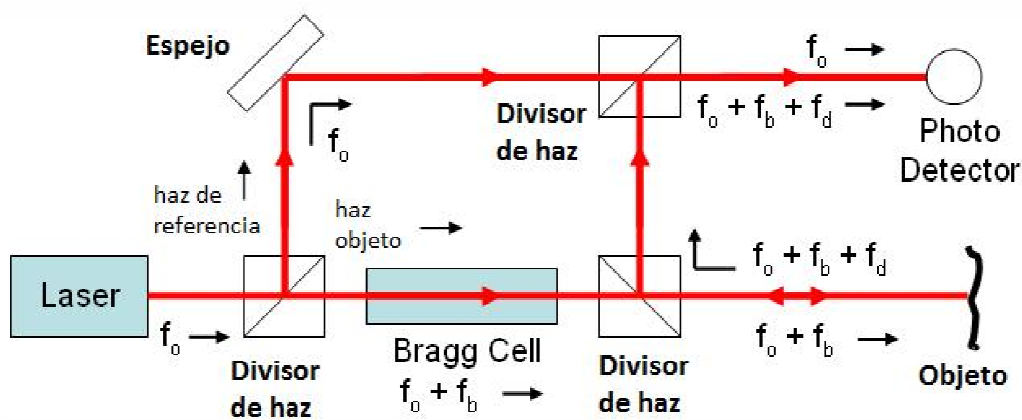


Figura 4.1 Vibrómetro láser

Para permitir que el movimiento del objeto afecte a la fase en el interferómetro, uno de los haces debe salir de la propia unidad interferométrica, incidir en el objeto de prueba y regresar acoplándose de nueva cuenta en el interferómetro. Un arreglo que satisface estos requerimientos se muestra en la

figura 4.1; donde se emplea un divisor polarizado, en conjunto con una placa de un cuarto de onda (no mostrada), que proporciona una función de acoplamiento direccional: esto es, al haz de luz que viene del láser se le permite viajar en línea recta hacia el objeto, mientras que el haz de regreso se dirige hacia el Photo detector.

Un modulador de Celda de Bragg en el haz de referencia del interferómetro va a modificar su fase al agregar una señal portadora de frecuencia temporal f_B . Siendo la celda de Bragg un tipo de modulador óptico que corre la frecuencia temporal de la luz que la atraviesa, por una cantidad f_B , la cual se determina por una señal eléctrica de radiofrecuencia (RF in). Este corrimiento de frecuencia f_B da por resultado una modulación de la señal de la interferencia detectada, con la señal portadora RF utilizada.

Las intensidades luminosas en los fotodetectores D1 y D2 están dadas respectivamente por:

$$I_1(t) = \frac{1}{2} A^2 [1 + \cos(2\pi(f_B t + 2\Delta z / \lambda))] \quad \text{(Ec 4.1)}$$

$$I_2(t) = \frac{1}{2} A^2 [1 - \cos(2\pi(f_B t + 2\Delta z / \lambda))]$$

Δz denota el desplazamiento del objeto con respecto a una posición de referencia fija. Restando las señales de salida de los fotodetectores por medio de un amplificador operacional y eliminando el contenido de DC de la señal, se tendrá una salida de voltaje u que está dada por:

$$u = K \cos(2\pi(f_B t + 2\Delta z / \lambda)) \quad \text{(Ec. 4.2)}$$

Que es la señal de salida de la cabeza sensora.

El efecto Doppler

La ecuación 4.2 relaciona la salida de voltaje u de la cabeza del sensor con un desplazamiento del objeto; desplazándose el objeto por una cantidad Δz , la fase de la señal RF detectada se corre por

$$\theta_{Doppler} = 4\pi\Delta z / \lambda \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Si el objeto se mueve hacia la cabeza sensora a una velocidad constante $v = \Delta z / \Delta t$, el corrimiento de fase de salida conlleva un corrimiento de frecuencia de salida, bien conocida como corrimiento Doppler f_D con:

$$f_D = 2v / \lambda \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Entonces, la frecuencia de salida de la cabeza sensora se puede expresar como:

$$f_{salida} = f_B + f_D \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Dependiendo de la dirección del movimiento del objeto, el signo de v cambia (y también lo hace f_D). Una v positiva significa que el objeto se mueve hacia la cabeza sensora y un movimiento negativo indica que va alejándose del sensor.

4.2 MEMBRANA RECTANGULAR Y CICLO LÍMITE

Con anterioridad se han analizado las deformaciones de esta membrana rectangular, detectando en ella una excitación de una amplitud sumamente pequeña, la cual se atribuía a ruidos externos, tratando de investigar una razón científica del porque de estos pequeños ruidos, se comparó con la teoría de osciladores libre de Van der Pol.



Figura 4.2 Membrana rectangular

En la figura 4.2 podemos observar la membrana de poliéster de 14x19 cm que se utilizó para realizar el experimento, la cual es estimulada con frecuencias emitidas por una bocina, provocando en la membrana deformaciones, a simple vista estas deformaciones no son perceptibles, pero con ayuda de un vibrómetro podremos analizarlas.

Ciclo limite

Un ciclo limite es una órbita periódica del sistema que está aislada. Como por ejemplo el circuito de sintonía de una radio. En la figura 4.3 podemos observar gráficamente la forma del ciclo limite.

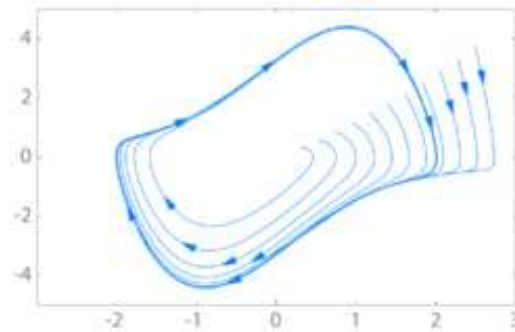


Figura 4.3 Ciclo limite

En ocasiones las trayectorias del sistema tienden a formar una órbita cerrada; cuando esto sucede se dice que existe un *ciclo límite estable (lineal)*. También se da el caso en el que las trayectorias se desprenden de una órbita cerrada, en cuyo caso se dice que se existe un *ciclo límite inestable (no lineal)*.

4.3 ECUACIONES

Oscilaciones libres

El modelo teórico de la ecuación dinámica que describe al Oscilador de Van der Pol es:

$$\ddot{x} - \epsilon(1 - x^2)\dot{x} + x = 0 \quad (\text{Ec. 4.6})$$

O, escrita en la forma de ecuación de primer orden:

$$\frac{dx}{dt} = y, \quad \frac{dy}{dt} = \epsilon(1 - x^2)y - x$$

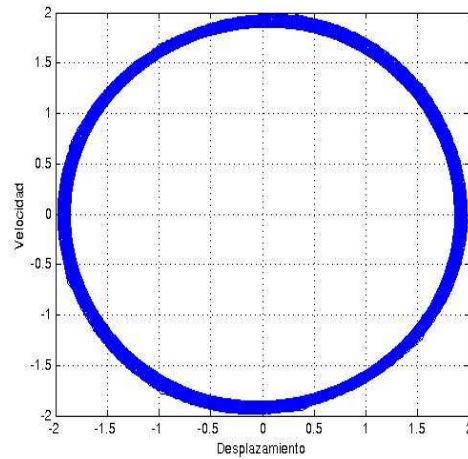


Figura 4.4 Ciclo límite para el oscilador de Van der Pol con $\epsilon = 0.05$

Cuando los valores de x son menores que 1, entonces el sistema tiene un comportamiento de amortiguamiento negativo y su amplitud se incrementa. Para x mayores que 1, el amortiguamiento causa que su amplitud disminuya, de tal forma que combinando estos dos estados en una gráfica de plano de fase se observa un sistema de oscilación de ciclo límite. Cuando ϵ es pequeño, la gráfica de fase muestra que el ciclo límite es circular. Figura 4.4. Para ϵ grandes, la solución numérica tiene comportamiento de ciclo límite alargado, como se muestra en la figura. 4.5.

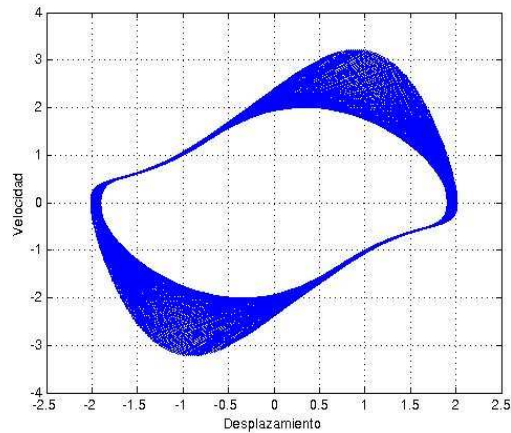


Figura 4.5 Ciclo límite para el oscilador de Van der Pol con $\epsilon = 1.5$

Debido a que la solución numérica de la ecuación no lineal es oscilatoria sin importar cuales fueron las condiciones iniciales, se le llama ecuación de auto-excitación o de oscilaciones libres.

4.4 MEMBRANA NO LINEAL

Oscilaciones forzadas

Cuando la membrana tiene un comportamiento no lineal a valores pequeños de x como se vio en la figura 4.5, pero además se le excita externamente con una amplitud de frecuencia (ω), se presentan tres casos o modos de acoplamiento.

Modo de amarre

El modo de amarre se puede observar de la ecuación forzada de Van der Pol (cuando se tiene una excitación externa del tipo cosenoidal):

$$\frac{dx}{dt} = y, \quad \frac{dy}{dt} = \varepsilon(1 - x^2)y - x + f \cos(\omega t) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Ver la gráfica de la figura 3.6:

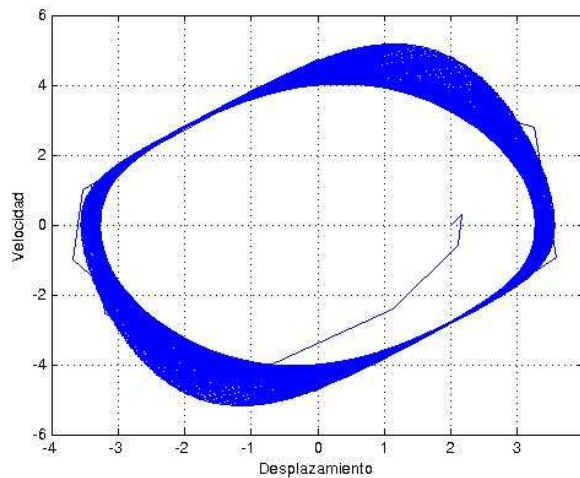


Figura 4.6 Ciclo limite en el modo de amarre para $\varepsilon = 0.25$, $f = 3$, $\omega = 1.2$

La solución numérica del ciclo límite de este sistema parece similar a los anteriores, pero examinando la serie temporal se puede confirmar que el sistema oscila a la frecuencia de excitación forzada. Ver figura 4.7

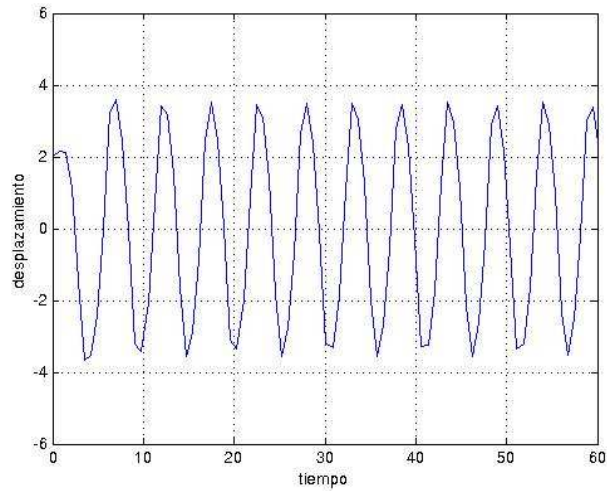


Figura 4.7 Serie temporal para el desplazamiento con $\varepsilon=0.25$, $f = 3$, $\omega = 1.2$

De la figura 4.7 se puede observar que hay diez ciclos en 52.4 unidades de tiempo, que corresponden a una frecuencia angular de $\omega = 1.2$, lo que confirma que el sistema está acoplado a la frecuencia de excitación externa.

4.5 CUASIPERIODICIDAD

La Cuasiperiodicidad es un fenómeno que se relaciona con el de amarre. Esto ocurre cuando la amplitud de la función de excitación es muy débil. La frecuencia natural del sistema compite con la frecuencia forzada en la determinación de la frecuencia del sistema, y el resultado es que tanto la frecuencia como la amplitud varían con el tiempo. La trayectoria de fase se confina a una región anular. Ver figura 4.8.

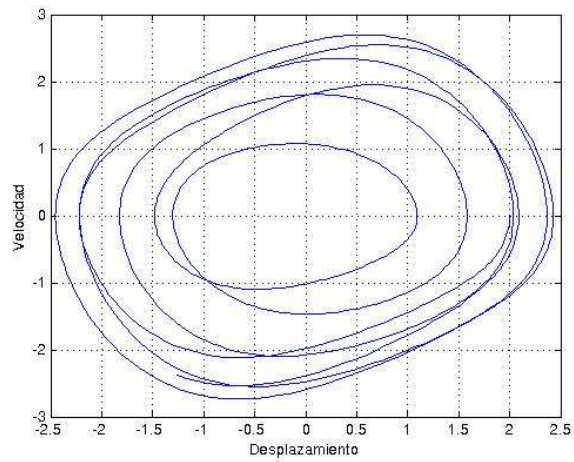


Figura 4.8 Trayectoria de fase de forma anular con $\epsilon = 0.25$, $f = 0.4$, $\omega = 1.2$

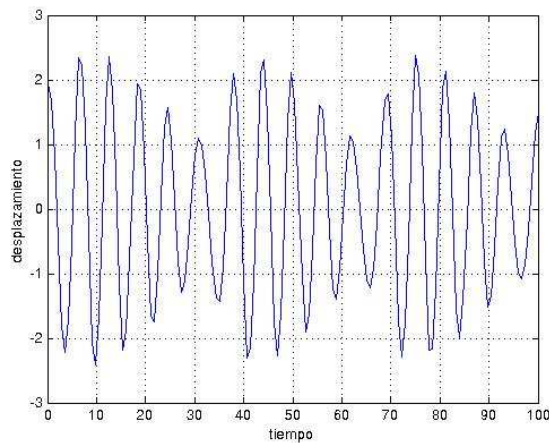


Figura 4.9 Desplazamiento oscilatorio de Cuasiperiodicidad

Es claro que la amplitud cambia, según se ve de la gráfica de la figura 4.9, pero para tener la evidencia de las frecuencias en competencia, sería mejor observar el espectro de potencia. Este se muestra en la figura 4.10.

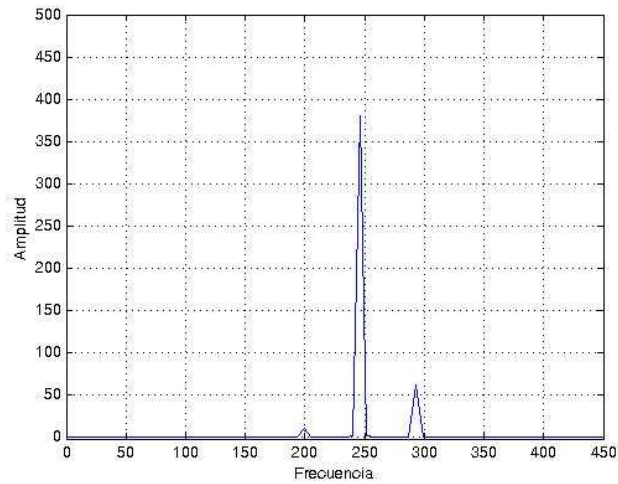


Figura 4.10 Espectro de potencia del oscilador de Van de Pol con $\epsilon = 0.25$, $f = 3$, $\omega = 1.2$

El pico máximo es el de la frecuencia natural y el pico a la derecha es el de $\omega = 1.2$ en la figura 4.10.

CAPITULO 5.- EXPERIMENTO Y RESULTADOS

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Para realizar el experimento haremos uso de distintos elementos que serán descritos brevemente y su función dentro del mismo.

Generador de señales: Es un aparato electrónico que produce ondas senoidales, cuadradas y triangulares, además de crear señales TTL. Sus aplicaciones incluyen pruebas y calibración de sistemas de audio, ultrasónicos y servo (servomotores). Este generador de funciones, específicamente trabaja en un rango de frecuencias de entre 0.2 Hz a 2 MHz. También cuenta con una función de barrido la cual puede ser controlada tanto internamente como externamente con un nivel de DC. El ciclo de máquina, nivel de offset en DC, rango de barrido y la amplitud y ancho del barrido pueden ser controlados por el usuario. La función a realizar dentro del experimento es precisamente la de generar frecuencias senoidales en un rango de 70 a 120 Hz las cuales alimentaran la bocina, y también podrán ser observadas en el osciloscopio.

Bocina: las características de la bocina son 8 Ohm y 40 W. La labor de este objeto es la de transformar la señal eléctrica del generador y convertirla en audio, para así poder excitar a la membrana.

Osciloscopio digital: Un osciloscopio es un instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. Presenta los valores de las señales eléctricas en forma de

coordenadas en una pantalla, en la que normalmente el eje X (horizontal) representa tiempos y el eje Y (vertical) representa tensiones.

En el osciloscopio digital la señal es previamente digitalizada por un conversor analógico digital. Al depender la fiabilidad de la visualización de la calidad de este componente, esta debe ser cuidada al máximo.

Las características y procedimientos señalados para los osciloscopios analógicos son aplicables a los digitales. Sin embargo, en estos se tienen posibilidades adicionales, tales como el disparo anticipado (pre-triggering) para la visualización de eventos de corta duración, o la memorización del oscilograma transfiriendo los datos a un PC. Esto permite comparar medidas realizadas en el mismo punto de un circuito o elemento. Existen asimismo equipos que combinan etapas analógicas y digitales.

La principal característica de un osciloscopio digital es la frecuencia de muestreo, la misma determinara el ancho de banda máximo que puede medir el instrumento, viene expresada generalmente en MS/s (millones de muestra por segundo).

El osciloscopio digital es el instrumento mediante el cual se visualiza en pantalla la señal que se envía a la bocina y la señal que obtiene el vibrómetro láser. Este instrumento es uno de los componentes más importantes, ya que para poder observar bien lo que ocurre en la membrana es necesario un buen osciloscopio.

Vibrómetro láser: este instrumento ya fue descrito en el capítulo 4, tema 4.1. Básicamente este instrumento se encargara de convertir los movimientos mecánicos o deformación que ocurren en la membrana en señales eléctricas para poderlo interpretar posteriormente en el osciloscopio.

Membrana de poliéster: el componente más importante del experimento es la membrana de poliéster de 14x19, ya que este es el objeto sobre el cual recae todo el estudio a realizar, este objeto es el que estará recibiendo las distintas señales por medio de la bocina, y será analizado constantemente por el vibrómetro láser para poder observar las deformaciones a distintas estimulaciones y así poder comprobar la teoría de Van der Pol.

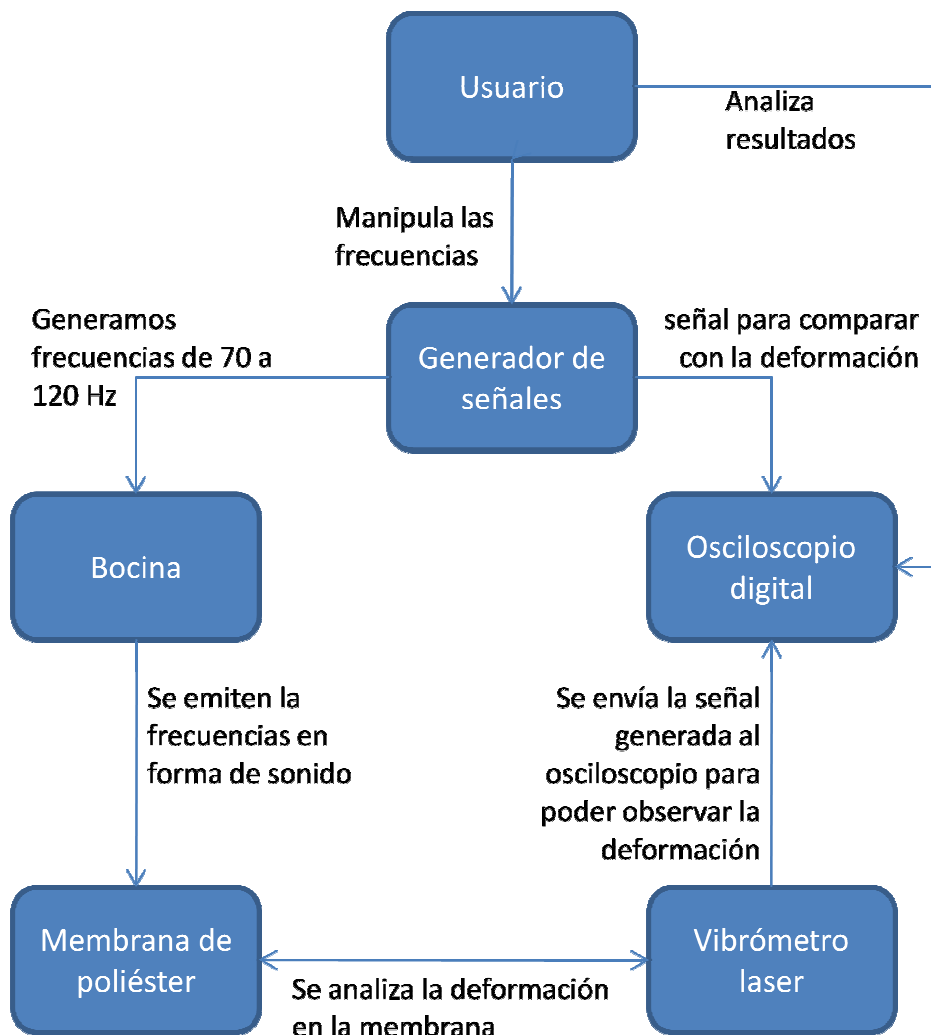


Figura 5.1 Diagrama del proceso del experimento

Como se puede observar en la figura 5.1 el desarrollo del experimento es básicamente generar una frecuencia, transmitirla por medio de la bocina para así poder excitar a la membrana, una vez que esto está ocurriendo se analiza con el vibrómetro láser; las deformaciones generadas por las distintas frecuencias, todo este análisis se realiza gracias al osciloscopio ya que muestra en pantalla de manera gráfica las deformaciones que sufre la membrana y así el usuario poder tomar nota de lo ocurrido.

Para el experimento se realizó dos tipos de arreglos, en el primero se colocó la bocina a 8cm de la membrana, la cual originaba muchas resonancias entre las mismas, esto dificultaba la lectura y originaba que el punto de resonancia máxima de la membrana variara muy a menudo, para solucionar el problema se retiró la bocina de la membrana a 1.04m y el arreglo finalmente se utilizó como se muestra a continuación en la figura 5.2.

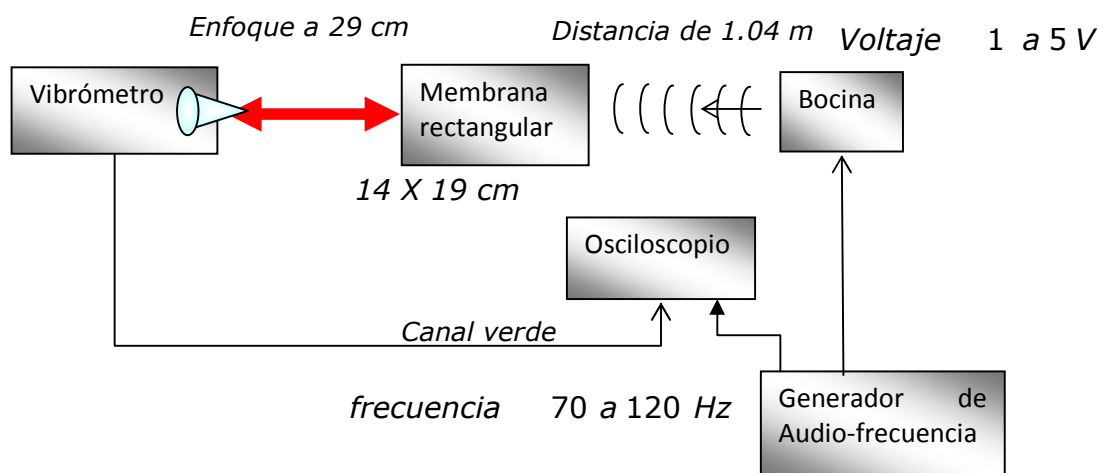


Figura 5.2 Arreglo para análisis de la membrana

Aún con esta modificación la membrana seguía presentando variaciones en su frecuencia, oscilando en un rango de 70 a 120 Hz.

5.2. RESULTADOS

A continuación se presentarán los resultados obtenidos al realizar el experimento anteriormente planteado para la comprobación de los objetivos de esta investigación.

5.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEMBRANA

Se cuenta con una membrana 14X19 cm, ubicada a las distancia del arreglo mostrado en la figura 5.2, la cual al someterla a un rango de frecuencias que van desde los 70 hasta los 120 Hz. Responde de distintas formas, eso se puede comprobar en las tablas (5.1 y 5.2) y gráfica (figura 5.3).

Tabla 5.1 Frecuencia ascendentes con escala de 2v por división.

Frecuencia	Divisiones	Amplitud mv
70.9	0.4	800
72.2	0.4	800
74.8	0.45	900
76.8	0.6	1200
79	0.8	1600
80.5	1.4	2800
81.8	2.9	5800
82.5	5	10000
83	6.2	12400
83.4	3.4	6800
84.2	2	4000
84.7	1.6	3200
86.6	1	2000
88.5	0.7	1400
90.9	0.5	1000
92.8	0.45	900
95.9	0.4	800

Frecuencia	Divisiones	Amplitud mv
71.4	0.4	800
74.5	0.4	800
76.5	0.45	900
78.1	0.6	1200
80.8	1	2000
82	1.4	2800
83	2.3	4600
83.7	4.3	8600
84.2	6	12000
84.9	3.7	7400
85.6	2.1	4200
86.3	1.6	3200
89	0.7	1400
90.3	0.6	1200
93.1	0.5	1000
95.7	0.4	800

La tabla 5.1 muestra las tomas de frecuencias ascendentes, observadas en el osciloscopio con una escala de 2v, un muestreo de 25ms, una amplitud de de

entrada en bocina de 500mv, distancia entre bocina y membrana de 8cm, enfoque de vibrómetro a 39cm obteniendo dos resultados distintos.

Tabla 5.2 Frecuencia descendentes con escala de 2v por división.

Frecuencia	Divisiones	Amplitud en mv
102	0.2	400
98.3	0.2	400
94.8	0.2	400
91.1	0.4	800
87.4	0.5	1000
85.8	0.6	1200
83.4	0.7	1400
81.1	1.1	2200
80.2	2.2	4400
79.6	4.5	9000
79.2	5.9	11800
78.4	3.4	6800
77.4	1.7	3400
75.9	0.9	1800
74	0.6	1200
70	0.45	900
65.5	0.4	800

Frecuencia	Divisiones	Amplitud en mv
102.7	0.3	600
98.4	0.4	800
94.7	0.4	800
90	0.4	800
86.1	0.7	1400
84.2	0.9	1800
82.6	1.6	3200
82.1	2	4000
81.2	5	10000
80.2	3.8	7600
79.1	1.7	3400
76.8	0.8	1600
74.4	0.4	800
70.2	0.4	800

La tabla 5.2 muestra la toma de frecuencias descendentes, con las mismas especificaciones y distancias de la figura 5.2 y la tabla 5.1

Comparando las tablas (5.1 y 5.2) anteriores se realiza la siguiente gráfica (figura 5.3).

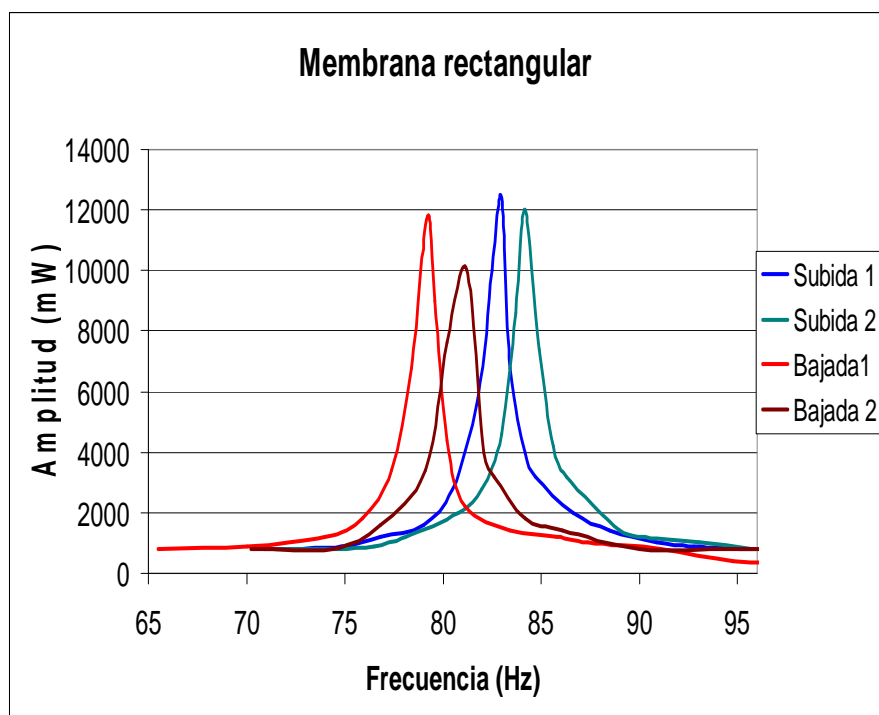


Figura 5.3 Primeros resultados

De esta gráfica se observa que la membrana no tiene una respuesta lineal en subida (ascendentes) desde 70 a 95 Hz, la resonancia máxima se alcanzó en 83 y 84.2 Hz respectivamente. Para el caso de los dos experimentos con frecuencias en bajada (descendentes) que van desde los 100 Hz hasta los 70 Hz, los valores pico de frecuencia están en 81.2 y 79.2 Hz respectivamente, aun no se entiende por qué las frecuencias han variado tanto, lo único que es constante es el tipo de respuesta que tienen.

Al realizar el cambio de arreglo con una amplitud de entrada a bocina de 5v, una distancia de vibrómetro-objeto de 29cm de enfoque, distancia de bocina objeto de 104cm y una escala en el osciloscopio de 500mv.

Estas son imágenes (figuras 5.4, 5.5) del arreglo en el laboratorio de metrología 1:



Figura 5.4 Bocina - objeto

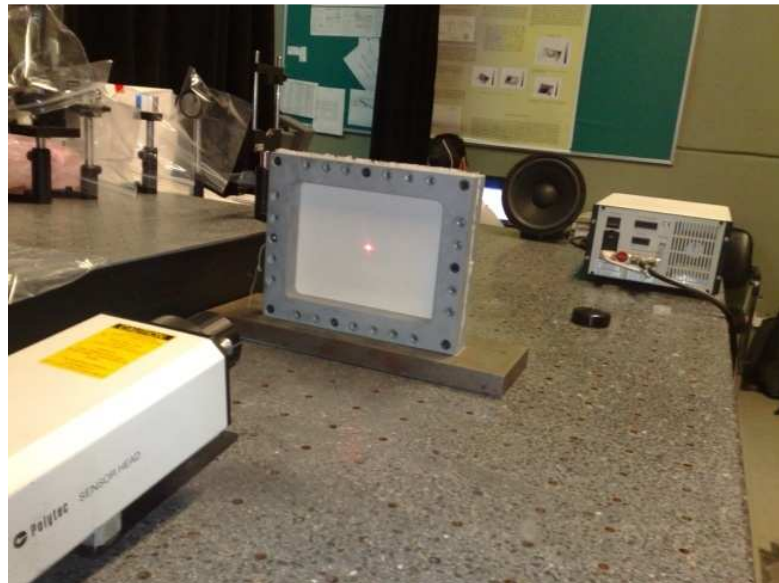


Figura 5.5 Vibrómetro – objeto

Tabla 5.3 Frecuencias segundo arreglo con escala de 2v por división.

Toma de Subida		
Frecuencia	Divisiones	Amplitud en mv
90.4	0.2	100
92.4	0.25	125
94.5	0.25	125
96	0.4	200
98	0.4	200
100.2	0.6	300
102.3	0.9	450
104.1	1.6	800
104.6	2	1000
105.6	3.7	1850
106.4	2.8	1400
108	1.4	700
110.4	0.7	350
112.2	0.4	200
114.8	0.4	200

Toma de Bajada		
Frecuencia	Divisiones	Amplitud en mv
114.7	0.4	200
112.3	0.4	200
110.2	0.6	300
107.9	1	500
106.1	1.3	650
104.6	2.5	1250
104	3.6	1800
102.7	4.5	2250
101.8	3.3	1650
100.2	1.2	600
98.1	0.6	300
95	0.4	200

Estas tomas se realizaron con el nuevo arreglo, al juzgar los resultados se observa que se tiene la misma tendencia que en los experimentos anteriores como se puede observar en la gráfica siguiente (figura 5.6)

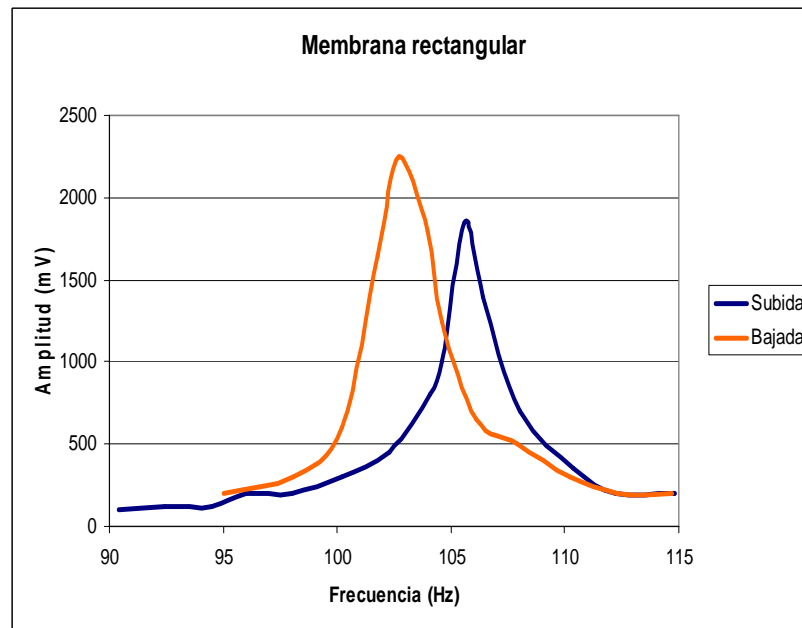


Figura 5.6 Resultados nuevo arreglo

Como se observó la toma de frecuencias en bajada se adelanta con respecto a la toma de frecuencias en subida, dejando los valores de la siguiente forma:

$$f_{Subida} = 105.6 \text{ Hz} \text{ y } f_{Bajada} = 102.7 \text{ Hz}$$

Se realizó otra toma más, ahora con una diferencia, la toma de bajada con la de subida coincidían en un mismo punto ubicado en 100 Hz, repitiendo el experimento una serie de ocasiones solo se obtuvo una variación de 2 Hz, ubicando nuestra máxima resonancia en 102 Hz, por lo tanto se toma esta curva característica como la más representativa del comportamiento de la membrana, quedando por resolver el por qué del movimiento de los puntos de resonancia máxima. La gráfica siguiente muestra la curva antes mencionada (figura 5.7).

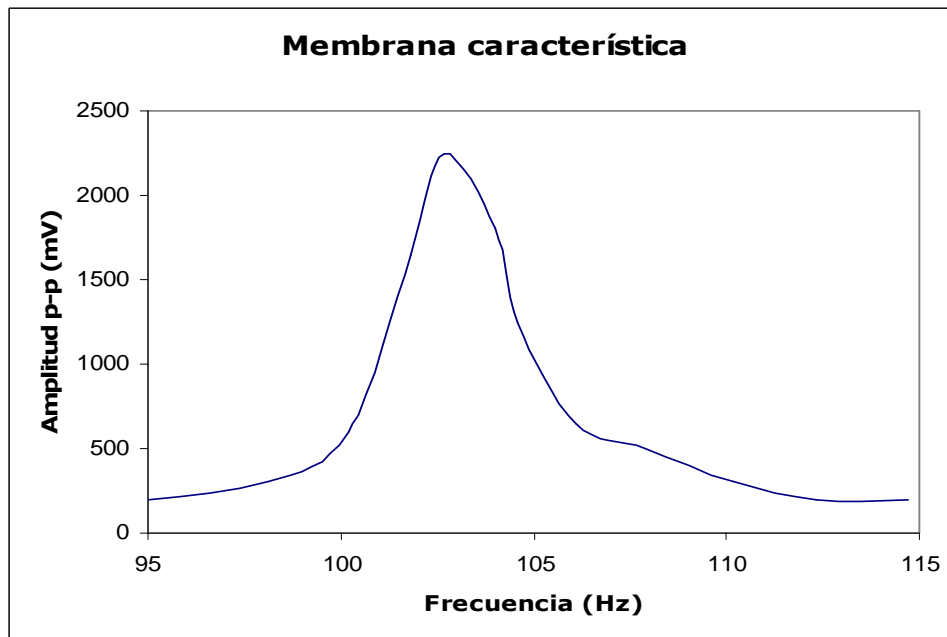


Figura 5.7 Curva característica de la membrana

5.2.2 APLICACIÓN Y COMPROBACIÓN DE LA TEORÍA DE VAN DER POL

Una vez obtenida la frecuencia de resonancia $f_0 = 104\text{Hz}$, se procura producir la Cuasiperiodicidad en la membrana. En teoría, se necesita de una amplitud muy pequeña y de una frecuencia de excitación muy cercana a la de resonancia para provocarla. La amplitud de la nueva frecuencia se reduce de 5000mv pp hasta 1700mv pp. La frecuencia de excitación se obtiene multiplicando la frecuencia de resonancia por 1.1;

$$\text{Frecuencia de Excitación} = (f_0 * 1.1) = 114.4$$

Generando esta nueva señal se obtiene la siguiente respuesta proveniente del vibrómetro láser:

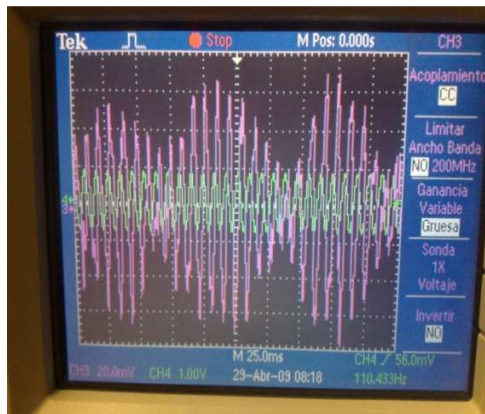


Figura 5.8 Batido de frecuencias

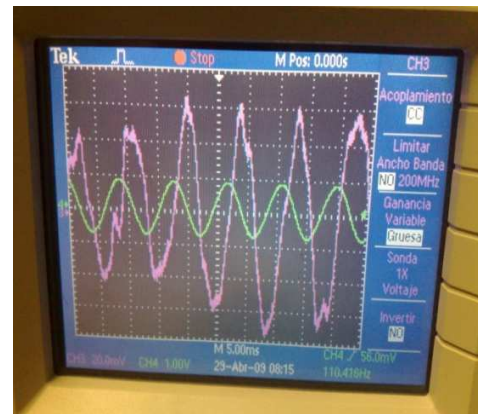


Figura 5.9 Muestreo a 5ms

En la figura 5.8 se puede observar el batido de frecuencias de excitación y la del ciclo limite. La figura 5.9 es el mismo caso pero con un muestreo de 5ms para tener una imagen más detallada de la vibración. El color verde indica la señal de referencia de la bocina, es decir, la frecuencia de excitación, y el color violeta es la señal de salida del vibrómetro.

Como se describe en el tema 4.5 Cuasiperiodicidad, se determina que la frecuencia natural del sistema compite con la frecuencia forzada en la determinación de la frecuencia del sistema y el resultado es que, tanto la frecuencia como la amplitud, varían con el tiempo. Como se observa en la figura 5.8, la frecuencia de excitación compite con la frecuencia natural por determinar quién rige el sistema, esto demuestra y comprueba que la membrana de poliéster de 14X19 cm tiene una frecuencia natural, es decir, oscilaciones libres. Con este resultado se comprueba la teoría de Van der Pol.

5.3 COMPARACIÓN CON MODELO TEÓRICO

Se calculó en Matlab (figura 4.10) el sistema bajo las siguientes condiciones: $m = 1$, $K = 1$, $\text{Epsilon} = 0.1$, $A = 0.25$, $x(0) = 1$, $x'(0) = 0.1$, $w = 1.1w_0$, se comparó con los resultados obtenidos en la figura 5.8 y se observa los resultados de los cálculos.

En la figura 5.10 se puede observar el desplazamiento seguido de la velocidad y por último la combinación de las mismas. Al observar y compara la figura 5.10 con la figura 5.8 se puede apreciar que el resultado del experimento es muy similar al resultado del modelo teórico.

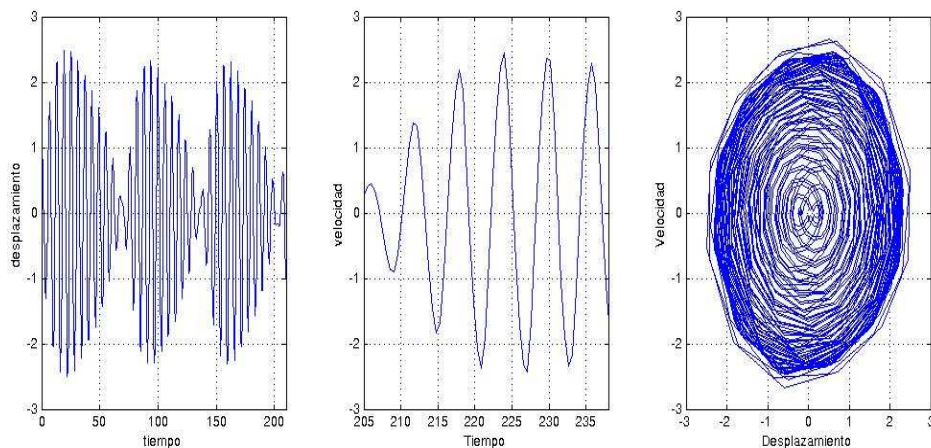


Figura 5.10 Modelo teórico

En la siguiente figura 5.11 se puede observar el espectro de frecuencias, muestra dos picos, uno corresponde a la frecuencia externa de excitación (el pico azul) y la otra a la frecuencia natural de oscilación libre (el pico rojo), este último es la Cuasiperiodicidad, es el resultado de los batidos de las frecuencias.

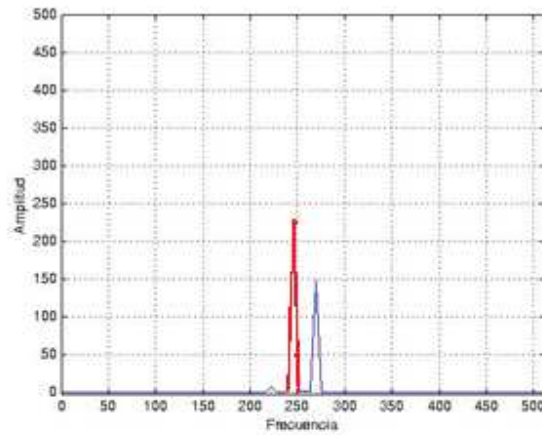


Figura 5.11 Espectro de frecuencias

5.4 PLL- AMARRE DE FASE PRACTICAS

Circuito 1 generador de onda cuadrada: Se puede generar con este circuito frecuencias de onda cuadrada con un mínimo 248.8 Hz y máximo de 1.501 KHz sin necesidad de mucho material como podemos ver en la figura 5.12

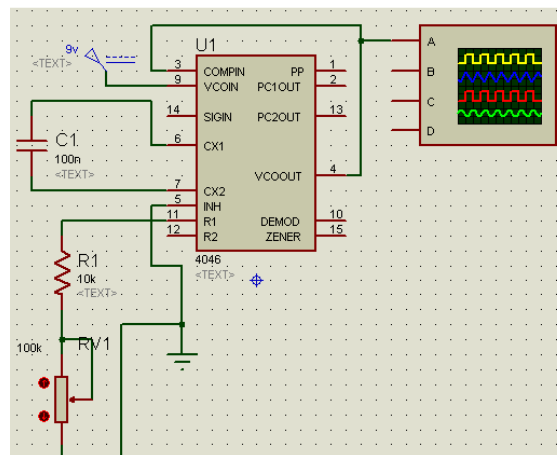


Figura 5.12 Generador de ondas cuadradas

Circuito 2 rangos de VCO: en este experimento al mover el potenciómetro se logra observar el rango máximo y mínimo que tiene el VCO del PLL. El diseño se puede ver en la figura 5.13, el rango se observa en la tabla 5.4.

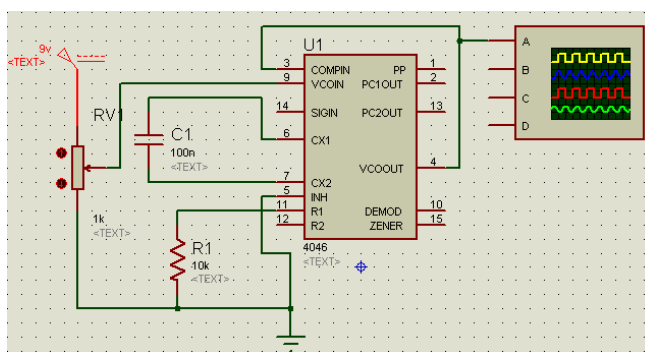


Figura 5.13 Circuito VCO

Tabla 5.4 voltajes y frecuencias circuito 2

Voltaje	Frecuencia
9	1.827KHz
8	1.562KHz
7	1.558KHz
6	1.210KHz
5	932Hz
4	686.8Hz
3	344.5Hz
2	42.52Hz
1	no se observa

Circuito 3 amplia gama del VCO: este circuito es similar al anterior con la diferencia que la colocar unas resistencias al pin 12 y 11 y diodos antes y después del potenciómetro como se ve en la figura 5.14, se obtienen valores más pequeños de VCO pero como se ve en la tabla 5.5.

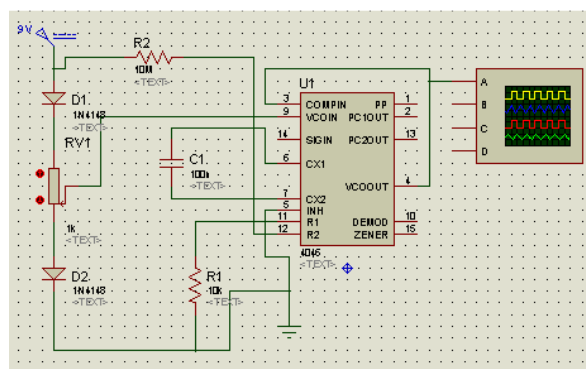


Figura 5.14 Amplia gama del VC

Tabla 5.5 voltajes y frecuencias circuito 3

voltaje	Frecuencia
9	1.908KHz
8	1.730KHz
7	1.33KHz
6	1.1680KHz
5	948Hz
4	620.7Hz
3	333.1Hz
2	38.34Hz
1	no se observa

Circuito 4 gama limitada del VCO: se obtuvo una frecuencia máxima de 1.55kHz y una mínima de 7.33hz. Con esta práctica R2 da la frecuencia mínima con la que puede trabajar el VCO. El diseño del circuito se observa en la figura 5.15

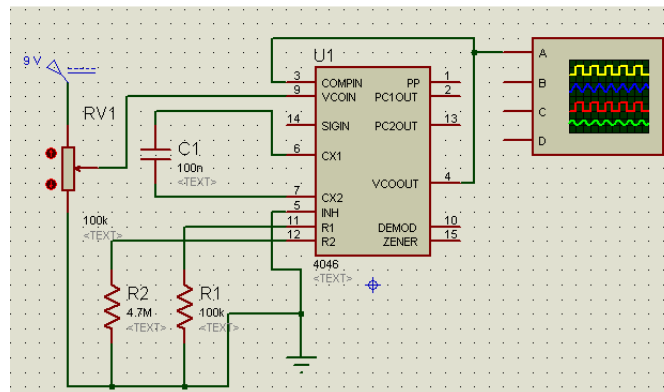


Figura 5.15 Gama limitada del VCO

Estos son los circuitos más representativos de las practicas los circuitos realizados posteriormente solo son alternativas de conexión y no ofrecen los mismos resultados, también otros muestran distintas formas de controlar el VCO que es por medios de un botón o por medio de una compuerta lógica.

5.5 TECNOLOGÍA DEL CHIP

La tecnología del chip como ya se menciona fue utilizada en el pasado, hoy en día tiene modificaciones, la cual permite saber si la fase que se compara esta adelantada o retrasada con respecto a la referencia esto se ve con el voltaje que entrega, si es positivo o negativo respectivamente, como se puede ver en la figura 5.16.

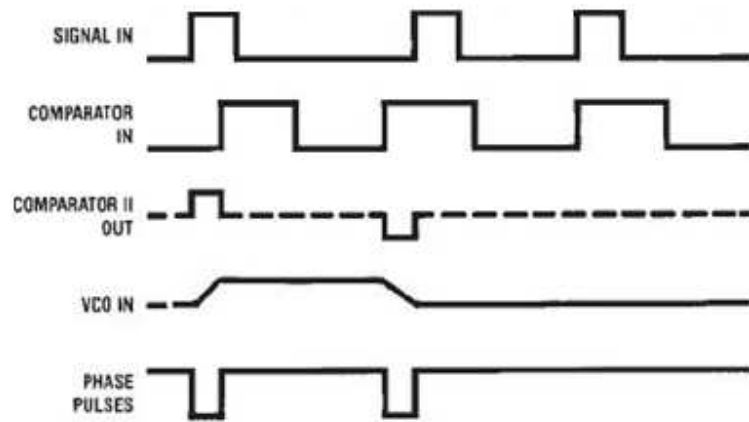


Figura 5.16 Comportamiento del PLL

También cabe destacar que el PLL también forma parte del vibrómetro láser ya que con él en la parte electrónica del vibrómetro, se realizan las distintas comparaciones de fase, y así el vibrómetro puede arrojar la velocidad de la deformación.

Con el PLL se pretende diseñar un circuito y un arreglo óptico de una forma portátil, el cual sea capaz de analizar los tejidos, generar el desplazamiento y se pueda observar y analizar en el osciloscopio, o en una PC mediante algún software especial.

CAPITULO 6.- CONCLUSIONES

Primeramente se puede decir que la luz como herramienta es muy interesante, precisa, útil e intrigante. Interesante por qué es un nuevo mundo de conocimientos y formas de investigar, precisa por qué gracias a ella se alcanzan a detectar deformaciones en objetos que a simple vista no apreciamos, manejar y transmitir información a gran velocidad, por citar alguna de sus aplicaciones. Es útil por qué sin ella no se hubieran desarrollado tecnologías como el láser, la fibra óptica o la interferometría óptica, cosas que hoy en día forman parte de la tecnología moderna. Intrigante por qué a pesar de que en la actualidad tenemos muchas aplicaciones gracias a la luz, aún queda mucho por aprender de ella para tecnologías futuras.

En este punto de la investigación se llega a la conclusión que una membrana posee una vibración propia que dependiendo del material de la misma es la facilidad con la que lograremos ver dicho comportamiento, por otro lado al comparar con el modelo teórico aun es muy libre al tener tantas variables, habría que proporcionar más datos para lograr reducir estas variables y crear una base teórica sólida. Faltando también resolver el problema del por qué el punto de resonancia máxima es tan inestable, pensando tal vez en cosas como la elasticidad del material, ruido del exterior o por qué no también la estabilidad del mismo vibrómetro, por el momento no podemos identificar que es lo que nos afecta pero hemos logrado comprobar mediante el experimento que la cuasiperiodicidad existe en la membrana.

El experimento aun no termina, falta agregar la parte electrónica con el PLL y en un futuro el desarrollo de un sistema portátil que nos permita medir las

vibraciones de los cuerpos sin tanta complejidad y poder determina o por lo menos diagnosticar algún defecto de algún tejido.

6.1 TRABAJO FUTURO

Aún queda mucho trabajo por realizar como por ejemplo, realizar estos estudios pero en tejidos vivos y poder comparar resultados, analizar y distinguir la respuesta entre un tejido sano y un tejido enfermo. También la adaptación del circuito PLL para lograr obtener el desplazamiento que generan las vibraciones y en un futuro no muy lejano poder diseñar un dispositivo portátil capaz de medir las deformaciones en los cuerpos u objetos, ya que se supone que cada membrana tiene su propia resonancia, y con estos estudio poder observar si se encuentra enferma o no cualquier membrana.

Bibliografía

- E. Kreyszig, "Vibrating membrane" in *Advanced engineering mathematics*, wiley International Edition, 1972, pp. 439 -446
- Amplificadores operacionales – Coughlin
- Fascia Moderna - Raymond A, Serway/ Clement J. Moses/ Curt A. Moyer
- Introducción A La Interferometría, Sánchez Del Río, C, Consejo Superior Investigaciones Científicas (C.S.I.C.) - 1949
- Oscilaciones y ondas, Alicia Guerrero de Mesa, Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá) Facultad de Ciencias, 2005, Primera Edición. (2008, Reimpresión)
- Libro Metodos Opticos De Analisis, Autor Olsen, Editorial Reverte Con Garantia Libreria Losada
- Ecuaciones Diferenciales: una introducción moderna - Henry Ricardo, Editorial Reverté.
- Sistema de Comunicaciones Electrónicas – Tomasi, editorial Prentice Hall
- Revista Electronics now, edición de agostos de 1994
- M. Hernandez-Montes, C. Perez-Lopez, F. Mendoza Santoyo, *Opt Express* 12, 853-858 (2004) (publicacion)
- <http://www.agspecinfo.com/pdfs/7/74HC4046.PDF>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Electromagnetismo>
- <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/spanishwp/15PhaselockedSP.pdf>
- <http://www.simet.gob.mx/optica/Lists/Resmenes/DispForm.aspx?ID=53>

ANEXOS

TEJIDOS

Los tejidos están formados por conjuntos de células que se agrupan de forma ordenada y cumplen una misma función. Histología es la ciencia que estudia los tejidos.

Se denomina tejido a la agrupación de células con una estructura determinada que realizan una función especializada, vital para el organismo.

Los tejidos animales adquieren su forma inicial a partir del óvulo fecundado. A medida que las células se van diferenciando, determinados grupos de células dan lugar a unidades más especializadas para formar órganos que se componen, en general, de varios tejidos formados por células con la misma función. Normalmente las células se unen entre sí de diversas maneras para constituir una unidad de orden superior: el tejido, en el cual un grupo de células de la misma especialización se distinguen por sus funciones especiales.

Las células que forman los distintos tejidos de un organismo pluricelular suelen presentar diferencias muy notables en estructura y función. Las diferencias entre una célula nerviosa, una célula hepática (del hígado) y un eritrocito (glóbulo rojo) de un mamífero, por ejemplo, son tan extremas que cuesta creer que todas ellas contengan la misma información genética. Como todas las células de un animal o vegetal se forman a través de divisiones sucesivas de un único óvulo fecundado, casi todas ellas tienen la misma información genética. Se diferencian unas de otras porque sintetizan y acumulan juegos distintos de moléculas de ARN

y proteínas sin alterar la secuencia del ADN. Este proceso, llamado diferenciación, se basa en la activación y desactivación selectiva de genes en una sucesión programada.

Estos cambios orquestados de las características celulares suelen ser irreversibles, de modo que una célula nerviosa humana no puede transformarse en leucocito ni volver al estado de división rápida característico de las células embrionarias inmaduras de las que procede.

La Histología es la parte de la Medicina y de la Biología que estudia los tejidos. Entre las células que componen un tejido existe habitualmente una cantidad variable de sustancia intercelular o cemento de unión, segregada por las mismas células y con características bien definidas, de gran difusibilidad y por lo general rica en mucopolisacáridos.

En algunos tejidos la cantidad de cemento es mínima y las células están en íntimo contacto unas con otras (tejido epitelial). En otros tejidos, la cantidad de sustancia intercelular es máxima y líquida y las células están separadas entre sí (plasma sanguíneo). Entre ambos extremos hay tejidos con características intermedias (tejido cartilaginoso y tejido óseo). Se distinguen cinco tejidos básicos: epitelial, conectivo o conjuntivo, muscular, nervioso y sanguíneo. Los distintos tejidos se combinan para formar unidades funcionales superiores llamadas órganos. Estos a su vez se integran en unidades funcionales mayores que son los aparatos o sistemas. Se habla de sistemas cuando la estructura de dichas unidades está formada fundamentalmente por un tejido, como sucede en el sistema nervioso. En caso contrario se los denomina aparatos. Sin embargo, en algunos casos se usan ambas denominaciones, como sucede con el aparato o sistema circulatorio.

PROBLEMAS EN TEJIDOS

El cáncer es generalmente clasificado según el tejido a partir del cual las células cancerosas se originan. Un diagnóstico definitivo requiere un examen histológico, aunque las primeras indicaciones de cáncer pueden ser dadas a partir de síntomas o radiografías. Muchos cánceres pueden ser tratados y algunos curados, dependiendo del tipo, la localización y la etapa o estado en el que se encuentre. Una vez detectado, se trata con la combinación apropiada de cirugía, quimioterapia y radioterapia. Según investigaciones, los tratamientos se especifican según el tipo de cáncer y, recientemente, también del propio paciente. Ha habido además un significativo progreso en el desarrollo de medicamentos que actúan específicamente en anomalías moleculares de ciertos tumores y minimizan el daño a las células normales. El diagnóstico de cáncer en pacientes está, en gran medida, influenciado por el tipo de cáncer, así como por la etapa o la extensión de la enfermedad (frecuentemente en estados iniciales suele ser confundido con otras patologías si no se realizan los diagnósticos diferenciales adecuados). La clasificación histológica y la presencia de marcadores moleculares específicos pueden ser también útiles en el diagnóstico, así como para determinar tratamientos individuales.

Neoplasia

El término *neoplasia*: significa de acuerdo a sus raíces etimológicas: "tejido de nueva formación".

"Neoplasia" se aplica generalmente a los **tumores malignos** (proliferaciones de células con comportamiento rebelde); aunque puede emplearse de manera genérica, donde significará simplemente "tumor".

Las enfermedades o lesiones cuyos nombres tienen el sufijo **oma** indican neoplasia, como por ejemplo adenoma, osteosarcoma, leiomioma, lipoma, melanoma, etc.

Existen, en resumen, dos tipos de neoplasias, que son las benignas o tumores benignos y las malignas o cáncer (neoplasias rebeldes).

Tumor

Inicialmente, el término tumor, se aplicó a la tumefacción, hinchazón, "bulto" o aumento localizado de tamaño, en un órgano o tejido. Incluso, el concepto aún se aplica cuando se dice que los cuatro signos cardinales de la inflamación son "tumor, dolor, calor y rubor". Con el transcurso del tiempo se olvidó el sentido neoplásico de la palabra tumor y en la actualidad el término es el equivalente o sinónimo de neoplasia; y por lo tanto, se dice que hay tumores benignos y tumores malignos

Todos los tumores, benignos y malignos, tienen dos componentes básicos en su estructura:

1. Las células neoplásicas proliferantes, es decir, las células que forman el tumor propiamente dicho, que constituyen el parénquima.
2. Su estroma de sostén, constituido por tejido conectivo y vasos sanguíneos. Se trata de tejidos no tumorales cuya formación ha sido inducida por el propio tumor.

La nomenclatura oncológica se basa en el componente parenquimatoso. Se usan dos criterios de clasificación: en primer lugar su carácter benigno o maligno, y en segundo lugar el tejido en el que se forman.

Según el comportamiento de los tumores:

1. Tumores benignos: Su nombre acaba en el sufijo *-oma*; simplemente, y según el origen del tejido del que procedan los tumores benignos, pueden ser: fibroma (tejido conjuntivo fibroso), mixoma (tejido conjuntivo laxo), lipoma (tejido adiposo), condroma (tejido cartilaginoso), osteoma (tejido óseo), hemangioma (vasos sanguíneos), linfangioma (vasos linfáticos), meningioma (meninges), tumor glómico (tejido nervioso de sostén), leiomioma (tejido muscular liso), rabiomioma (tejido muscular estriado), papiloma (tejido epitelial formando papilas), adenoma (tejido glandular), teratoma (células totipotenciales), nevus (melanocitos)

Algunos de los tumores benignos derivados de tejido epitelial terminan con el sufijo "adenoma" porque el tejido epitelial de origen forma glándulas, si bien tenemos que tener en cuenta que existen múltiples excepciones a las normas de nomenclatura tumoral. Por ejemplo: El tumor benigno de melanocitos se denomina Nevus o nevo, y su forma maligna, Melanoma.

2. Tumores malignos o cáncer:
 - o Los cánceres que derivan de los tejidos mesenquimatosos o mesodermo se denominan sarcomas (del griego *sarcos*, "carnoso"); por ejemplo: fibrosarcoma, mixosarcoma, liposarcoma, condrosarcoma, osteosarcoma, angiosarcoma, linfangiosarcoma, sinoviosarcoma, leiomiosarcoma, rabiomiosarcoma.
 - o Las neoplasias malignas de origen epitelial, derivadas de cualquiera de las tres capas germinales del embrión, se denominan carcinomas; por ejemplo: carcinoma epidermoide o escamoso, carcinoma basocelular, adenocarcinoma, cistoadenocarcinoma, coriocarcinoma, carcinoma de pene.

- Los tumores que proceden del tejido nervioso son los gliomas (realmente no se trata de un tumor derivado de células nerviosas, sino de uno de los tipos celulares encargados de su sostén, las células gliales, el tejido "conectivo" del cerebro, por así decir).
- Los cánceres hematológicos son los linfomas y las leucemias, siempre malignos (derivados del tejido linfoide y el mieloide respectivamente).
- Los tumores malignos que no cumplen las reglas anteriores y acaban en -oma, son: el melanoma, el hepatoma, el seminoma. También están los mesoteliomas, que se originan en las membranas serosas (pleura, pericardio, peritoneo), y que pueden tener componente epitelial o mesenquimatoso.