



# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ**

## **INFORME TECNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL**

### **“CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA CAÓTICA DEL LÁSER DE Nd:YAG CON MODULACIÓN DE PARÁMETROS”**

#### **PRESENTA:**

LÓPEZ MORALES GUADALUPE

No. CONTROL 05270286

ING. ELECTRÓNICA

#### **INSTITUCIÓN DE REALIZACION:**

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A. C.

#### **ASESOR EXTERNO:**

Dr. VÍCTOR JOEL PINTO ROBLEDO

#### **ASESOR INTERNO:**

ING. ALVARO HERNANDEZ SOL

TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS

DICIEMBRE DE 2009

## **INDICE**

### **CAPITULO 1. GENERALIDADES**

1.1 INTRODUCCIÓN .....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	5
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.4 CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE TRABAJO .....	6
1.5 PROBLEMAS A RESOLVER .....	6
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES .....	7

### **CAPITULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO**

2.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL LÁSER .....	8
2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	9
2.3 TEORIA DE LÁSERES.....	10
2.4 LÁSER Nd:YAG .....	12
2.5 Q-SWITCH .....	13
2.6 Q-SWITCH ACUSTO-ÓPTICO .....	14
2.7 SISTEMA DINÁMICO CAOTICO .....	15
2.8 DESCRIPCION DE LAS GRAFICAS UTILIZADAS .....	17
2.8.1 GRÁFICA DE SERIES TEMPORALES.....	17
2.8.2 GRÁFICA DEL ESPECTRO DE POTENCIA .....	17
2.8.3 DIAGRAMA DE FASES .....	19
2.9 TARJETA DE ADQUISICION DE DATOS.....	20
2.10 BREVE INTRODUCCION A LABVIEW .....	26

2.10.1	PANEL FRONTAL .....	26
2.10.2	DIAGRAMA A BLOQUES .....	27
2.10.3	SUBVIS.....	28
2.10.4	VARIABLES LOCALES Y GLOBALES .....	28
<b>CAPÍTULO 3. PROGRAMA DE MONITOREO</b>		
3.1	PROGRAMA DE MONITOREO Y GUARDADO DE DATOS .....	29
3.2	PROTOTIPO DEL PANEL FRONTAL .....	30
3.3	CÓDIGO DEL PROGRAMA .....	33
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO</b>		
4.1	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	38
4.2	PRUEBAS .....	42
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS</b>		
5.1	PORCENTAJE DE MODULACIÓN .....	44
5.2	GRÁFICAS VARIANDO LA FRECUENCIA DE MODULACIÓN DE PÉRDIDAS EN EL RESONADOR DEL LÁSER .....	45
5.3	GRÁFICAS VARIANDO LA POTENCIA DE BOMBEO DEL LÁSER .....	53
<b>CONCLUSIÓN .....</b>		<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>60</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES .....</b>		<b>77</b>

# CAPÍTULO 1

## **GENERALIDADES**

---

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

En el Laboratorio de Láseres CIO se llevan a cabo estudios sobre la dinámica de estos láseres cuando son bombeados ya no por lámparas flash sino por láseres de semiconductor de potencia media. Los láseres de este tipo presentan ventajas de ser compactos, altamente eficientes y prácticos por su tamaño reducido. Sin embargo la dinámica implícita del láser de estado sólido con bombeo de diodos puede resultar en inestabilidades, intermitencia y comportamiento errático. La naturaleza no lineal del sistema láser exhibe una gama de comportamientos muy rica, comportamientos que van desde emisión continua, pulsada periódicamente, intermitencia o bien caos y combinaciones de todos estos estados. Una de las técnicas para inducir estados caóticos es la modulación de un parámetro (parámetro de pérdidas) que será usada en este trabajo.

El material presentado de la “Caracterización de la Dinámica Caótica del Láser de Nd:YAG con Modulación de Parámetros” se realizó con la finalidad de llevar a cabo una serie de mediciones experimentales para dicha caracterización, estas consistirán en mediciones de potencia láser y también la obtención de señales temporales para caracterización de la salida cuando ésta sea caótica o bien en forma pulsaciones periódicas.

Se desarrolló un programa en el lenguaje gráfico de Labview 6i para monitorear la señal de salida del láser. También el programa permite almacenar todos los datos de las series temporales obtenidas y guardar la imagen de la gráfica de la señal del láser, la gráfica del espectro de frecuencia y el diagrama de fase.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Los láseres de estado sólido como el Nd:YAG son los láseres más usados en la industria después del láser de CO<sub>2</sub>, estos láseres tienen aplicaciones tanto en la manufactura y procesamiento de materiales como en la investigación óptica y en medicina, entre otras. Se utilizan en corte, procesamiento de materiales, marcado, grabado, etc. En el área de investigaciones este tipo de láser se usa en metrología, en espectroscopia, etc.

A pesar de ser dispositivos de uso práctico la dinámica de estos láseres se sigue investigando en muchas partes del mundo con el propósito de mejorar aún más sus características.

El trabajo a realizar en este proyecto forma una parte de la investigación que se viene realizando en esta área en el centro de Investigaciones en Óptica. Estos trabajos representan un avance en el conocimiento de estos dispositivos láser no solo a nivel nacional sino que estos estudios están sometidos a comparaciones de trabajos similares internacionales.

## 1.3 OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Caracterizar la emisión de un láser a base de cristal Nd:YAG con modulación de parámetros.

### OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Ensayar técnicas de modulación de parámetros.
- Obtener las series temporales usando una tarjeta A/D de adquisición de datos en una PC.
- Almacenar los datos en un archivo y las imágenes de las gráficas calculadas en el lenguaje gráfico de LabView.

## 1.4 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

El Centro de Investigaciones en Óptica A. C. es un Centro Público de Investigación dedicado a la investigación básica y aplicada, la formación de recursos humanos de alto nivel en el campo de la óptica, así como al fomento de la cultura científica en la sociedad.

El Laboratorio de Láseres se encuentra en la División de Fotónica de CIO en donde se llevan a cabo estudios sobre la dinámica de estos láseres cuando son bombeados ya no por lámparas flash sino por láseres de semiconductor de potencia media.

En la División de Fotónica se realiza investigación teórica y experimental sobre las propiedades ópticas de la materia y su interacción con la luz. Los resultados del trabajo del Departamento de Fotónica generan nuevos avances científicos y tecnológicos con potenciales aplicaciones a mediano y largo plazo en dispositivos práctico/tecnológicos en las áreas de opto-electrónica, ciencia e ingeniería de materiales, láseres, dispositivos fotónicos, etc.

## 1.5 PROBLEMAS A RESOLVER

- Capturar las señales del láser en tiempo real para el monitoreo y ensayo de técnicas de control dinámico.
- Encontrar en que valor de los parámetros la dinámica del sistema es caótico
- Calcular el espectro de potencia y el diagrama de fase de la señal muestreada
- Generar un archivo donde se encuentren los datos de la señal muestreada así como las imágenes de las gráficas.

## **1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **ALCANCES**

Se ensayó con láseres de laboratorio y de potencia baja, sin embargo las técnicas de caracterización empleadas así como sistemas de control son susceptibles de implementar en láseres más potentes como los que se usan en la industria.

### **LIMITACIONES**

- Se ensayó en sistemas láser de baja potencia
- La DAQ generó señales de ruido al tomar las lecturas de la señal.

## CAPÍTULO 2

# FUNDAMENTO TEÓRICO

---

### 2.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL LÁSER

La palabra LÁSER proviene del acrónimo “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación). El láser es una fuente de luz estrecha, coherente y monocromática.

Los Láseres se usan en muchas aplicaciones incluyendo procesamiento de materiales, construcción, medicina, comunicaciones, producción de energía, usos militares, soldadura, topografía y como herramienta en muchas áreas de investigación científica.

En la figura 2.1 se observa los tres elementos básicos que tiene un láser.

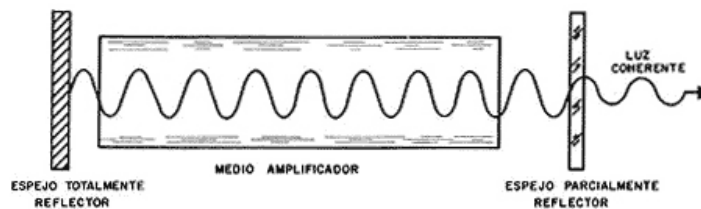


Figura 2.1 Elementos básicos de un láser

- 1) Medio activo
- 2) Sistema de bombeo (mecanismo de excitación)
- 3) Cavidad resonante (espejos)

1. Un medio amplificador en el cual genera la luz láser. El medio activo se considera un amplificador óptico ya que un haz coherente que logre entrar al medio activo es amplificado por emisión estimulada hasta que el haz incrementado alcance el otro extremo del medio activo.



2. Una fuente de poder que suministra la energía suficiente para excitar al medio activo desde un nivel de energía bajo a uno más alto para crear inversión de población.
3. Cavity óptica o resonador, la cual concentra y estimula la emisión de radiación láser.

## 2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del láser se describe en la figura 2.2.

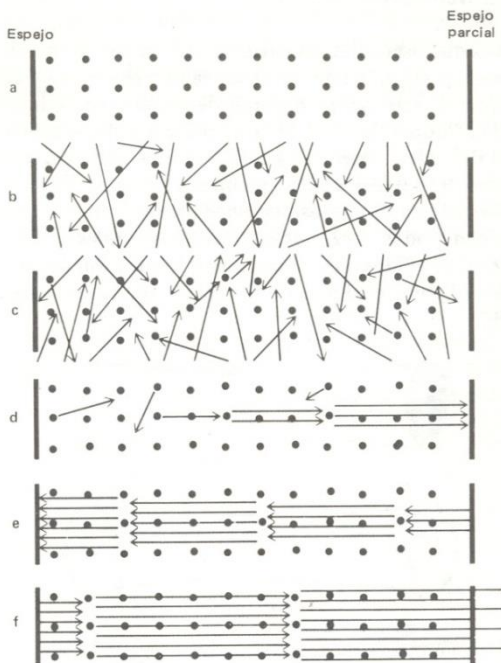


Figura 2.2 Funcionamiento de un láser

- a) Las moléculas se encuentran en estado fundamental porque no existe ninguna energía de excitación.
- b) y c) Cuando se aplica el voltaje de excitación al medio, muchas moléculas son excitadas pasando a un nivel de energía superior y se emiten fotones espontáneamente.
- d) Si un fotón emitido choca con una molécula excitada, ocurre una amplificación, ya que esa molécula será estimulada a emitir un fotón

idéntico al primero y que se moverá en la misma dirección. La emisión estimulada prosigue, puesto que cada uno de los fotones es capaz de provocar la emisión de más.

- e) El movimiento de los fotones puede realizarse en cualquier dirección, pero aquellos que se desplazan paralelos al eje del tubo chocan en un espejo de los extremos y se reflejaran hacia atrás, paralelamente al mismo eje. Estos son los fotones que forman dentro del tubo, el haz de luz coherente, de una sola frecuencia, al reflejarse en uno y otro sentido, estimulando la emisión de más fotones idénticos en una reacción en cadena.
- f) Algunos de estos fotones pasan a través del espejo parcialmente transmisor (el acoplador de salida) y emergen como un haz de rayos paralelos, mientras que otros continúan oscilando en el resonador, generando más fotones. Este fenómeno continuara mientras se mantenga la inversión de población entre las moléculas del medio de emisión láser.

## 2.3 TEORÍA DE LÁSERES

Las transiciones de energía se pueden dar mediante tres procesos, se puede apreciar en la figura 2.3.

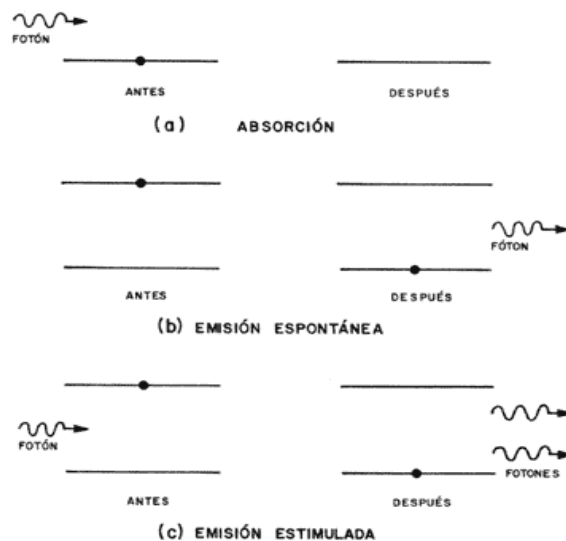


Figura 2.3 Transiciones de energía

- a) Absorción: cuando un fotón interactúa con un átomo o molécula llevándola de un nivel de energía inferior a un nivel de energía superior.
- b) Emisión espontánea: se produce cuando el átomo o molécula decae de un nivel superior de energía a otro inferior liberando un fotón de forma natural y sin intervención externa.
- c) Emisión estimulada: se da cuando un fotón provoca que el átomo o molécula pase de un nivel superior de energía a uno inferior liberando dos fotones.

La relación entre el cambio de energía, así como la absorción y emisión de fotones, se encuentra inmersa en la Ecuación de Planck (Ecuación 2.1).

$$\Delta E = h\nu \quad \text{[Ecuación 2.1]}$$

Donde  $\Delta E$  es el cambio de energía,  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia del fotón emitido o absorbido.

Un láser en condiciones normales tiene mayor absorción que emisión de fotones debido a que la población de átomos o moléculas tienden a permanecer en los niveles más bajos de energía de forma estable.

Si la población es estimulada externamente para aumentar a niveles de energía superior y el número de fotones emitido es mayor que el absorbido, se cumplirían las condiciones para generar emisiones estimuladas en cadena, a esto se le llama inversión de población, la cual es la condición necesaria para la emisión del láser.

Para aumentar la potencia de la luz emitida es importante retroalimentar al sistema, esto se logra con una cavidad resonante donde los fotones estimulan continuamente el medio activo provocando más fotones. La luz sale por uno de los espejos el cual no refleja completamente.

## 2.4 LÁSER Nd-YAG

El láser de Nd:YAG pertenece al grupo de láseres de estado sólido teniendo como medio activo impurezas de neodimio que pertenece al grupo de tierras raras, en un cristal de itrio-aluminio-granate ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) en concentraciones de pesos desde 0.5% al 5%.

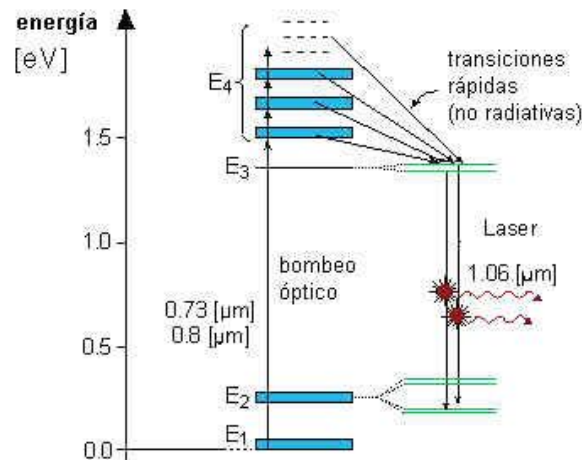


Figura 2.4 Niveles de energía para el láser de Nd:YAG.

Como puede apreciarse en la figura 2.4, los láseres de Nd:YAG tienen cuatro niveles de energía. Los iones de Nd tienen dos bandas de absorción, y la excitación se puede efectuar por bombeo óptico, ya sea con lámparas de flash para láseres pulsantes, con lámparas de arco para los láseres continuos, o recientemente con diodos láser.

Tradicionalmente, la excitación óptica es producida por lámpara de flash, lámpara de onda continua (cw) así como lámparas de arco o lámparas tungsteno halógeno, o por otros láseres, cualquiera de los dos son pulsadas o continuas.

El bombeo de láser tiene numerosas ventajas comparado por la de bombeo por lámpara:

- ✓ Direccionalidad del bombeo óptico
- ✓ La emisión del diodo láser coincide con las bandas de absorción del medio de ganancia (es mucho más eficiente).

- ✓ La habilidad para empatar el perfil de inversión creado por el haz bombeado del laser fundamental con el modo generado en el medio de ganancia.

Los láseres usados como fuente de bombeo óptico incluye láser de estado sólido con bombeo de lámpara de flash así como Nd:YAG, y láseres de gas como de ion de argón y un menos extenso el laser de ion de kriptón.

## 2.5 Q - SWITCH

Un laser Nd:YAG puede funcionar bombeados continuamente en un modo de permutación Q (Q Switch). En esta técnica se provoca una alta inversión de población a través de un elemento generador de pérdidas, en ese momento se permite la resonancia y se genera un pulso de alta energía.

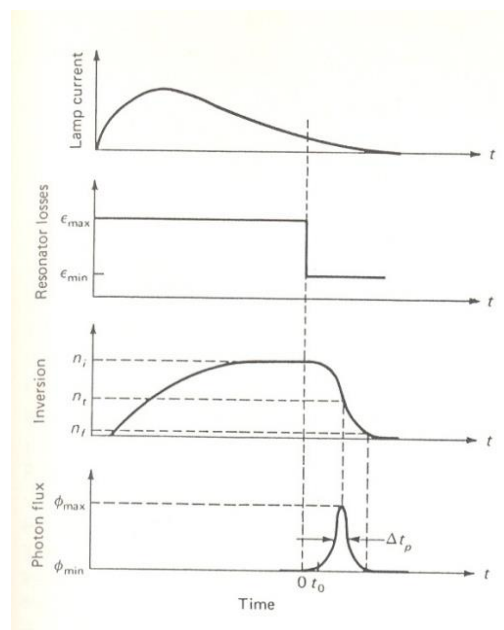


Figura 2.5 Secuencia de la generación del pulso de Q-Switch

En la figura 2.5 se muestra una secuencia de la generación de un pulso de Q-Switch. Cuando finaliza el pulso de la lámpara de flash y la inversión de población ha alcanzado un valor pico, el factor de calidad en el resonador es alto. En este punto un fotón comienza a fortalecerse en la cavidad, y un pulso de Q-Switch es emitida.

## 2.6 Q-SWITCH ACUSTO-ÓPTICO

En la figura 2.6 se observa un Q-switch acusto-óptico (Acousto-optic Mode Locker Model ML-50B, fabricado por IntraAction Corp).

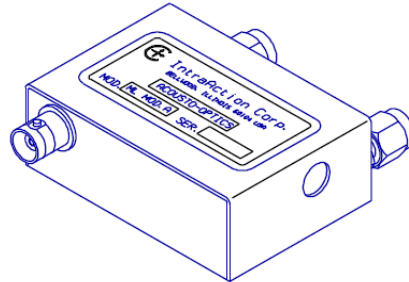


Figura 2.6 Dispositivo Acusto-óptico

Es un dispositivo que dentro de la cavidad cuenta con un cristal de cuarzo que tiene ajuntado un transductor piezoeléctrico. Este transductor propaga una fuerte onda acústica dentro del material cuando una señal de radio frecuencia (RF) es aplicada al transductor, formando una red de difracción. Si este campo se aplica cuando el amplificador está siendo bombeado, el haz de láser es desviado fuera de la cavidad por la red. Cuando la señal es apagada el haz pasa a través de la cavidad generando el pulso de Q-Switch.

El factor de calidad en los resonadores de un láser determina que tan bien almacena energía la cavidad. Un alto factor de calidad significa que la energía es almacenada en la cavidad con pequeñas pérdidas. Un pequeño factor de calidad en los resonadores indica que existen grandes pérdidas de energía en las cavidades.

El Q-switch acusto-óptico es usado en la cavidad láser como un modelador de pérdidas de energía por difractar una fracción de la salida de luz de la principal cavidad de bombeo. Cuando el Q-switch se apaga, toda la luz regresa a un alto factor de calidad en la cavidad de nuevo. Entonces, toda la energía que fue almacenada será emitida en un pulso de luz láser de alta potencia. Este proceso se repite cada vez que el Q-switch es activado y apagado.

## 2.7 SISTEMA DINÁMICO CAÓTICO

Un sistema dinámico presenta comportamiento caótico cuando sus trayectorias en el espacio de fases permanecen dentro de una cierta región, llenándola sin un orden geométrico definido y presenta sensibilidad a las condiciones iniciales.

El nombre de caos y el adjetivo de caótico son usados para describir el comportamiento temporal de un sistema cuando dicho comportamiento es aperiódico y aparentemente aleatorio o ruidoso.

Las propiedades del caos son las siguientes:

- **Espacio de fase.** Una secuencia de valores de datos medido en el tiempo puede ser transformado en un objeto en el espacio. Este objeto es llamado el “grupo de espacio de fase” y se representa en la figura 2.7. Algunas propiedades son más fáciles para determinar analizando el grupo de espacio de fase que analizando el dato original directamente.

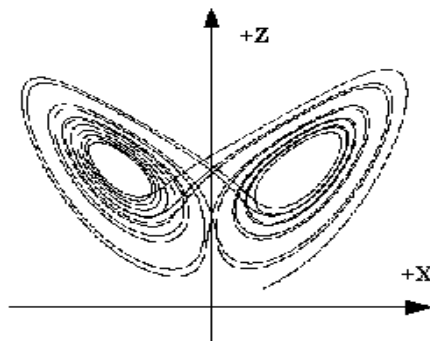


Figura 2.7 ejemplo de espacio de fase

- **Sensibilidad en las condiciones iniciales.** Si tenemos un sistema caótico con casi los mismos valores iniciales, se consigue diferentes valores de las variables al final después de haber transcurrido cierto tiempo (ver figura 2.8). A esto se le conoce sensibilidad en las condiciones iniciales.

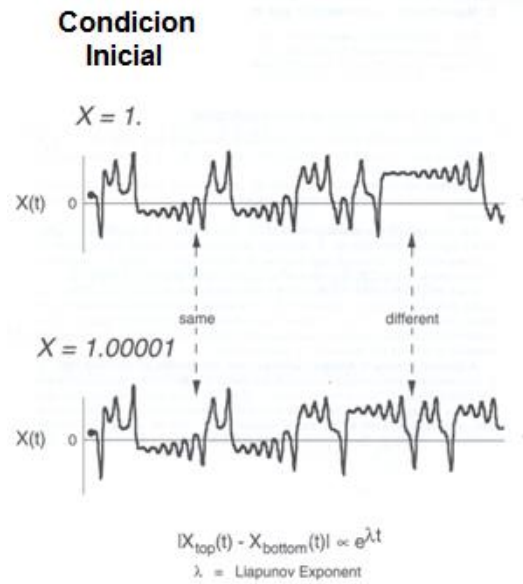


Figura 2.8 Sensibilidad a las condiciones iniciales

Un sistema caótico amplifica pequeñas diferencias en condiciones iniciales en grandes diferencias.

- **Bifurcaciones.** El comportamiento de un sistema puede cambiar abruptamente con un pequeño cambio en los valores de un parámetro. Esto es llamado una “bifurcación” (ver figura 2.9).

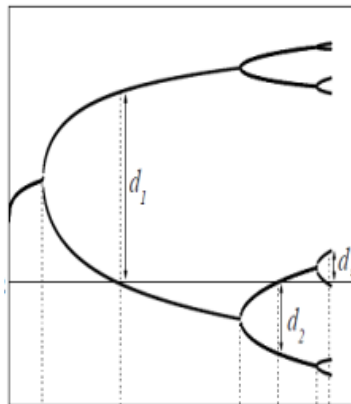


Figura 2.9 Ejemplo de Bifurcación

- **Control del caos.** Si el análisis muestra que los datos fueron producidos por un mecanismo determinista, puede ser capaz de entender y tal vez



controlar dicho sistema. En la figura 2.10 se representa un ejemplo de una señal sin control así como una señal controlada.

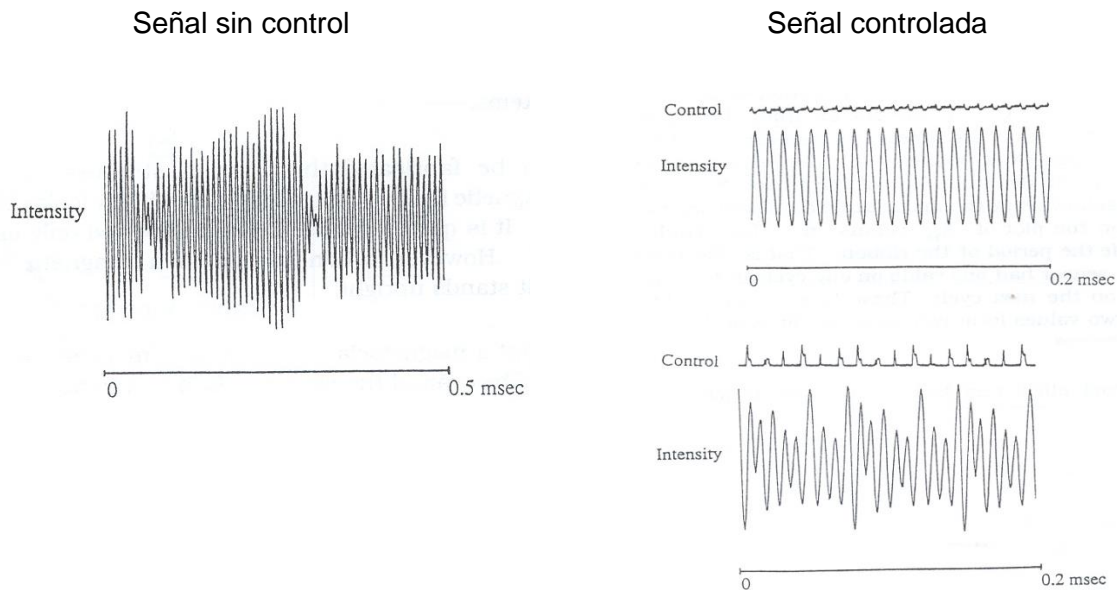


Figura 2.10 Control de Caos

## 2.8 DESCRIPCIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DE DATOS

### 2.8.1 GRÁFICA DE SERIES TEMPORALES

Una serie temporal es la representación gráfica de la evolución temporal de una señal para obtener información sobre su regularidad. En este caso, es la gráfica de la señal muestreada de la salida del láser.

### 2.8.2 GRÁFICA DEL ESPECTRO DE POTENCIA

En las muestras de una señal obtenida de una tarjeta DAQ constituye la representación de la señal en el dominio del tiempo. Esta representación da las amplitudes de la señal en los instantes de tiempo durante los cuales han sido muestreadas. Sin embargo en muchos casos se quiere conocer el contenido de frecuencias de una señal en lugar de las amplitudes de las muestras individuales. La representación de una señal en términos de sus componentes de frecuencia

individuales es conocida como la representación en el dominio de la frecuencia de la señal. La representación en el dominio de la frecuencia puede dar una visión acerca de la señal y el sistema desde el cual fue generada. Un ejemplo de esta gráfica se observa en la figura 2.11.

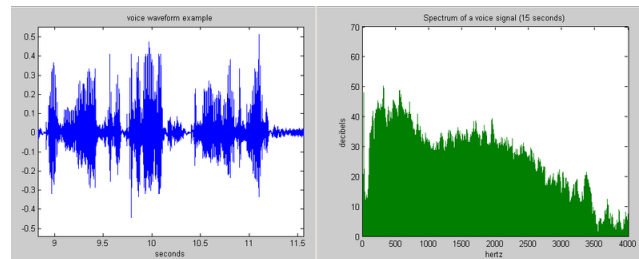


Figura 2.11 Ejemplo de una señal muestreada y su espectro de potencia

Al hacer una representación de una de las variables del sistema frente al tiempo, podemos encontrar con una señal a simple vista regular o bien irregular, pero esto no es suficiente para caracterizar su naturaleza periódica o aperiódica en el tiempo. Existen varias técnicas matemáticas para este tipo de análisis dependiendo del tipo de señal que se está analizando, pero la más importante es la Transformada de Fourier de la señal.

La DFT (Transformada Discreta de Fourier) surgió de la necesidad de establecer una transformación que conservando la relevancia conceptual de la Transformada de Fourier generase una secuencia en el dominio transformado. El método más utilizado para obtener la DFT por su economía de tiempo de cálculo es la Fast Fourier Transform (FFT). Si la señal es periódica de periodo  $T$  se obtiene un solo valor no nulo. Si la señal es aperiódica, es decir, caótica, su espectro no es continuo, no hay máximos definidos que indiquen la presencia de frecuencias características.

El algoritmo usado para transformar muestras de los datos desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia es conocido como la transformada discreta de Fourier o DFT. La DFT establece la relación entre las muestras de una señal en el dominio del tiempo y su representación en el dominio de la frecuencia. La DFT es ampliamente usada en el campo de análisis espectral, mecánica aplicada,

acústica, pictografía médica, análisis numérico, instrumentación y telecomunicaciones.

Suponga que se han obtenido N muestras de una señal de una tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ). Si se aplica la DFT a N muestras de esta representación de la señal, el resultado es también de longitud N, pero la información contiene es en la representación en el dominio de la frecuencia. La relación entre las N muestras en el dominio del tiempo y las N muestras en el dominio de la frecuencia se explica en seguida.

Si la señal es muestreada a la razón de muestreo de  $f_s$  Hz, entonces el intervalo de tiempo entre muestras (esto es el intervalo de tiempo) es  $\Delta t$ , como en la ecuación 2.2

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad \text{[Ecuación 2.2]}$$

Las señales de muestra son denotadas por  $x[i]$ ,  $0 \leq i \leq N-1$  (esto es, si se tienen un total de N muestras). Cuando la transformada discreta de Fourier es dada por  $X_K = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j2\pi ik}$  para  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$  es aplicada a estas N muestras, la salida resultante ( $X[k]$ ,  $0 \leq k \leq N-1$ ) es la representación en el dominio de la frecuencia de  $x[i]$ . Observe que tanto el dominio en el tiempo y el dominio en la frecuencia X tienen un total de N muestras. Análogamente para el espaciamiento de tiempo de  $\Delta t$  entre las muestras de x en el dominio del tiempo, se tiene un espaciamiento de frecuencia de entre los componentes de X en el dominio de la frecuencia.  $\Delta t$  es también conocida como la resolución de frecuencia. Para incrementar la resolución de la frecuencia (una  $\Delta f$  más pequeña) se debe incrementar el número de muestras N (con  $f_s$  constante) o decrementar la frecuencia de muestreo  $f_s$  (con N constante).

### 2.8.3 DIAGRAMA DE FASES

Cuando una partícula se mueve a lo largo del eje x, que a menudo representan el movimiento como una grafica la coordenada x o la velocidad  $v = \frac{dx}{dt}$  en función del tiempo t. Una diferente pero muy útil representación, es graficar la posición instantánea x y la velocidad v de la partícula como un punto en un

plano llamado plano de fase, con los ejes horizontal y vertical que representa  $x(t)$  y  $V(t)$ , respectivamente. Dicha grafica se llama un grafica de fase (ver ejemplo de un diagrama de fase en la figura 2.12). Cada punto en el plano de fase  $x-v$  representa un estado instantáneo del movimiento (posición y velocidad) del sistema. Como el movimiento avanza, el punto representativo (el punto de fase) describe una trayectoria llama la fase de trayectoria en el plano fase.

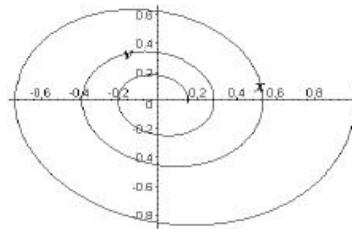


Figura 2.12 Ejemplo de un diagrama de fase

El conjunto de  $N$  coordenadas que caracterizan un sistema de dimensión  $N$  en un instante dado se representa como un punto de un espacio abstracto de dimensión  $N$ , llamado Espacio de Fases. Así, por ejemplo, en cada instante, el estado del sistema formado por una partícula puntual obligada a moverse sobre una recta puede representarse por un punto en un Espacio de Fases de dimensión 2: un plano en el cual un eje localiza la posición de la partícula y el otro su velocidad. A lo largo del tiempo, el punto representativo describe una curva o trayectoria en el espacio de las fases.

## 2.9 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Cuando se utiliza una PC para procesar señales analógicas, se requiere cambiar el formato analógico de la información generada por el fenómeno a detectar, a un formato digital que pueda ser interpretado por la computadora. Para realizar el cambio de formato de la información se utiliza convertidores Analógico/Digital (CAD) y Digital/Analógico (CDA).

El concepto de adquisición de datos se refiere primariamente a la captura de señales analógicas a una PC por medio de una interface. A esta interface se le llama Tarjeta de Adquisición de Datos (Data Acquisition Board), la cual permite que la información del mundo real pueda ser reconocida por una computadora. Las tarjetas DAQ son sistemas electrónicos completos, que se conectan a la computadora a través de su bus interno, o bien, a través de su puerto paralelo estándar tal como se muestra en la figura 2.13.

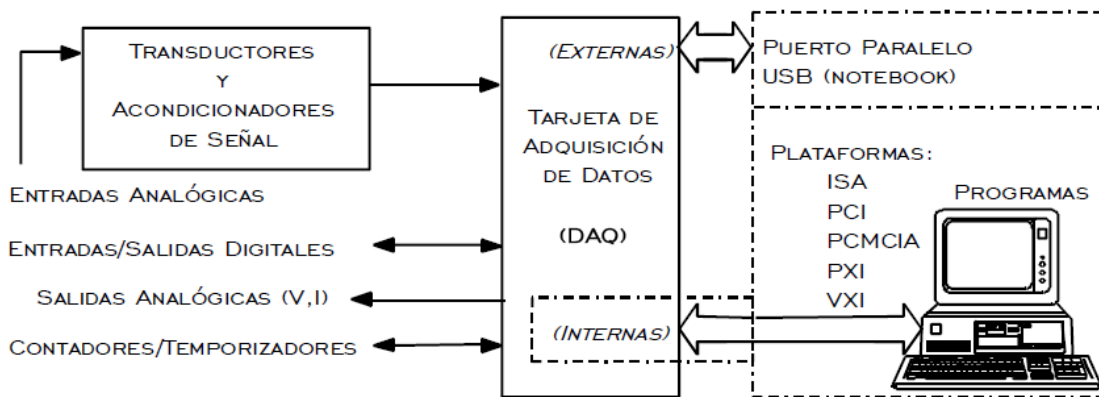


Figura 2.13 Esquema general para la adquisición de datos

### ➤ VELOCIDAD DE MUESTREO

El Teorema de Nyquist (Ecuación 2.3) establece que para poder reconstruir correctamente una señal muestreada, la velocidad de muestreo  $f_s$  debe ser al menos el doble de la mayor de las componentes de la señal muestreada:

$$f_s \geq 2f_{max} \quad \text{[Ecuación 2.3]}$$

### ➤ RESOLUCIÓN

Se refiere al número de bits que el ADC usa para representar una señal analógica. Entre mayor sea la resolución mayor es el número de incrementos en los que se divide rango del ADC, y por lo tanto se pueden detectar voltajes más

pequeños. El ADC traslada cada medición de la señal analógica a una de las divisiones digitales.

➤ **RANGO**

El rango se refiere al mínimo y máximo voltaje analógico que el ADC puede digitalizar. Los rangos más típicos en las tarjetas son de 0-10V, o  $-10V$  -10V, el rango también se puede adaptar a la señal de entrada para tener la mejor resolución disponible.

➤ **GANANCIA**

La ganancia se refiere a cualquier amplificación o atenuación de una señal que puede ocurrir antes de que la señal sea digitalizada. Al aplicar ganancia a una señal se decrementa el rango de entrada del ADC, permitiendo usar mas divisiones para representar menos voltaje.

➤ **TARJETA AT-MIO-16H-9**

La tarjeta AT-MIO-16H-9 fabricada por la National Instruments (NI), de alto rendimiento para la adquisición y control de variables en procesos industriales y de investigación aplicada. La tarjeta es compatible con el sistema operativo Windows 98. En la figura 2.14 se ilustra la imagen de dicha DAQ.



*Figura 2.14 Imagen de la DAQ AT-MIO-16H-9*

Esta tarjeta puede realizar las siguientes funciones:

➤ **Entradas analógicas:**

- 16 canales simples u 8 diferenciales
- Tipo de ADC: simple, aproximación sucesiva
- Resolución de 12 bits, 1 en 4096
- Razón máxima de muestreo=100 kS/s
- Intervalos máximos (ver tabla 2.1):

*Tabla 2.1 Intervalos máximos de voltaje de la entrada analógica*

Board Gain (Software Selectable)	Board Range (Jumper Selectable)		
	±10 V	±5 V	0 to 10 V
1	±10 V	±5 V	0 to 10 V
2	±5 V	±2.5 V	0 to 5 V
4	±2.5 V	±1.25 V	0 to 2.5 V
8	±1.25 V	±0.63 V	0 to 1.25 V

➤ **Salidas analógicas:**

- 2 canales
- Resolución de 12 bits, 1 en 4096
- Razón máxima de muestreo=250kS/s
- Transferencia de datos: interrupciones, programación I/O
- Intervalos: bipolar ±10 V, 0-10V

➤ **8 líneas de entrada/salida digitales tipo TTL**

➤ **3 contadores/temporizadores de 16 bits**

En la figura 2.15 se muestra la configuración de los pines del conector AT-MIO-16 I/O. Este conector está instalado en la parte de atrás del panel de la tarjeta AT-MIO-16 y es accesible en la parte de atrás de la computadora. En la tabla 2.2 se encuentra la descripción correspondiente de cada pin de la DAQ.

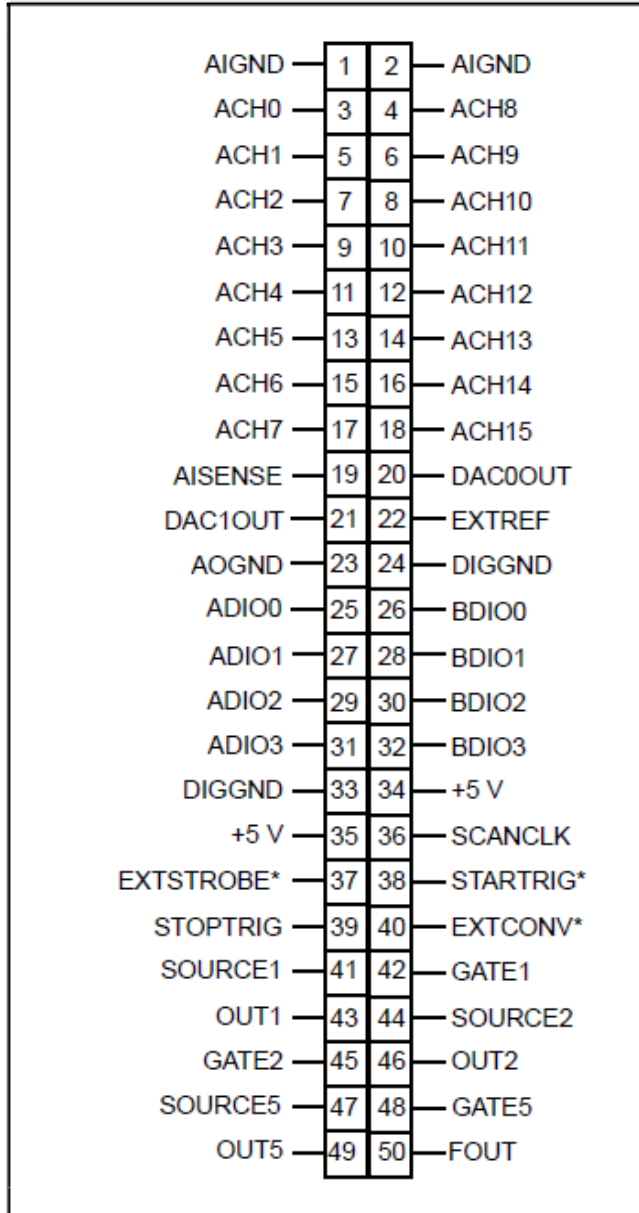


Figura 2.15 Conectores I/O



Tabla. 2.2 Configuración de los pines.

Pin	Signal Name	Reference	Description
1, 2	AIGND	N/A	Analog Input Ground—These pins are the reference point for single-ended measurements and the bias current return point for differential measurements.
3–18	ACH<0..15>	AIGND	Analog Input Channels 0 through 15—In the DIFF mode, the input is configured for up to 8 channels. In single-ended mode, the input is configured for up to 16 channels.
19	AISENSE	AIGND	Analog Input Sense—This pin serves as the reference node when the board is in NRSE configuration. If desired, this signal can be programmed to be driven by the board analog input ground.
20	DAC0OUT	AOGND	Analog Channel 0 Output—This pin supplies the voltage output of analog output channel 0.
21	DAC1OUT	AOGND	Analog Channel 1 Output—This pin supplies the voltage output of analog output channel 1.
22	EXTREF	AOGND	External Reference—This is the external reference input for the analog output circuitry.
23	AOGND	N/A	Analog Output Ground—The analog output voltages are referenced to this node.
24, 33	DIGGND	N/A	Digital Ground—This pin supplies the reference for the digital signals at the I/O connector as well as the +5 VDC supply.
25, 27, 29, 31	ADIO<0..3>	DIGGND	Digital I/O port A signals.
26, 28, 30, 32	BDIO<0..3>	DIGGND	Digital I/O port B signals.
34, 35	+5 V	DIGGND	+5 VDC Source—This pin is fused for up to 1 A of +5 V supply.
36	SCANCLK	DIGGND	Scan Clock—This pin pulses once for each A/D conversion in the scanning modes. The low-to-high edge indicates when the input signal can be removed from the input or switched to another signal.
37	EXTSTROBE*	DIGGND	External Strobe—Writing to the EXTSTROBE* Register results in a minimum 200 ns low pulse on this pin.
38	STARTTRIG*	DIGGND	External Trigger—In posttrigger data acquisition sequences, a high-to-low edge on STARTTRIG* initiates the sequence. In pretrigger applications, the high-to-low edge of STARTTRIG* initiates pretrigger conversions while the STOPTRIG signal initiates the posttrigger sequence.
39	STOPTRIG	DIGGND	Stop Trigger—In pretrigger data acquisition, the low-to-high edge of STOPTRIG initiates the posttrigger sequence.
40	EXTCONV*	DIGGND	External Convert—A high-to-low edge on EXTCONV* causes an A/D conversion to occur. If EXTGATE* or EXTCONV* is low, conversions are inhibited.
41	SOURCE1	DIGGND	SOURCE1—This pin is from the Am9513A Counter 1 signal.
42	GATE1	DIGGND	GATE1—This pin is from the Am9513A Counter 1 signal.

Tabla 2.2 Configuración de los pines (continuación)

Pin	Signal Name	Reference	Description (Continued)
43	OUT1	DIGGND	OUTPUT1—This pin is from the Am9513A Counter 1 signal.
44	SOURCE2	DIGGND	SOURCE2—This pin is from the Am9513A Counter 2 signal.
45	GATE2	DIGGND	GATE2—This pin is from the Am9513A Counter 2 signal.
46	OUT2	DIGGND	OUT2—This pin is from the Am9513A Counter 2 signal.
47	SOURCE5	DIGGND	SOURCE5—This pin is from the Am9513A Counter 5 signal.
48	GATE5	DIGGND	GATE5—This pin is from the Am9513A Counter 5 signal.
49	OUT5	DIGGND	OUT5—This pin is from the Am9513A Counter 5 signal.
50	FOUT	DIGGND	FOUT—This pin is from the Am9513A FOUT signal.

## 2.10 BREVE INTRODUCCIÓN A LABVIEW 6i

LabVIEW 6i (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Labview permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactivo basado en software. Se puede diseñar especificando un sistema funcional, un diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería. Labview es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo Matlab. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes).

Los programas creados mediante LabView son los “instrumentos virtuales” o VI (virtual instrument) que tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. También cuenta con una paleta de herramienta, de control y de funciones.

### 2.10.1 PANEL FRONTAL

Es una interface interactiva, que simula el papel de un instrumento real. El panel frontal de un VI es una combinación de controles (entrada de usuario por medio del teclado y el ratón, en forma de perillas, botones, valores numéricos, etc.) e indicadores (salidas del programa en forma de lecturas digitales, gráficos, tablas, etc.), como se observa en la figura 2.16. Los controles tienen elementos

usados en el Diagrama a Bloques del VI, los indicadores muestran datos medidos o generados por el mismo.

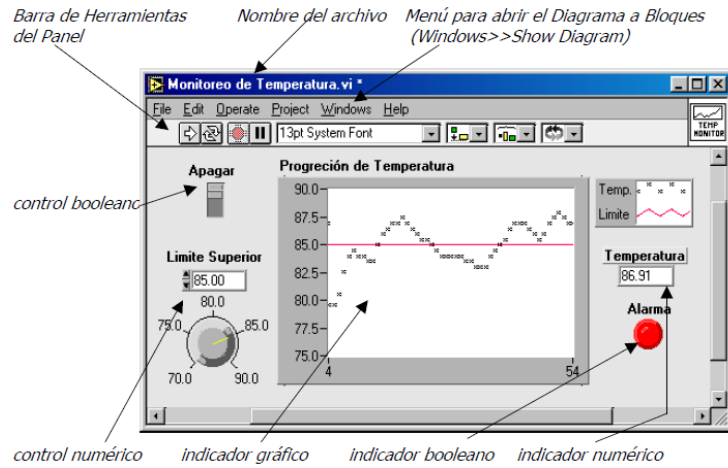


Figura 2.16 Panel frontal (interface del usuario)

### 2.10.2 DIAGRAMA A BLOQUES

Es un diagrama de iconos interconectados por flujos de datos y representa el código fuente del VI en lenguaje gráfico. El diagrama se construye alambrando objetos que envían o reciben datos, realizan funciones específicas y controlan el flujo de ejecución como se representa en la figura 2.17. Los objetos del panel frontal tienen una correspondiente terminal en el diagrama a bloques, de tal manera que se pueden pasar datos entre el usuario y el programa.

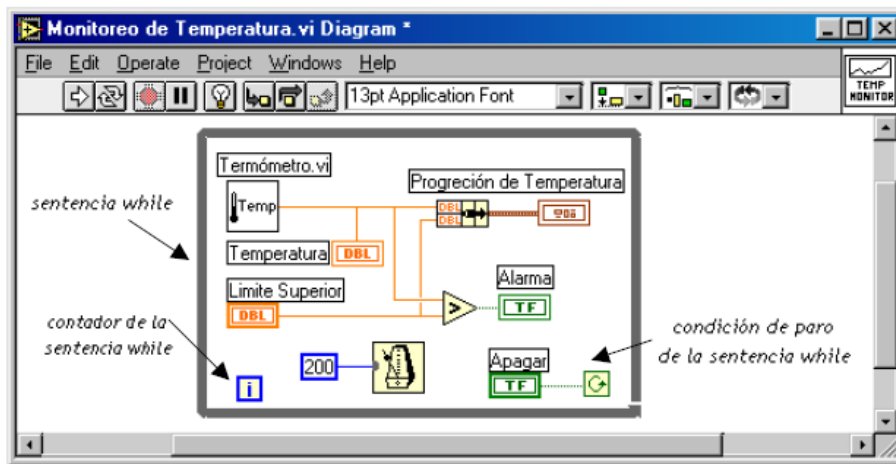


Figura 2.17 Diagrama a bloques (código en fuente en modo gráfico)

Los objetos del diagrama a bloques son fundamentalmente de tres tipos: nodos, terminales y alambres. Como se ha mencionado, en el panel existen dos tipos de objetos: *controles* que son fuente de datos e *indicadores* para mostrar el valor de los datos.

### **2.10.3 SUBVIS**

Un subVI es un VI que está siendo utilizado dentro de otro VI y por tanto tiene asociado un icono y conectores de entrada y salida de datos. Los subVI permiten modular una aplicación en tareas más simples permitiendo que en aplicaciones más extensas puedan ser divididas en varias tareas pequeñas, las que a su vez pueden ser divididas en varias tareas pequeñas y así sucesivamente. Los subVI son equivalentes a las subrutinas en lenguajes de programación convencionales basados en texto.

### **2.10.4 VARIABLES LOCALES Y GLOBALES**

Las variables son imprescindibles en cualquier tipo de problemas, ya que permiten almacenar la información necesaria para su resolución.

En LabVIEW todos los controles introducidos en el Panel Frontal que generan un terminal en la ventana Diagrama van a ser variables, identificables por el nombre asignado en la etiqueta. Pero puede ocurrir que queramos utilizar el valor de cierta variable en otro subdiagrama o en otro VI o, simplemente, que queramos guardar un resultado intermedio. La forma más sencilla de hacerlo es generar variables locales y/o globales dependiendo de la aplicación.

## CAPÍTULO 3

### **PROGRAMA DE MONITOREO**

---

#### **3.1 PROGRAMA DE MONITOREO Y GUARDADO DE DATOS**

Para analizar la dinámica caótica del láser de Nd:YAG es necesario obtener las graficas de la señal de entrada en tiempo real, el espectro y el diagrama de fase. El programa elaborado ayuda para observar como va cambiando la señal conforme se varia la modulación de parámetros. Además, el archivo que se guarda sirve para que en otros programas, como Matlab, se pueda graficar y analizarla para posteriores investigaciones.

Se desarrolló un programa para obtener la caracterización de la dinámica caótica del láser de Nd:YAG con modulación de parámetros por medio de una tarjeta de adquisición de datos AT-MIO-16H-9. El programa se escribió en el lenguaje gráfico de G de LabView 6i, el cual permite generar instrumentos virtuales de fácil operación para el usuario. El programa principal utiliza subinstrumentos virtuales, los cuales son equivalentes a las funciones o subrutinas de otros lenguajes formales, pero con la característica y ventaja de que pueden ser ejecutados y corregidos en forma individual e independiente del programa principal.

El programa desarrollado tiene la capacidad de realizar las siguientes acciones (ver figura 3.1):

- Adquirir los datos provenientes de un detector.
- Graficar los datos de la señal obtenida en tiempo real.
- Calcular y graficar el espectro de frecuencia.
- Graficar el diagrama de fase.
- Almacenar en un archivo de extensión .txt la información de la señal.

- Almacenar las imágenes de las diferentes graficas en un archivo.

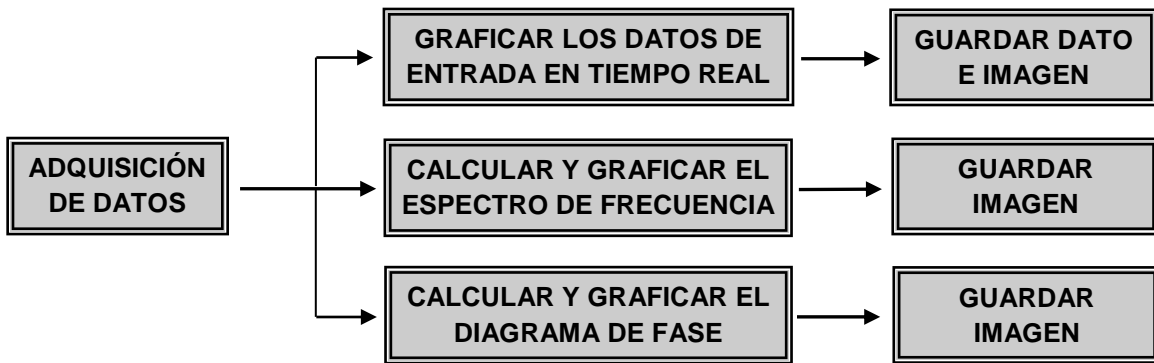


Figura 3.1 Diagrama a bloques del programa realizado.

### 3.2 PROTOTIPO DEL PANEL FRONTAL

Cuando se carga el programa, en la pantalla del monitor se presenta el panel frontal del instrumento tal y como se ilustra en la figura 3.2 donde se logra observar la señal adquirida del láser. El programa se ejecuta desde la barra de herramientas de LabView y espera a que se active una de las tres siguientes opciones de trabajo, haciendo clic con el ratón con su respectivo control booleano.

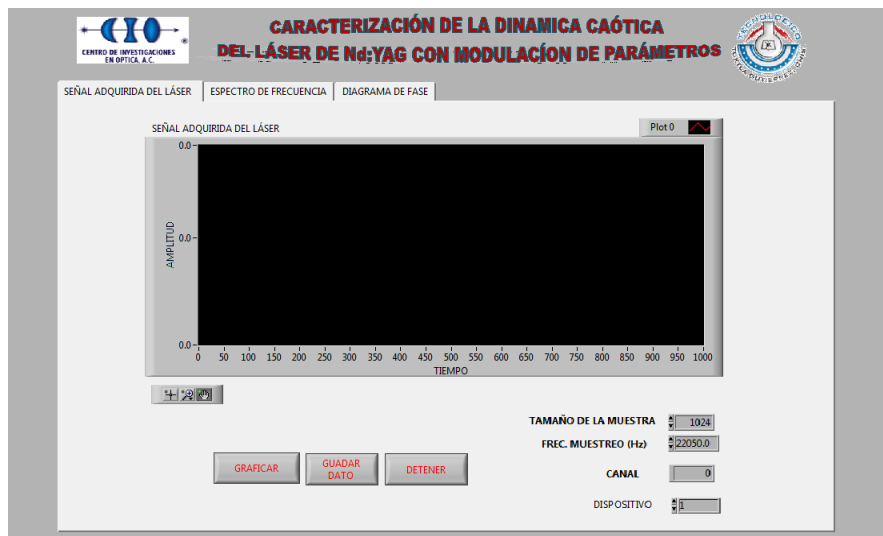


Figura 3.2 PANEL FRONTAL. Grafica de la señal adquirida del láser a través de la DAQ.

Al seleccionar la segunda pestaña se observa la gráfica del espectro como en la figura 3.3.

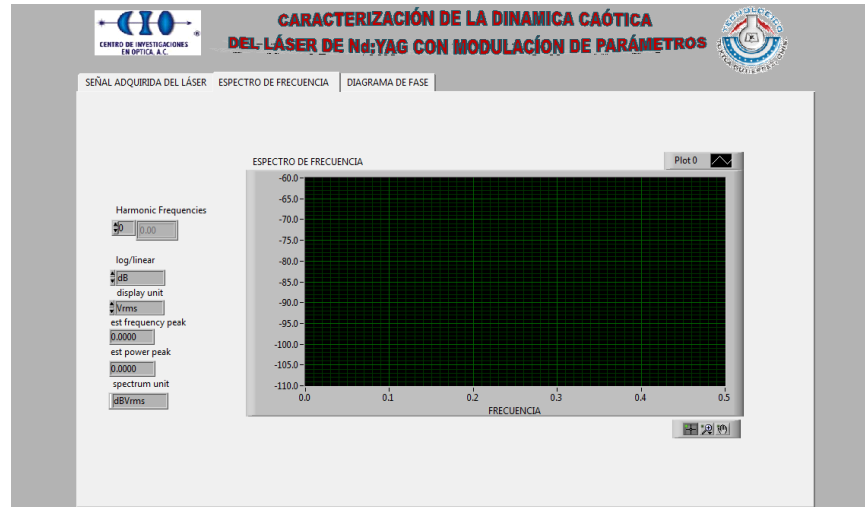


Figura. 3.3 PANEL FRONTAL. Grafica del espectro de frecuencia de la señal.

En la figura 3.4 se visualiza el diagrama de fase de la señal al seleccionar la tercera pestaña.



Figura 3.4 PANEL FRONTAL. Grafica del diagrama de fase de la señal.

## Función de los botones GRAFICAR, GUARDAR DATO Y DETENER



Figura 3.5 Botones del panel frontal

En la figura 3.5 se observa los botones del panel frontal.

- **GRAFICAR.** Al ejecutar el programa de Labview, no empieza a graficar por tanto es necesario presionar el boton “GRAFICAR” para poder visualizar la grafica de los datos que se esta adquiriendo a traves de la DAQ.
- **GUARDAR DATO.** Al seleccionar este botón, automaticamente se visualiza una ventana solicitando el nombre del archivo con el que se desea guardar y la ruta en la cual se va a guardar el archivo txt. Ademas, se guarda la imagen de la grafica observada.
- **DETENER.** Interrumpe la ejecución el programa.

Para la adquisicion de datos se necesitan ingresar los siguientes datos que se observan en la figura 3.6:

TAMAÑO DE LA MUESTRA	▲▼	1024
FREC. MUESTREO (Hz)	▲▼	22050.0
CANAL		0
DISPOSITIVO	▲▼	1

Figura 3.6 Requisitos para la adquisición de datos

- **TAMAÑO DE LA MUESTRA.** Es el número de muestras que se van adquirir, equivale al número de puntos por canal, se utilizó 1000 porque corresponde a la resolución del detector que se utilizó como sensor.
- **FRECUENCIA DE MUESTREO.** Es el número de datos a adquirir por segundo por canal.



- **CANAL.** Es la lista de canales de adquisición que se están utilizando, se especifican en forma individual. Se utilizó el canal 0 y éste fue especificado en una previa configuración.
- **DISPOSITIVO.** Es el número de dispositivo que se asigna durante la configuración, para que pueda ser reconocido por el programa, se utilizó al dispositivo por default.

### 3.3 CÓDIGO DEL PROGRAMA

Todo el programa se encuentra dentro de una sentencia While (1) como en la figura 3.7. Esta sentencia ejecuta repetidamente el diagrama que se encuentra dentro de ella hasta que se cumpla su condición booleana de paro y se utiliza para detener su ejecución.

#### Secuencia case

Esta sentencia ejecuta tres casos diferentes dependiendo del estado en el que se encuentre el control. Los casos son: *señal adquirida del láser*, *espectro de la frecuencia* y *diagrama de fase*.

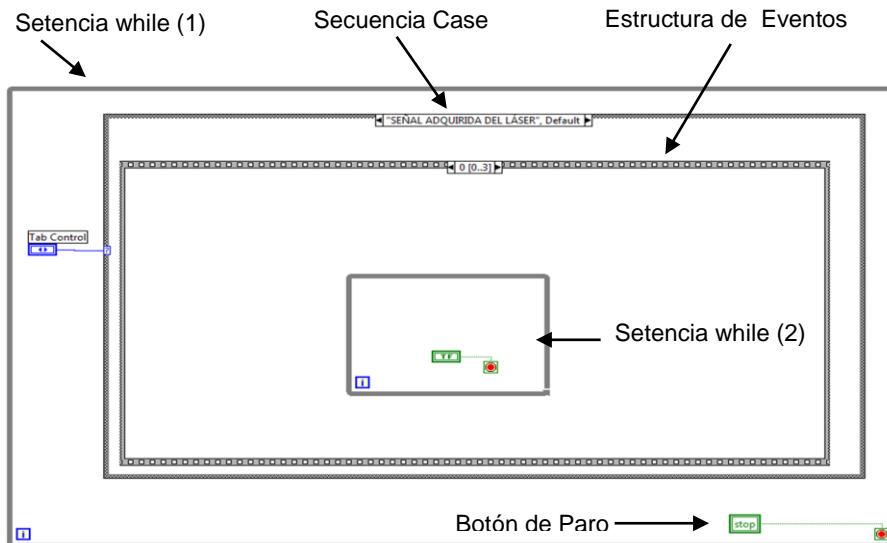


Figura 3.7 Esquema del ciclo principal

➤ **Señal adquirida del láser**

Se presenta el diagrama en LabView cuando se ejecuta la opción de *señal adquirida*. Las diferentes sentencias utilizadas se describen a continuación.

**Estructura de eventos (4 secuencias simples)**

Esta secuencia está formada por secuencias particulares, donde cada una de ellas tiene un modo particular de ejecución a partir de ciertos eventos que pueden ser controlados por medio del teclado o del ratón, o bien, por medio de objetos que se encuentran en el panel frontal. En este caso se tiene tres secuencias cuya ejecución se activa por medio de tres controles colocados en el panel frontal (*graficar, guardar dato, detener*).

**Sentencia 0.** Dentro de esta sentencia se encuentra un ciclo while (2) como en la figura 3.8, esta sentencia se ejecuta hasta que se activa el botón de *GRAFICAR* y permite que se lleve a cabo la secuencia de adquisición de datos (secuencia 1).

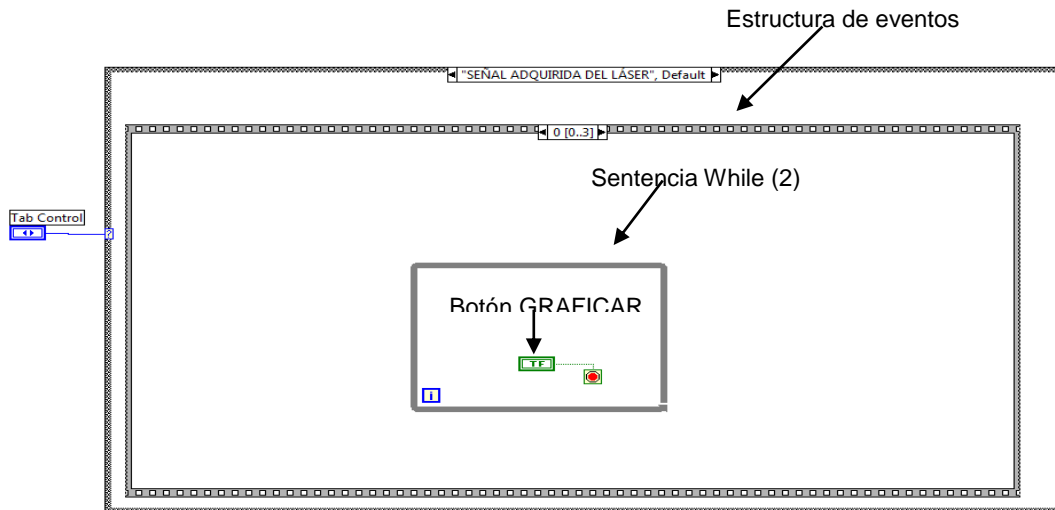


Figura 3.8 Secuencia 0

**Secuencia 1.** La sentencia *while* ejecuta la sección donde se adquiere el número muestras en la frecuencia especificada a través de la DAQ utilizando la función *AI wave scan* y entrega todos los datos adquiridos a una herramienta llamada *index array* que se utiliza para elegir la columna donde se localiza los datos del eje Y, a continuación se utiliza un *bundle* para determinar los parámetros para graficarlos en un *waveform graph* como se ilustra en la figura 3.9. Al

presionar el botón *Guardar* se termina este ciclo y automáticamente se genera un archivo txt donde se guardan los datos adquiridos por medio de la función *write to spreadsheet file*.

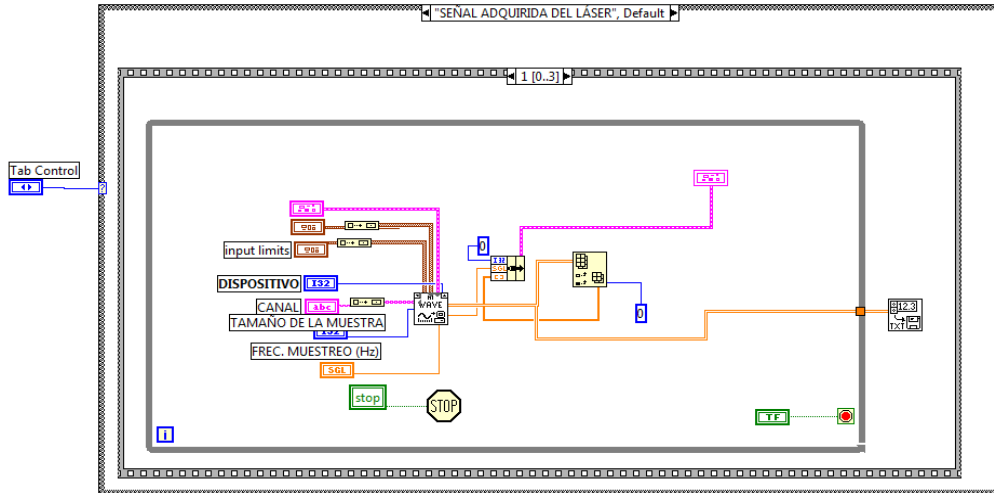


Figura 3.9 Secuencia 1

**Secuencia 2.** Se guarda la imagen de la gráficas generadas utilizando las funciones de *Report Generation: new report* (genera un nuevo reporte), *append control image to report* (crea una imagen de una gráfica y lo añade a un informe) y *append front panel image to report* (Crea una imagen del panel frontal del VI que se especifica y lo añade a un informe), estas funciones se conectaron como en la figura 3.10. Se pasa a la siguiente secuencia (secuencia 3) en la cual se continúa graficando.

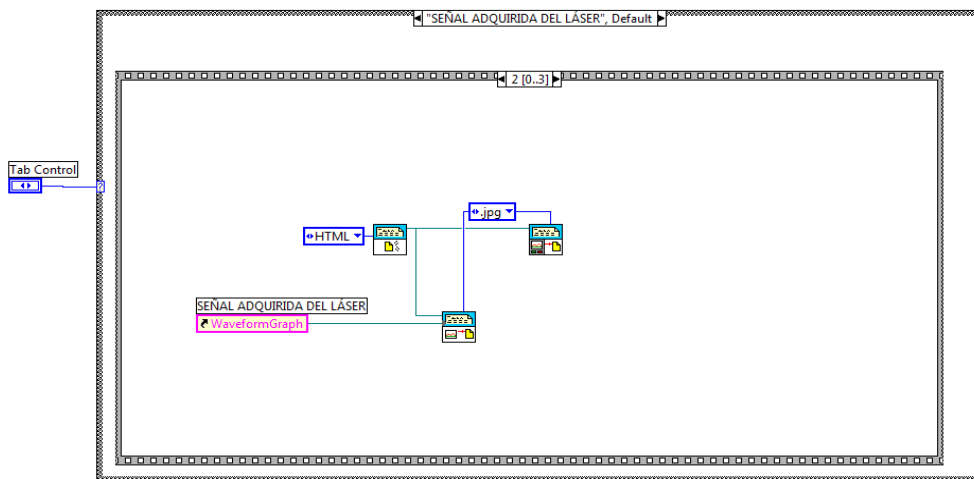


Figura 3.10 Secuencia 2

**Sentencia 3.** Continua graficando hasta que se presione el botón DETENER. Se repite un código parecido a la secuencia 1, ver figura 3.11.

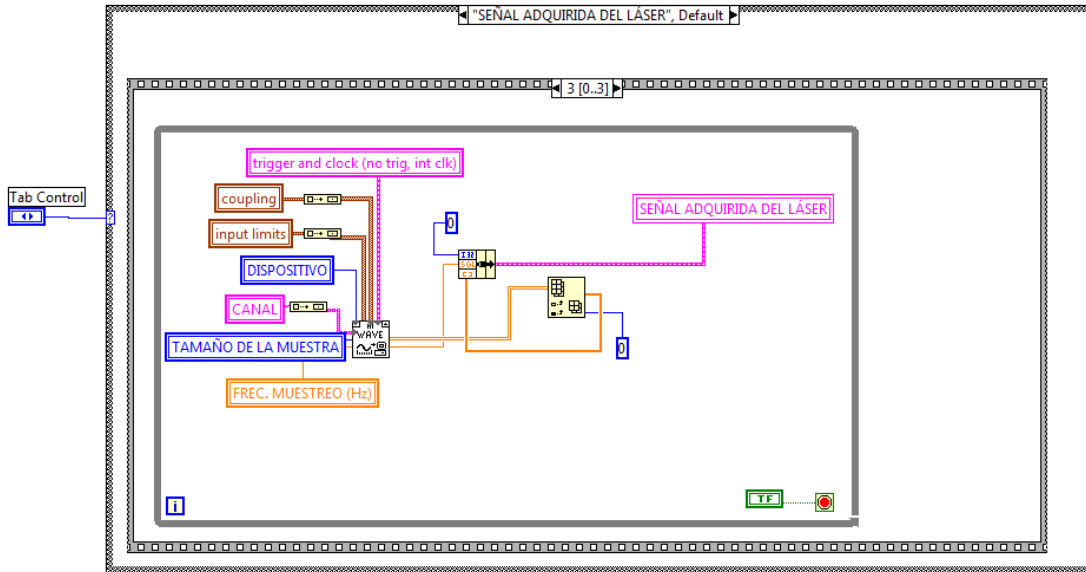


Figura 3.11 Secuencia 3

➤ **Espectro.** El espectro de la señal se calcula mediante el subVI declarado como *Espec* (Ver figura 3.13) para después graficarlo en una *waveform graph* como en la figura 3.12. Los eventos de guardar y detener son idénticas a las utilizadas en la secuencia de “SEÑAL ADQUIRIDA DEL LÁSER”.

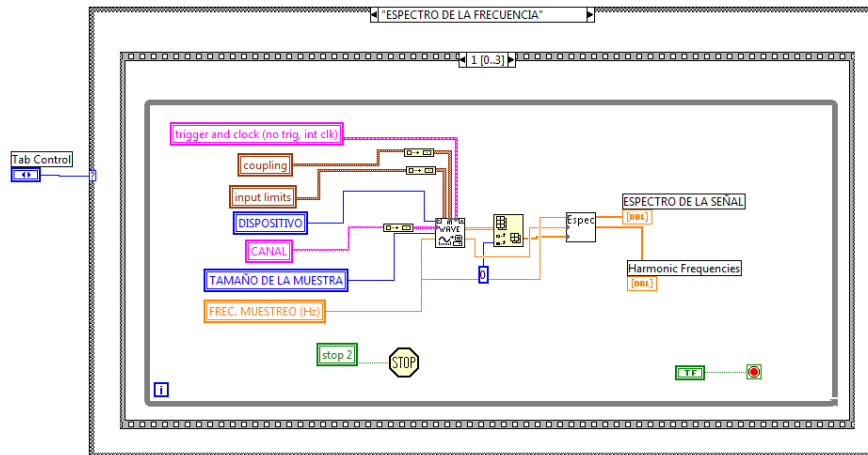


Figura 3.12 Diagrama a bloques para calcular el espectro de frecuencia

**SubVI Espec.** Después de adquirir los datos en un arreglo se determina la instancia polimórfica a utilizar (*scaled time domain window*) y luego se calcula el espectro de potencia (*auto power spectrum*) para graficar el resultado en una *waveform graph*. Para verificar la frecuencia fundamental se utilizó la función *power & frequency estimate* y para conocer la frecuencia armónica la función *harmonic analyzer*.

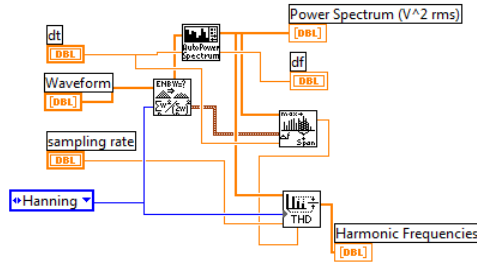


Figura 3.13 SubVI espec

- **Diagrama de fase.** Después de la colección de datos se grafica el diagrama de fase en un *waveform XYGraph*, para la cual se utilizó un *bundle* en donde se especificó que en el eje x corresponde al voltaje muestreado y en el eje Y la derivada de dicho voltaje. Para calcular la derivada se utilizó la función *derivative x(t)*, estos elementos se conectaron como en la figura 3.14. Los eventos de guardar y detener son idénticos a las utilizadas en la secuencia de “SEÑAL ADQUIRIDA DEL LÁSER”.

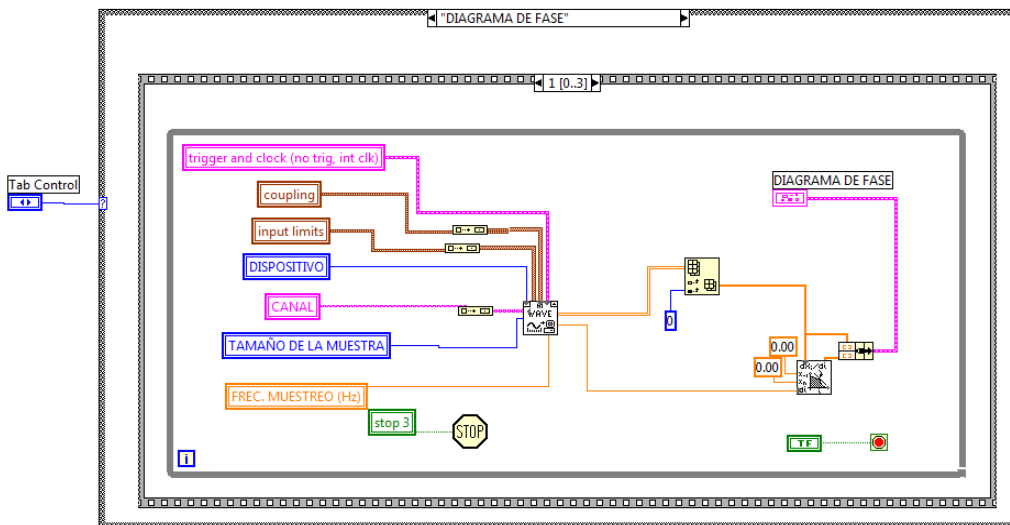


Figura 3.14 Diagrama a bloques del evento DIAGRAMA DE FASE

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGÍA DEL EXPERIMENTO

#### 4.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la figura 4.1 se presenta el esquema de los componentes utilizados para realizar la caracterización de la dinámica caótica del láser Nd:YAG.

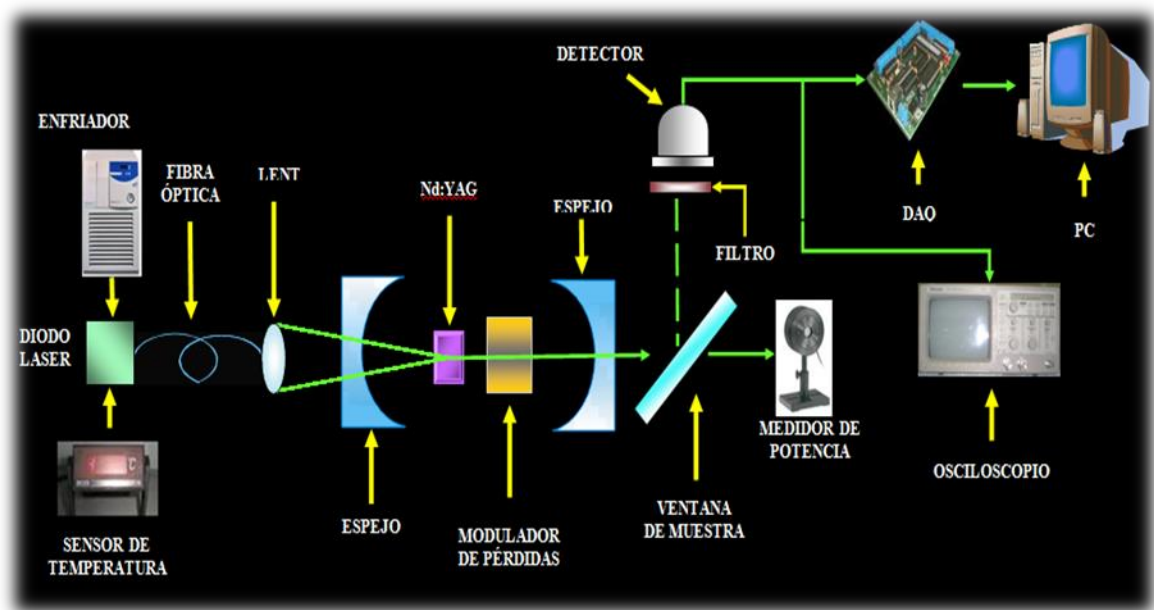


Figura 4.1 Esquema de los componentes del experimento

A continuación se describe el funcionamiento de los dispositivos.

- **Diodo láser** (MODEL LDD1-1T-D, fabricado por ALPHALAS). La primera parte es el bombeo, el cual es realizado por un diodo láser, este proceso consiste en excitar al láser para que se logre una oscilación y se pueda crear el haz de luz láser. El haz de bombeo es invisible para el ojo humano, y sólo puede ser visto utilizando una tarjeta de cerámica fluorescente al infrarrojo o con un visor de infrarrojo, los cuales nos permiten ver el haz de bombeo de forma que podamos ver la trayectoria y comportamiento dentro del experimento.

El diodo láser que se está utilizando, cuenta con su propio driver, con el cual podemos controlar su encendido y su corriente. Hay dos tipos de corriente que podemos controlar con el driver:

- **Límite del Diodo Laser:** la cual es la corriente máxima que puede llegar a tener el diodo láser, ésta se puede aumentar o disminuir dependiendo de las condiciones como se quiera trabajar.
- **Potencia:** es la que determina la potencia del haz de luz láser emitida por el diodo.

Este driver también cuenta con un botón de habilitación del diodo láser, el cual sirve para bloquear o desbloquear el haz de luz láser del diodo, aun cuando haya corriente de potencia.

El diodo láser está conectado a un enfriador a base de agua, el cual regula la temperatura a la cual queremos que trabaje el diodo láser, este enfriador no es más que un termostato que controla la temperatura.

El diodo láser también cuenta con su propio termómetro, el cual nos indica las variaciones de temperatura que tiene el láser durante la experimentación.

- **Colimación y transmisión por fibra óptica.** La colimación consiste en agrupar la luz dispersas en una misma trayectoria, la cual debe ser paralela al eje óptico. En el experimento juega un papel muy importante pues uno de los colimadores tiene la tarea de colimar el haz de luz que es emitido del diodo láser que se propaga en el vacío para que llegue a otro colimador el cual está enfocado a la fibra óptica. A través de la fibra se transmite la luz, aunque una pequeña parte del haz de luz se pierde por el fenómeno de refracción, el resto de haz de luz se transmite hacia otro colimador colocado de forma inversa, el cual en vez de agrupar a las partículas en una sola dirección, las dispersa para que lleguen a los espejos polarizadores.
- **Resonadores (espejos) y elemento de ganancia.** Esta es la parte más importante de nuestro experimento pues estos dos elementos, como ya se ha mencionado antes, son los elementos que constituyen a nuestro laser. En el

experimento, al incidir el haz del bombeo en uno de los cristales del resonador, este choca contra el elemento de ganancia (Nd:YAG), provocando la llamada inversión de población, el haz cruza y choca contra el otro espejo del resonador y este lo refleja provocando que el haz rebote de un lado a otro dentro del resonador provocando la excitación del elemento de ganancia y produciendo a su vez la amplificación por emisión estimulada.

- **Modulador de pérdidas.** Normalmente durante la emisión de un láser se tiene un porcentaje constante de pérdidas en las cavidades de dicho láser. Con el fin de hacer variar esas pérdidas con respecto al tiempo se hace operar al laser en modo Q-Switch. Por medio de un dispositivo acusto-óptico. que está regulado por un generador de señales y un sintetizador de frecuencias, se puede realizar una variación en la frecuencia de modulación de pérdidas. De esta manera se pretende disminuir dichas pérdidas y observar con que magnitud de frecuencia el sistema muestra pulsos regulares o presenta caos.

Los dispositivos que ayudaron la modulación de pérdidas son:

- Q-switch acusto-óptico (ACOUSTO-OPTIC MODE LOCKER MODEL ML-50B, fabricado por IntraAction Corp).
- Sintetizador de frecuencia (Frequency synthesizer model MLE-6A fabricado por IntraAction Corp).

El sintetizador de la frecuencia (ver figura 4.3) proporciona la energía del RF, es decir es el driver del dispositivo acusto-óptico. Consiste en un cristal que controla el sintetizador de frecuencia, un multivibrador monoestable, un modulador equilibrado, y un embalado de banda ancha del amplificador de energía del RF en un gabinete con la fuente de alimentación. El sintetizador puede ser usado para proveer una salida de RF continua o pulsada.



Figura 4.3 Sintetizador de frecuencia



- **Ventana de muestra.** Es un cristal que se utilizó para tomar una muestra del haz del laser reflejándola hacia el detector. Dicha reflexión es del 4% de la luz láser, esto es para evitar que se dañe el detector de fluorescencia debido a la potencia que presenta dicho láser.
- **Filtro.** Este filtro elimina todas las señales que corresponden a la frecuencia de la luz ambiente.
- **Detector** (MODELO EK-DPS, fabricado por MONOCHROME). Convierte la señal óptica en una señal eléctrica. Detecta la señal del haz del laser para poder analizarla en una PC.
- **Mesa holográfica** (MODEL RS100, fabricado por NEWPORT). Los montajes ópticos se realizaron sobre una mesa especialmente dispuesta para ello que debe poseer aislamiento antivibratorio y alto amortiguamiento. Se puede observar en la figura 4.4.



Figura 4.4 Mesa Holográfica

- **Osciloscopio** (MODELO TDS 360, fabricado por TEKTRONIX), se ilustra en la figura 4.5. En este dispositivo se puede visualizar la señal del láser. Ayuda a poder monitorear la señal deseada dependiendo la frecuencia aplicada.



Figura 4.5 Osciloscopio

- **PC, DAQ Y software LABVIEW.** La tarjeta se utiliza para la adquisición de datos la cual se encuentra instalada dentro de una PC. Labview es un software

que ayuda a visualizar los datos adquiridos por la DAQ y poder manipularlos para calcular el espectro de frecuencia y el diagrama de fase.

## 4.2 PRUEBAS

El voltaje de salida del transductor utilizado en este caso el detector (DET210 - HIGH-SPEED SILICON DETECTOR fabricado por THORLABS), son señales muy pequeñas. Además de los bajos niveles es necesario transmitir la salida del transductor a cierta distancia hacia el equipo de colección de datos. El ruido eléctrico puede causar serias dificultades en circuitos de bajo nivel. Estos ruidos pueden ser radiados, como un campo electromagnético, o inducidos en el cableado de la planta, como circuitos a tierra o picos producidos por la fuente de alimentación de CA. A pesar de las fuentes de ruido, las señales de bajo nivel se deben transmitir de un lugar a otro. Un método efectivo para combatir el ruido es incrementar la intensidad de las señales de bajo nivel antes de su transmisión a través de los alambres. Esto se realiza frecuentemente con un amplificador llamado amplificador de instrumentación.

Al realizar las pruebas pertinentes para corroborar el buen funcionamiento de la adquisición de datos se observó que el detector utilizado en primera instancia tenía una salida de 20mV a 50mV de amplitud. Por tanto en la captura de datos, se presentaba el efecto de aliasing que es el efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se les muestrea digitalmente. En este caso en la señal muestreada se superpone una pequeña señal de ruido generado por circuitos o fuentes de alimentación.

Para eliminar dicho ruido, se ensayaron varias técnicas de acondicionamiento de la señal pero a pesar de ella dicho ruido permanecía. Se implementó un filtro rechazabanda de 60Hz para eliminar el ruido eléctrico, un amplificador de instrumentación para amplificar la señal, así como blindar los alambres de conexión contra la captación de señales externas.

A última instancia, se optó por cambiar el detector por otro detector (MODELO EK-DPS, fabricado por MONOCHROME) que en su estructura interna amplifica la señal del transductor así como elimina las frecuencias de la luz ambiente. De esta manera se logró capturar la señal eliminando las diferentes señales de ruido por lo tanto se obtuvo una amplitud de 200mV.

En la figura 4.6 se observa una señal obtenida y en la figura 4.7 la señal con el detector EK-DPS, ambas corresponden a una frecuencia de modulación de 10 KHz. Se observa que la señal de entrada en la figura 4.6 obtenida con el detector DET210 tiene una pequeña amplitud y por tanto corresponde a una señal de ruido. En la figura 4.7 se aprecia la señal adquirida del detector EK-DPS tiene una mayor amplificación y como resultado de esto podemos observar en mejor calidad la señal con una amplitud de 200mV.

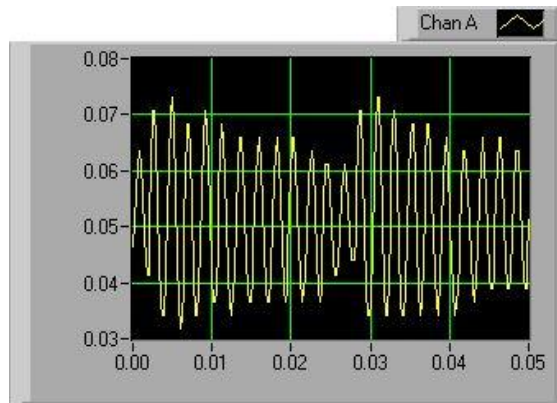


Figura 4.6 Señal obtenida con el detector DET210

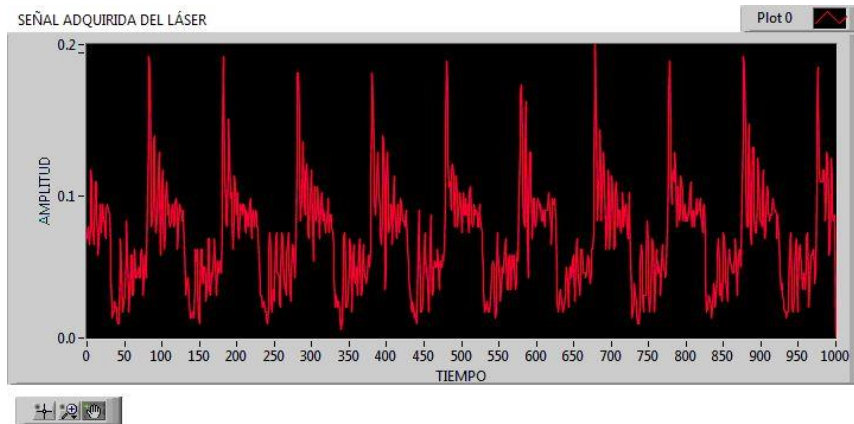


Figura 4.7 Señal obtenida con el detector EK-DPS

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

#### 5.1 PORCENTAJE DE MODULACIÓN

Para la obtención del porcentaje de modulación se configuró el sintetizador de frecuencia a 57KHz y generar pulso continuo (cw), se fue variando el carrier level del 1 al 10 de dicho sintetizador. El bombeo del láser se trabajó con una corriente de 3.36A.

Se obtuvieron las gráficas de la potencia que corresponde a la figura 5.1 y el porcentaje de modulación del láser en la figura 5.2. Estas gráficas ayudan para localizar en qué punto el láser de Nd:YAG tiene mayor potencia de modulación.

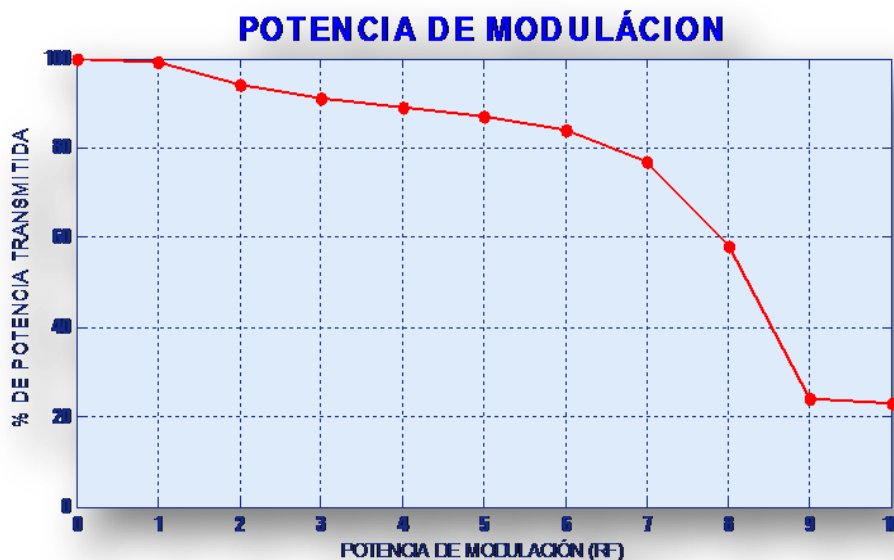


Figura 5.1 Potencia de modulación

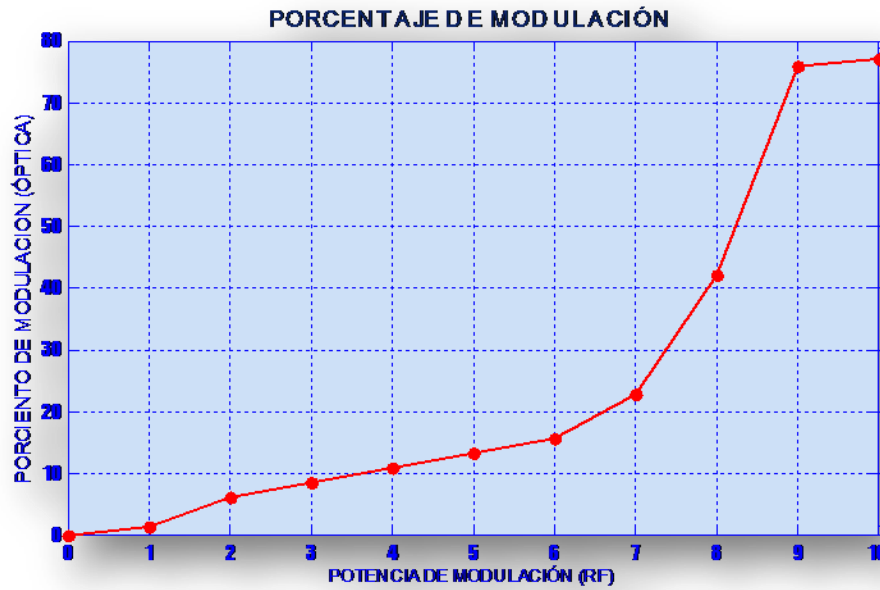


Figura 5.2 Porcentaje de modulación

Para la caracterización de la dinámica caótica del láser de Nd:YAG se modularon los siguientes parámetros:

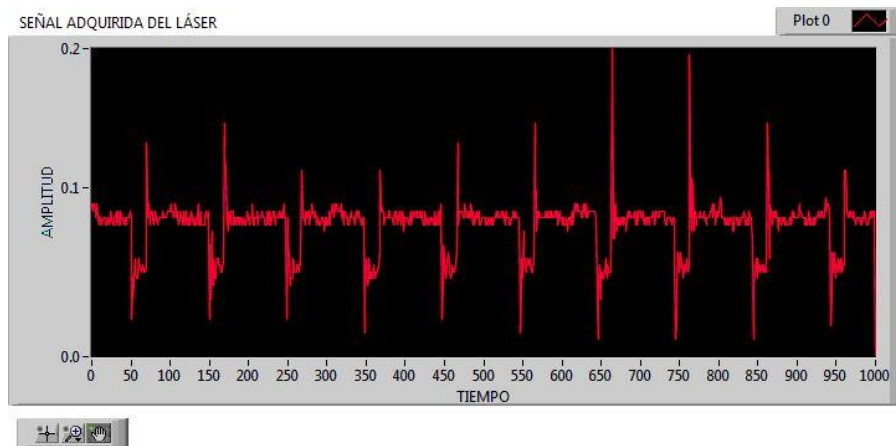
- a) Variando la frecuencia de modulación de pérdidas en el resonador del láser de 1KHz a 19KHz.
- b) Variando la potencia del láser de 2A a 6A.

## 5.2 GRÁFICAS VARIANDO LA FRECUENCIA DE MODULACIÓN DE PÉRDIDAS EN EL RESONADOR DEL LÁSER

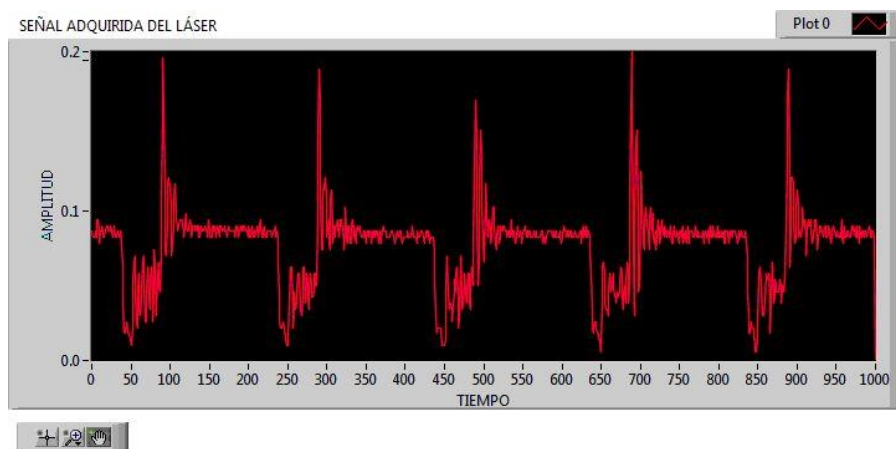
El procedimiento para la obtención de los resultados de la variación de frecuencias de modulación de pérdidas desde 1KHz hasta 19KHz, se hizo a bajas frecuencias debido a que el láser con el que se cuenta en el laboratorio ya no oscila cuando se tiene frecuencias muy altas.

Nota: en las gráficas de la señal adquirida del láser el tiempo se encuentra en las unidades de milisegundos y las gráficas de la frecuencia se encuentra en las unidades de KHz.

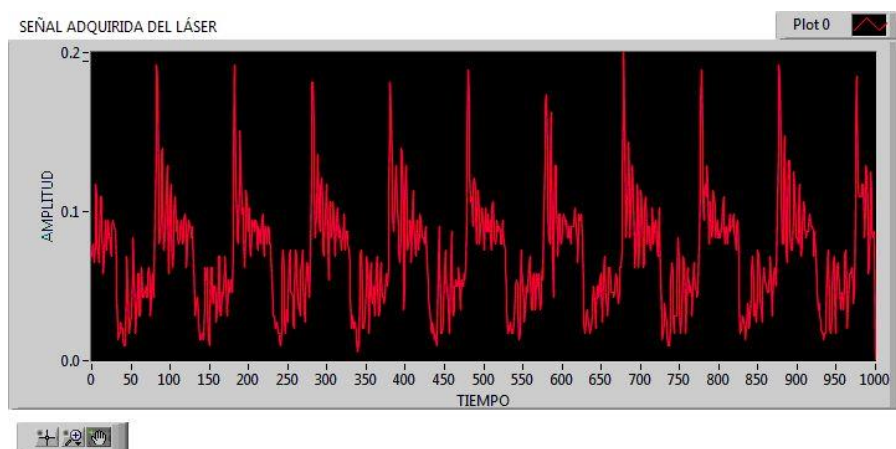
a) Señal de entrada



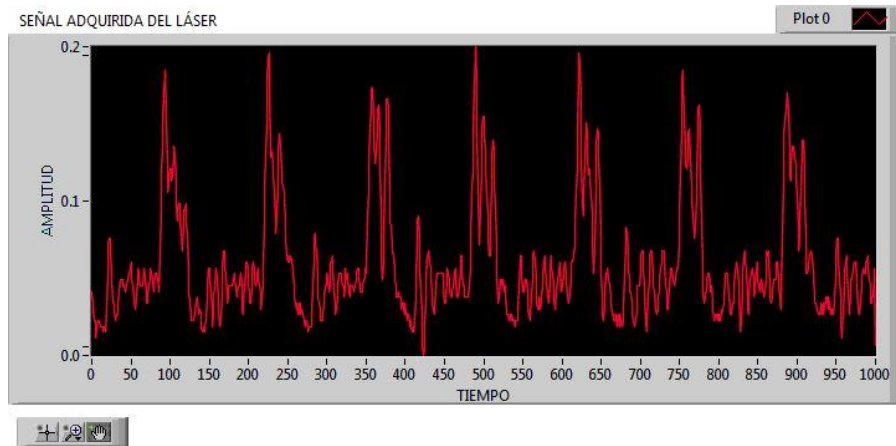
a)



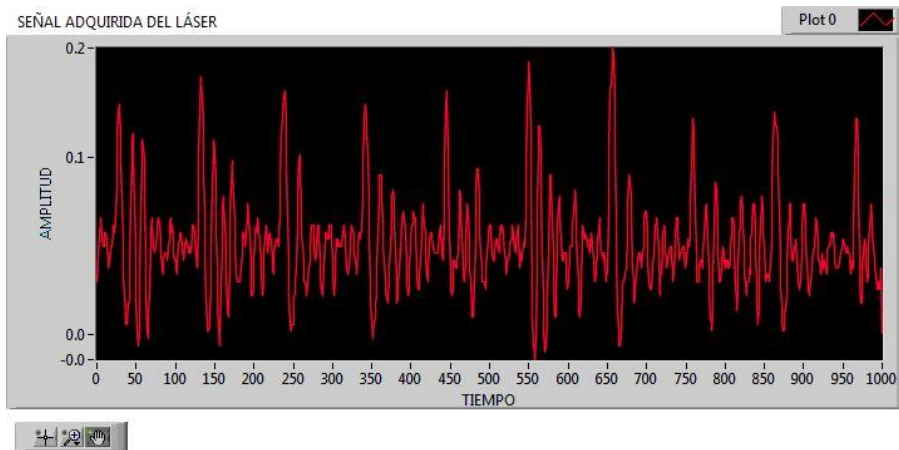
b)



c)



d)



e)

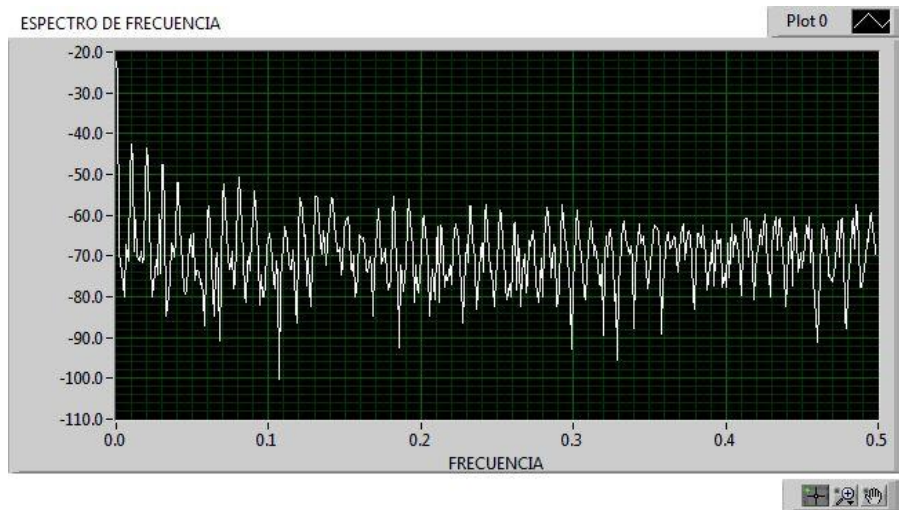
Figura 5.3 Frecuencia De Modulación de a).- 1KHz, b).- 5KHz, c).-10KHz, d).-15KHz y e).-19KHz

En la figura 5.3 a) se observa que los picos son definidos, en b) la señal de entrada empiezan a aparecer pequeños pulsos entre cada pico, en c) se observa que con mayor frecuencia la señal empieza a tomar una dinámica más caótica, el número de pulsos entre cada pico son mayores, en d) la señal adquirida del láser se moduló a una frecuencia de 15KHz y se presenta más pulsos frecuentes y no existe periodicidad entra cada uno de ellos y en e) se observa que a una frecuencia de modulación muy grande existen pulsos irregulares y no tienen

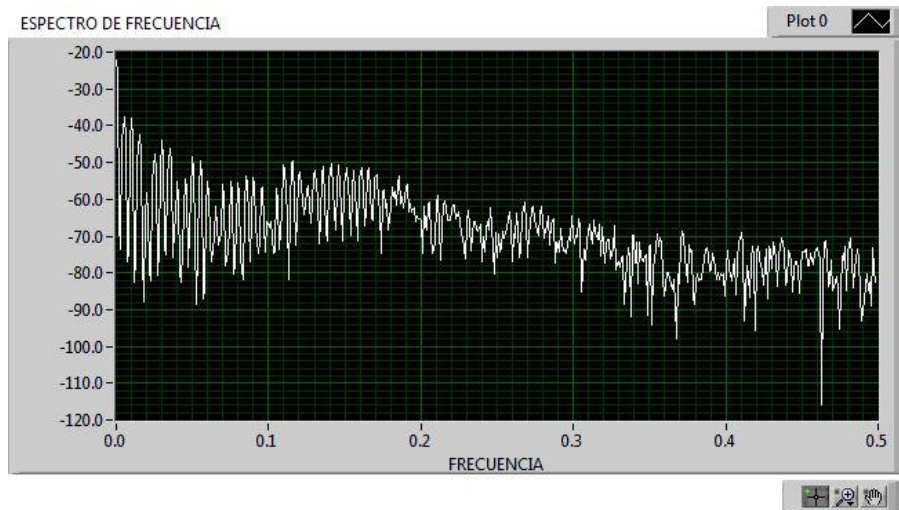
periodicidad. Por tanto se dice que la dinámica del láser de Nd:YAG con esta frecuencia ya presenta caos.

### b) Espectro de la señal

En la figura 5.8, el espectro de la señal de entrada presenta una forma regular.

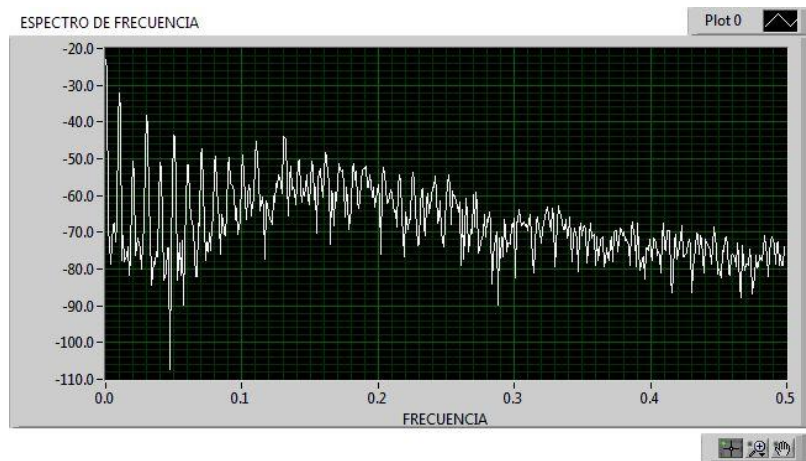


a)

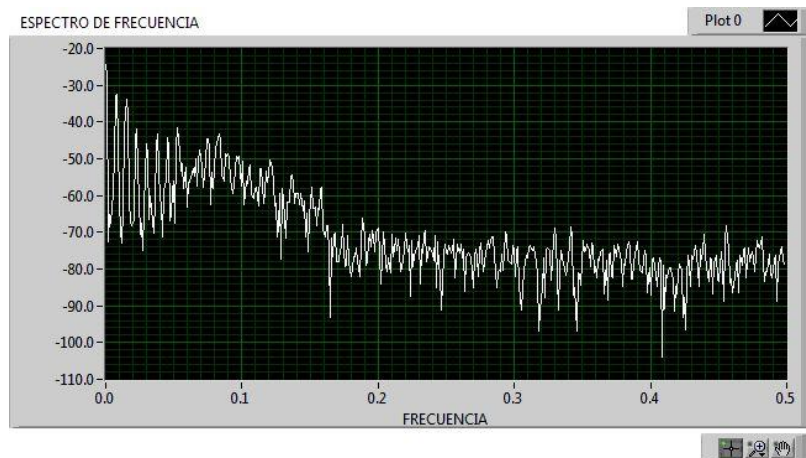


b)

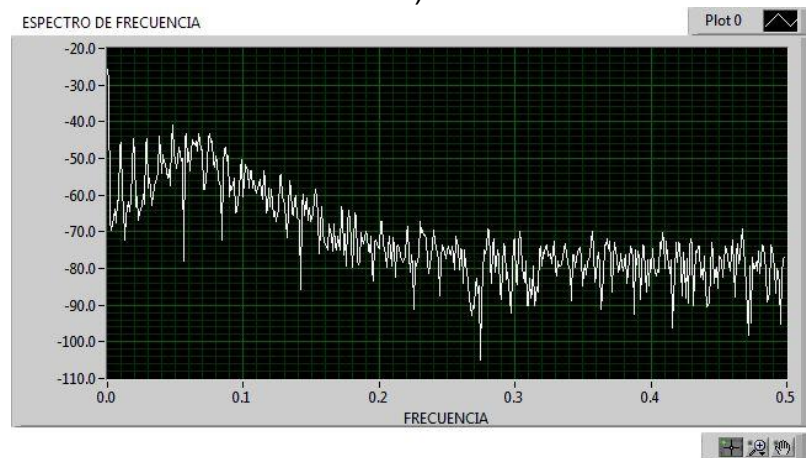




c)



d)

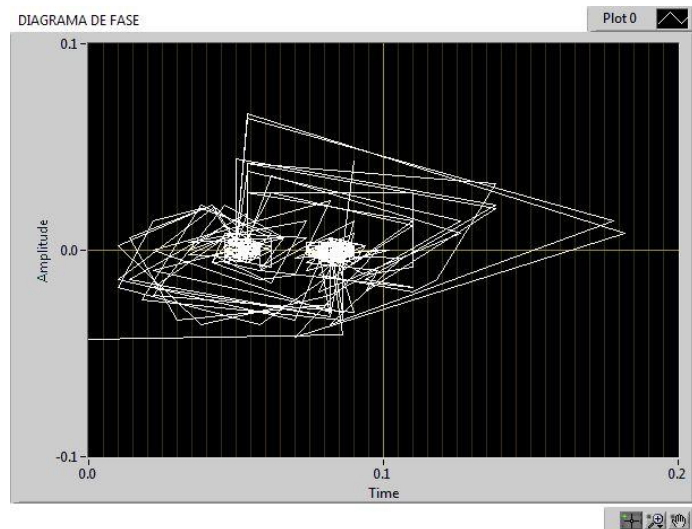


e)

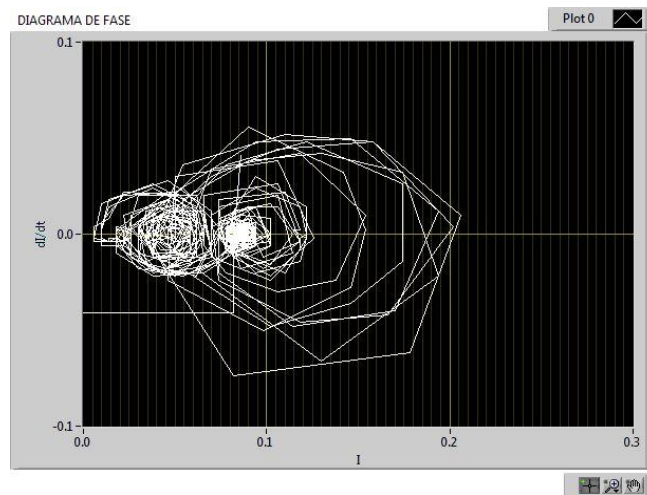
Figura 5.4 Espectro de Frecuencia De Modulación de a).- 1KHz, b).- 5KHz, c).-10KHz, d).-15KHz y e).-19KHz

En la figura 5.4 a) la señal no presenta caos. b) en el inicio del espectro de la señal de entrada es regular. c) Conforme se va aumentando la frecuencia de modulación se observa que el espectro de la señal toma una forma de diferente a la figura anterior y al finalizar la señal se aprecia irregularidad. d) presenta casi, en toda la señal de entrada, un comportamiento caótico debido a que no existe regularidad en el espectro., e) A mayor frecuencia de modulación, en este caso de 19 KHz, se observa que definitivamente la señal tiene una dinámica caótica ya que una característica de un espectro con caos presenta una forma de campana.

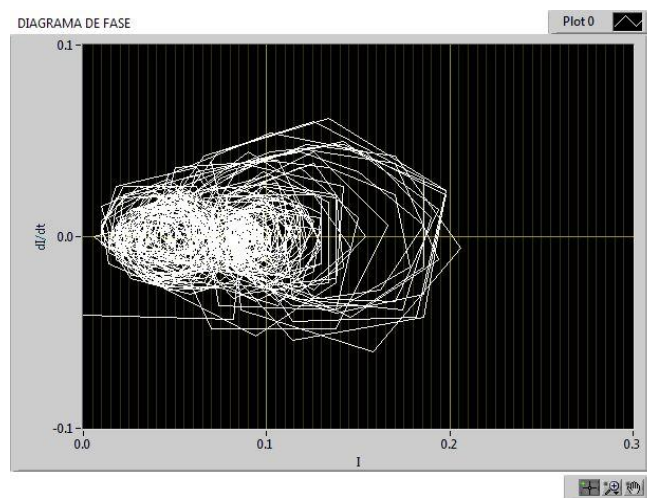
c) **Diagrama de fase**



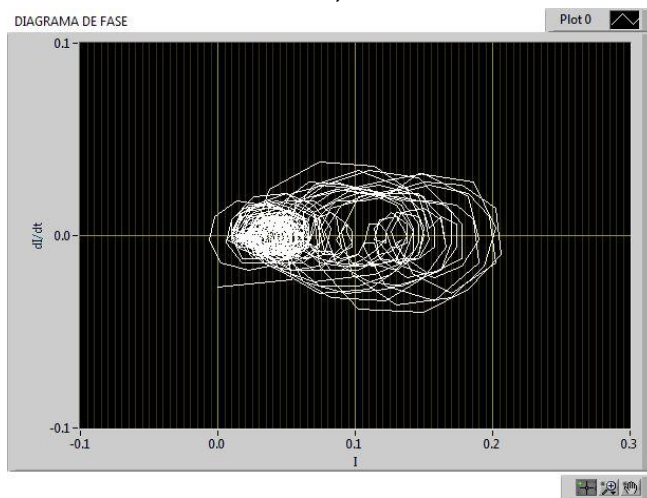
a)



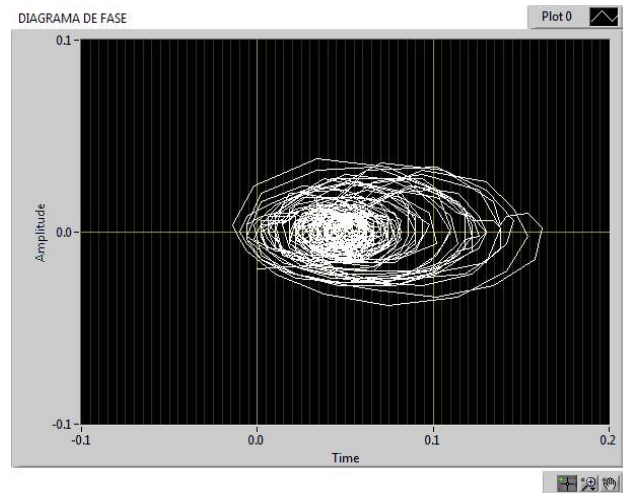
b)



c)



d)



e)

Figura 5.4 Diagrama de fase con Frecuencia De Modulación de a).- 1KHz, b).- 5KHz, c).-10KHz, d).-15KHz y e).-19KHz

En la figura 5.5 el diagrama de fase a) las trayectorias no se observan que se encuentran bien definidas. b) se empieza a presentar una mayor precisión en las trayectorias. c) Duplicando la frecuencia de modulación a 10 KHz, se observa que los óvalos son más concisos y se va unificando en un solo punto. d) Como en la señal de entrada de 15KHz se presenta mayor pulsos en el diagrama de fase se puede observar que las trayectorias se encuentran oscilando casi en una misma región. e) Por último, realizando el experimento a la máxima frecuencia de modulación las trayectorias se mueven en una cierta región y conforme aumenta la frecuencia se van unificando. Por tanto, dicha señal presenta caos.

Después de analizar las graficas obtenidas, se puede concluir que a frecuencias bajas no se observa una dinámica caótica debido a que en su espectro de potencia se observan pulsos regulares así como en su diagrama de fase donde se ve que no existe uniformidad en sus trayectorias. Cuando se alcanza una frecuencia de modulación de 5 KHz a 19KHz, es posible darse cuenta que ya no es tan uniforme los pulsos en su gráfica de espectro y en su diagrama

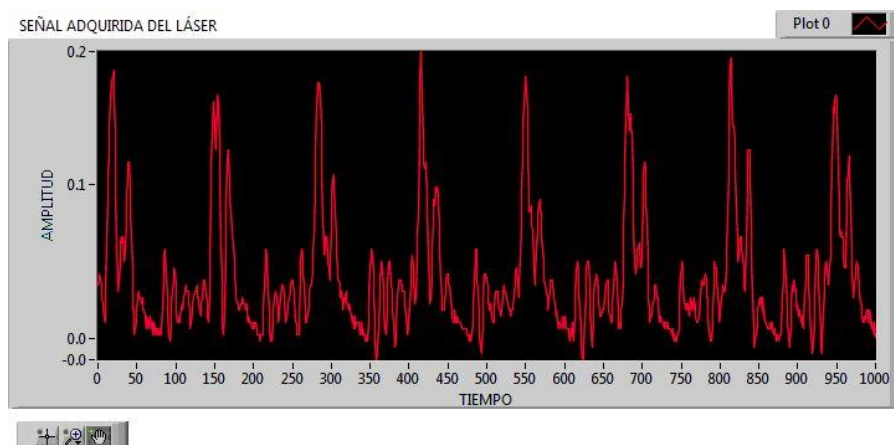
de fase se van haciendo más densas las trayectorias. A pesar de que el láser con el que se trabajó no soporta a frecuencias muy altas, se analizó que a 19KHz de frecuencia de modulación ya se presenta caos. Se realizaron mediciones variando la frecuencia de modulación de 1KHz, dichas gráficas obtenidas se presentan en el anexo A.

### 5.3 GRÁFICAS VARIANDO LA POTENCIA DE BOMBEO DEL LÁSER

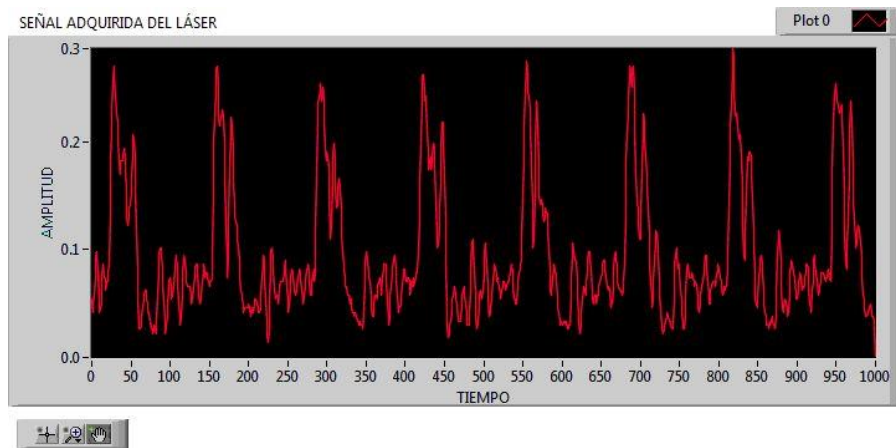
En seguida se presentan las gráficas que se obtuvieron después de haber hecho una variación en la potencia del láser desde 2A que es el punto en donde el láser empieza a oscilar hasta 6A que es el máximo amperaje que proporciona el driver del láser.

Nota: en las gráficas de la señal adquirida del láser el tiempo se encuentra en las unidades de milisegundos y las gráficas de la frecuencia se encuentra en las unidades de KHz.

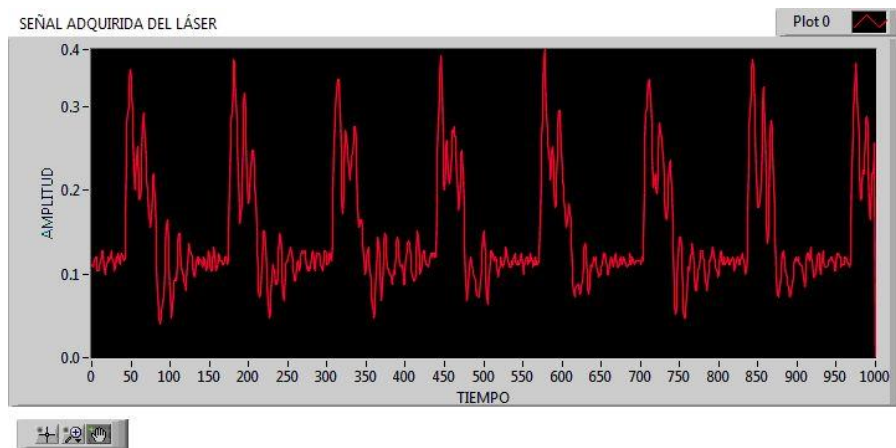
#### a) Señal adquirida del láser



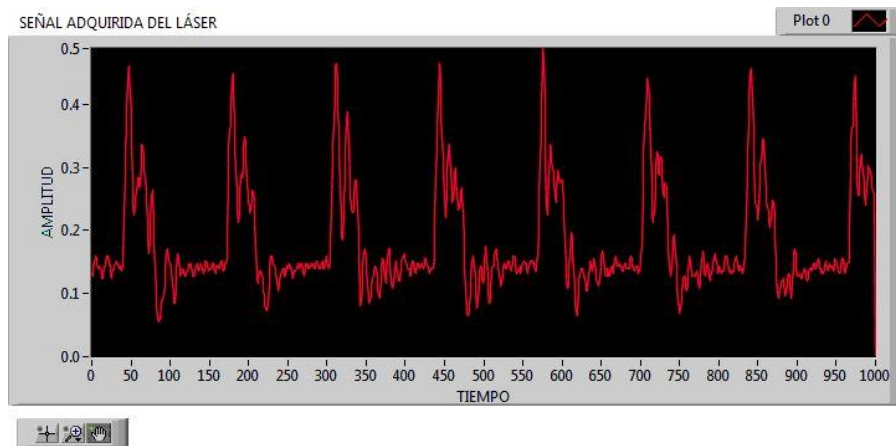
a)



b)



c)

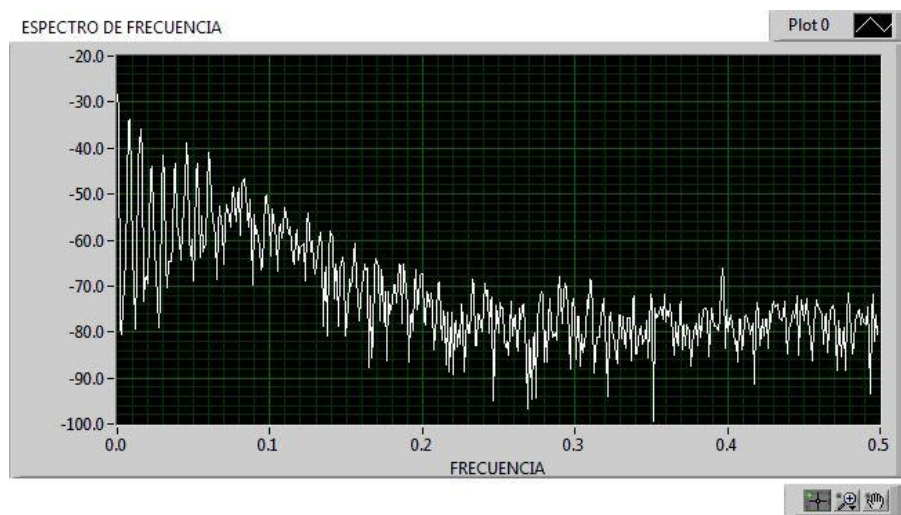


d)

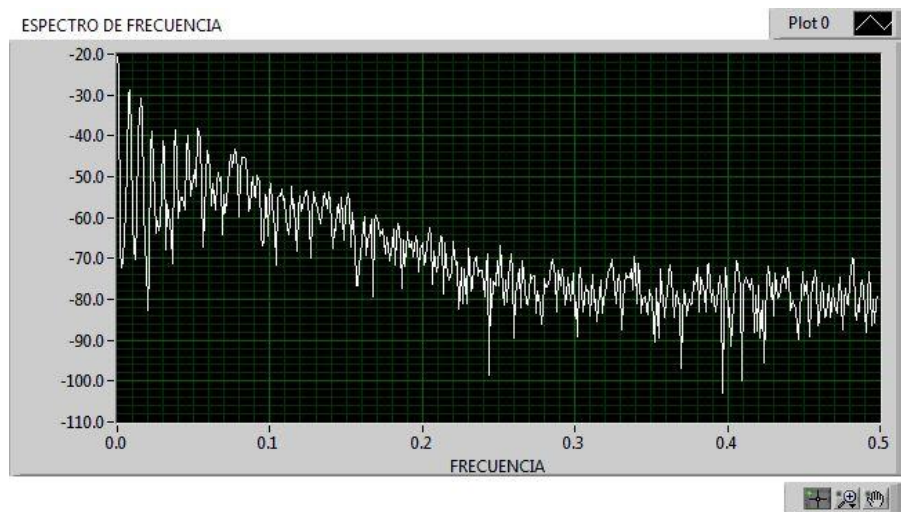
Figura 5.6 Potencia de bombeo del láser de a).- 3A, b).-4A,c).-5A,d).-6A.

En la señal de entrada de la figura 5.6: a) se observan picos muy regulares, esto indica que no existe caos. b) se observan que empiezan a aparecer entre cada pico existe una serie de pequeños pulsos. c) A una potencia de 5A no se observa gran diferencia con la de 4A y tampoco existe caos. d) se aprecia que es más frecuente los pulsos entre cada pico. Se observa inicios de caos.

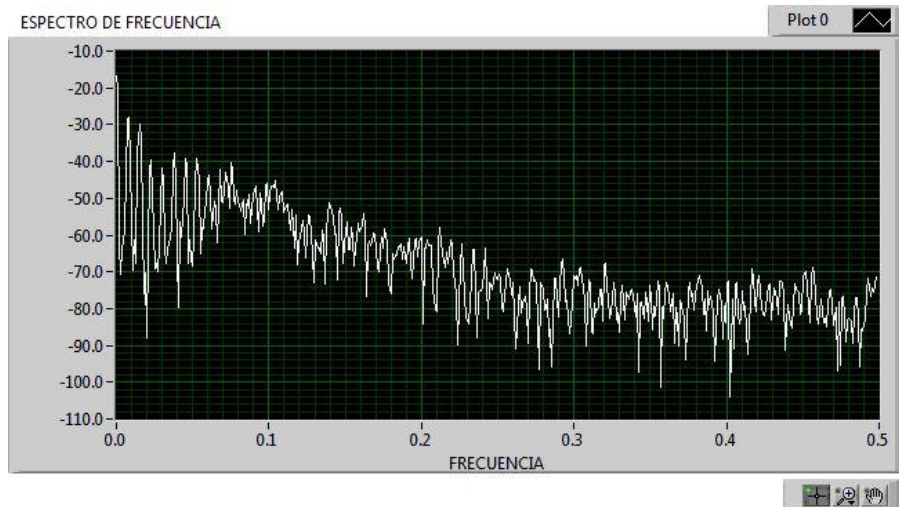
### b) Espectro de la señal



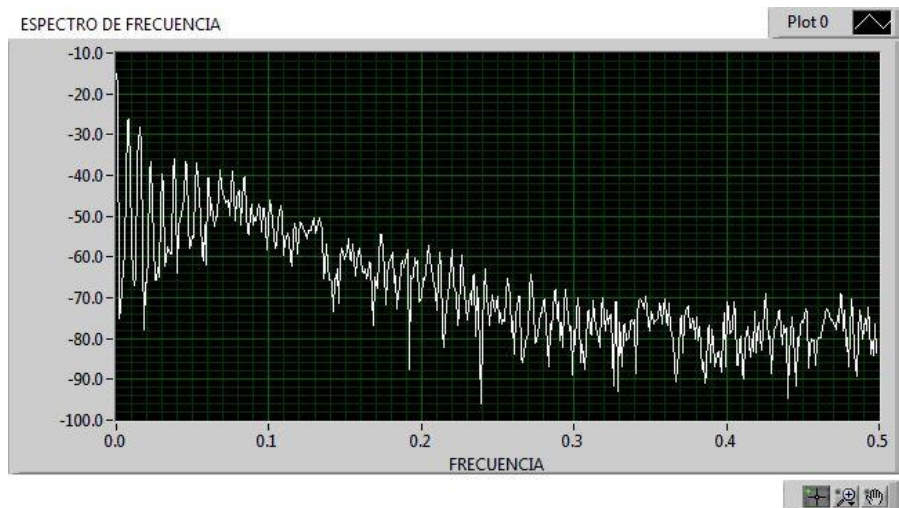
a)



b)



c)



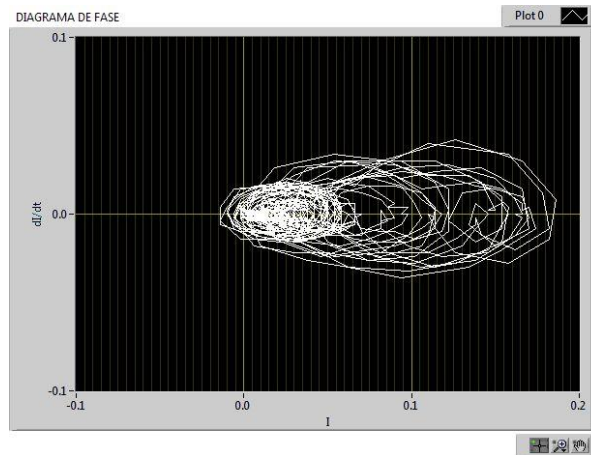
d)

Figura 5.7 Potencia de bombeo del láser de a).- 3A, b).-4A,c).-5A,d).-6A.

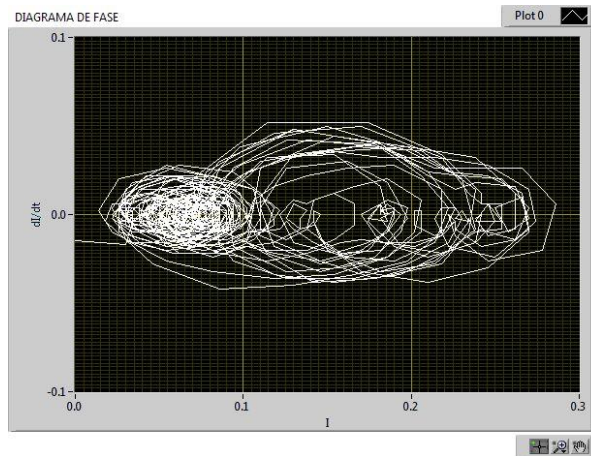
En el espectro de la figura 5.7: a) al principio muestra regularidad en la señal. b) No existe mucha diferencia cuando la potencia de bombeo del láser se aumenta a 4A. Tiene el mismo comportamiento. c) Por cada pico en la señal de entrada se observa que al finalizar dicha señal tiene un comportamiento no muy regular. d) El espectro que corresponde a una potencia de 6A, que es la máxima, tiene una dinámica un tanto caótica.



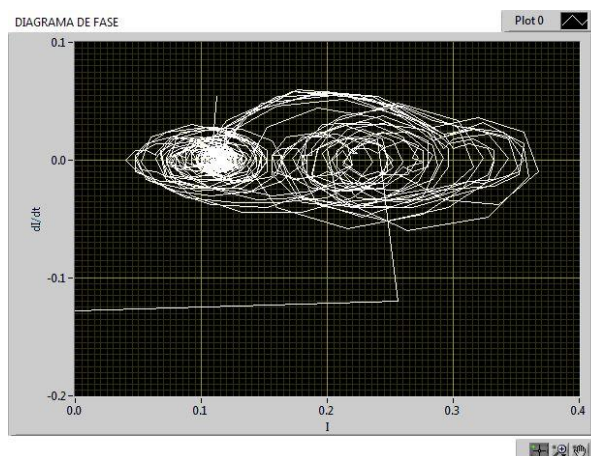
c) Diagrama de fase



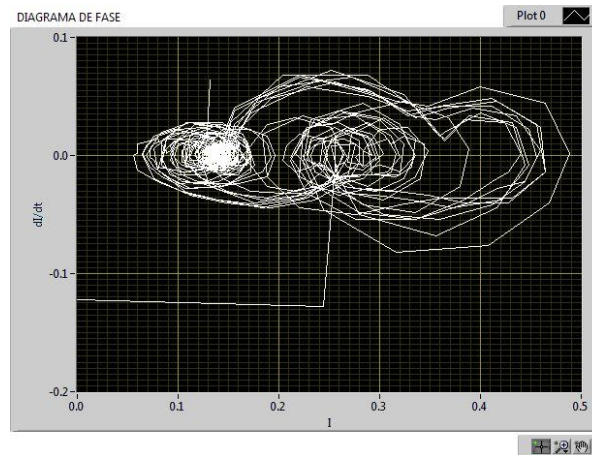
a)



b)



c)



d)

Figura 5.8 Potencia de bombeo del láser de a).- 3A, b).-4A,c).-5A,d).-6A.

En el diagrama de fase de la figura 5.28: a) Se aprecia que por cada cadena de pulsos que existe en la señal de entrada se tiene un conjunto de trayectorias. b) Al igual que en el espectro de esta señal, se observa que es muy parecida al diagrama de fase obtenido con una potencia de 3A. c) Se aprecia que cada trayectoria se va unificando en un mismo punto. d) Con la máxima potencia que es la de 6A en el diagrama de fase se observa que por cada conjunto de pulsos en cada pico que existe en la señal de entrada se tiene un conjunto de trayectorias mucho más densas.

Se analizaron las gráficas y observó que en cuanto se va incrementando la potencia en el láser se va dando cuenta de que se van generando más estados en la gráfica de la señal adquirida del láser y por consecuencia en su diagrama de fase se generan muchas más trayectorias y poco a poco se van haciendo más densas en un solo punto. De igual manera en las gráficas del espectro, en donde los pulsos generados donde la potencia del láser es de 4.25, demuestran que los pulsos son irregulares. En el anexo B se presentan más gráficas obtenidas para un mayor entendimiento.

## CONCLUSIÓN

---

En general el trabajo se llevó a cabo en forma satisfactoria cumpliendo las metas e establecidas en su inicio y el objetivo plantando se alcanzo plenamente, esto es:

Desarrollar un sistema de adquisición de datos para caracterizar la dinámica caótica del láser de Nd:YAG con modulación de parámetros por medio de una PC y un programa escrito en el lenguaje gráfico G de LabView.

Se obtuvo un programa para la caracterización del láser de muy fácil interacción con el usuario. El programa se encuentra trabajando adecuadamente en el laboratorio de láseres. Dicho programa proporciona resultados más exactos y confiables al obtener resultados completos de fácil interpretación.

Para la caracterización de la dinámica del láser de Nd:YAG se realizaron la modulación de dos parámetros. Un primer parámetro fue variar la frecuencia de modulación desde 1KHz hasta 19 KHz en donde se pudo observar que a mayores frecuencias de modulación el sistema presenta características de caos. Otro parámetro analizado fue variando la potencia del láser desde 2A hasta 6A, que conforme se fue aumentando la potencia se observó que tanto en el espectro de potencia como en el diagrama de fase, el comportamiento de la dinámica del láser resulta ser un tanto caótico.

## ANEXOS

### ANEXO A

#### GRÁFICAS VARIANDO LA FRECUENCIA DE MODULACIÓN DE PÉRDIDAS EN EL RESONADOR DEL LÁSER

a) Señal adquirida del láser

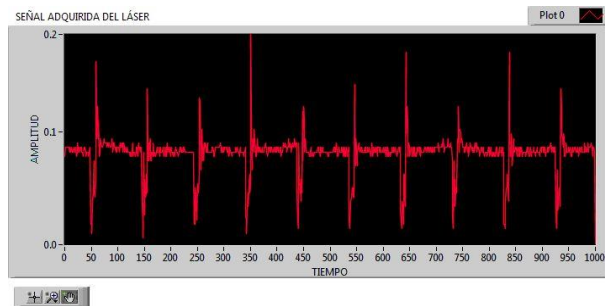


Figura A1 Frecuencia De Modulación de 2KHz

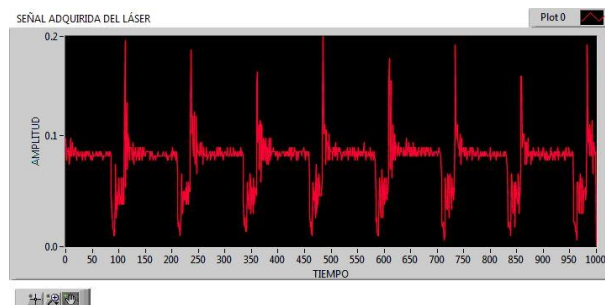


Figura A2 Frecuencia De Modulación de 3KHz

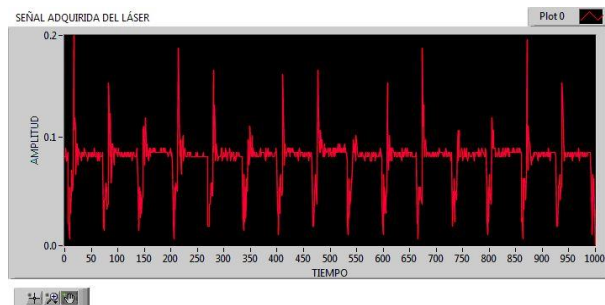


Figura A3 Frecuencia De Modulación de 4KHz

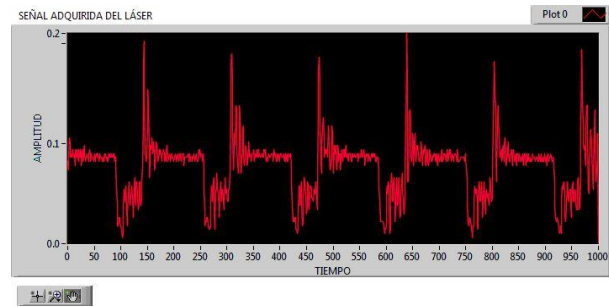


Figura A4 Frecuencia De Modulación de 6KHz

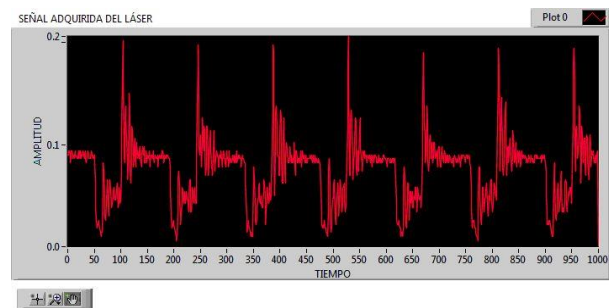


Figura A5 Frecuencia De Modulación de 7KHz

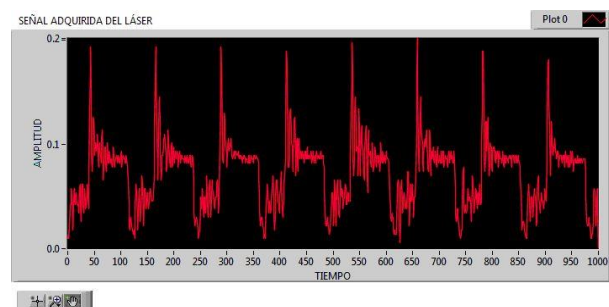


Figura A6 Frecuencia De Modulación de 8KHz

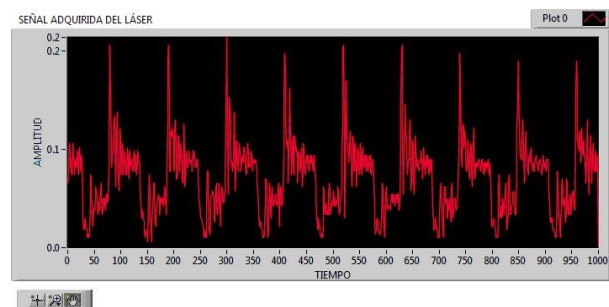


Figura A7 Frecuencia De Modulación de 9KHz

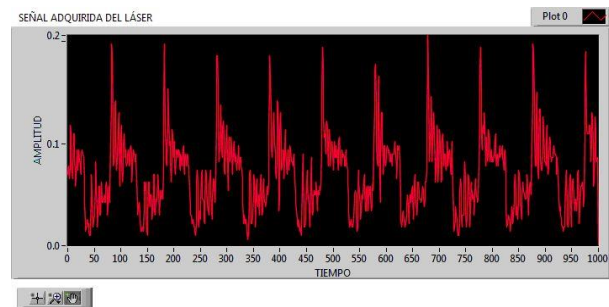


Figura A8 Frecuencia De Modulación de 11KHz

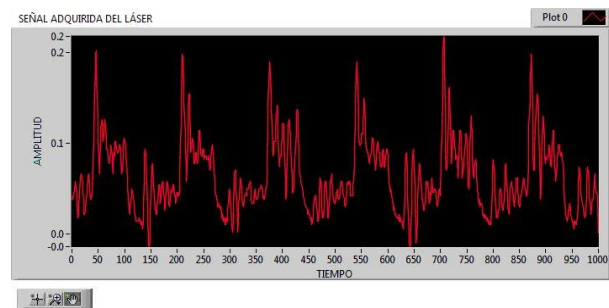


Figura A9 Frecuencia De Modulación de 12KHz

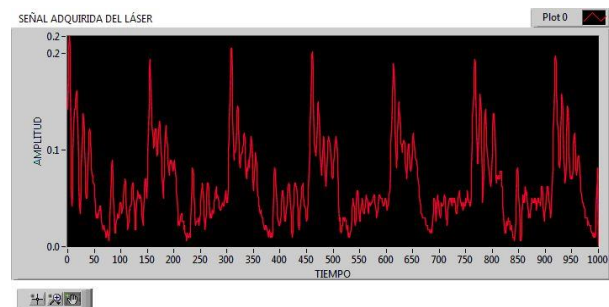


Figura A10 Frecuencia De Modulación de 13KHz

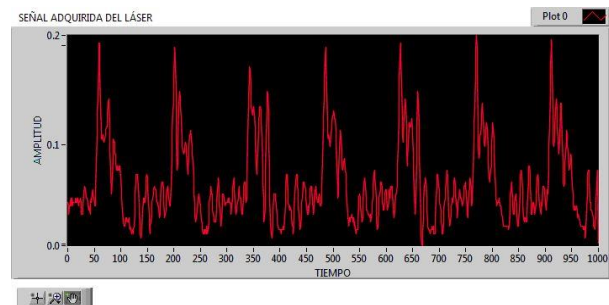


Figura A11 Frecuencia De Modulación de 14KHz

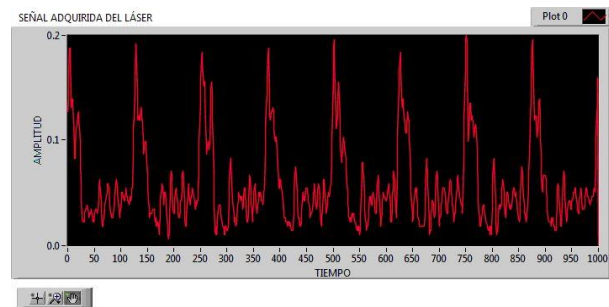


Figura A12 Frecuencia De Modulación de 16KHz

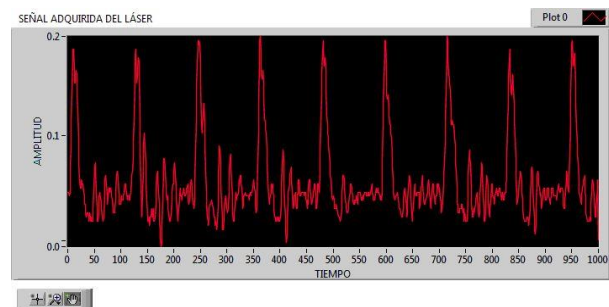


Figura A13 Frecuencia De Modulación de 17KHz

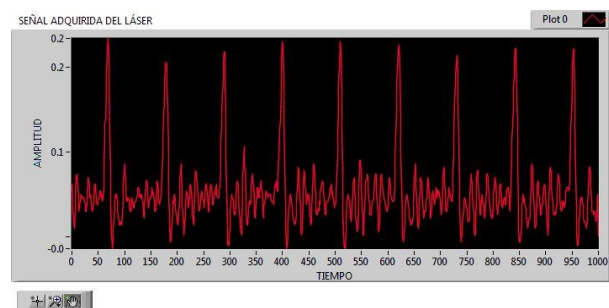


Figura A14 Frecuencia De Modulación de 18KHz

## b) Espectro de la señal

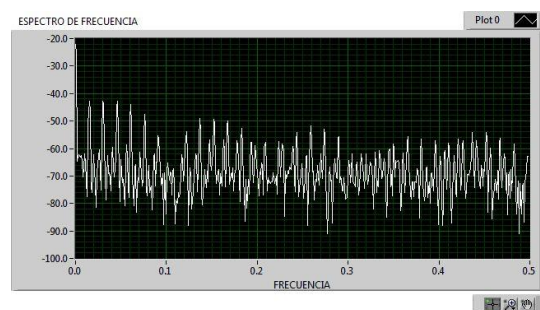


Figura A15 Frecuencia De Modulación de 2KHz

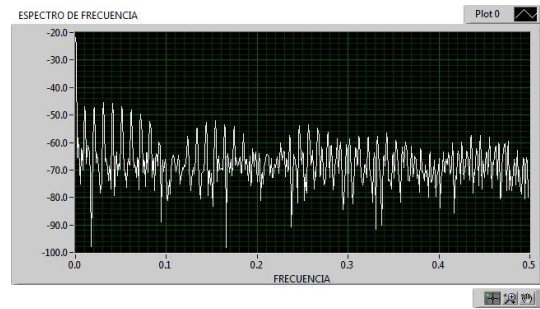


Figura A16 Frecuencia De Modulación de 3KHz

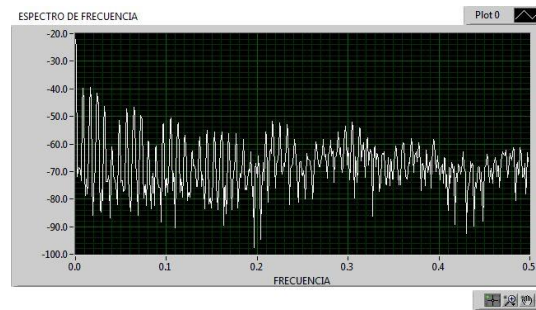


Figura A17 Frecuencia De Modulación de 4KHz

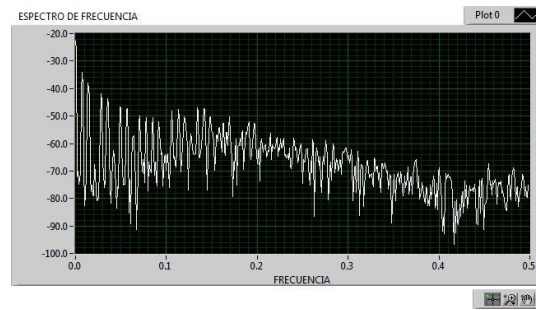


Figura A18 Frecuencia De Modulación de 6KHz

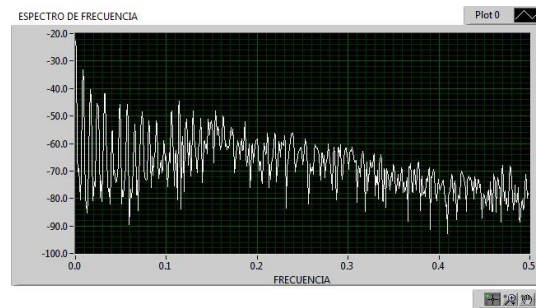


Figura A19 Frecuencia De Modulación de 7KHz



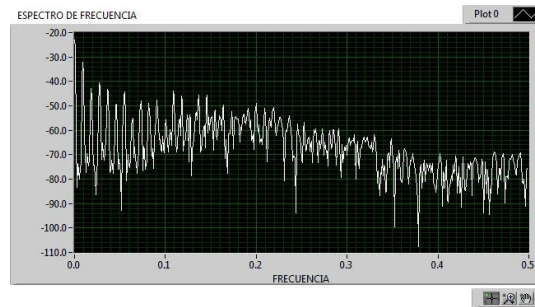


Figura A20 Frecuencia De Modulación de 8KHz

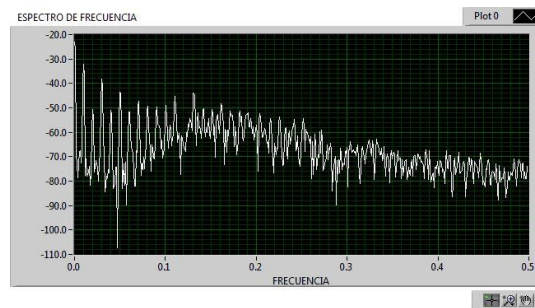


Figura A21 Frecuencia De Modulación de 9KHz

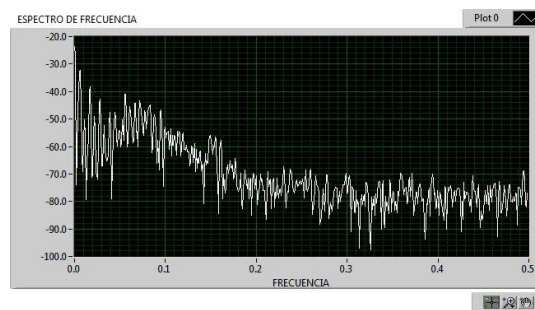


Figura A22 Frecuencia De Modulación de 11KHz

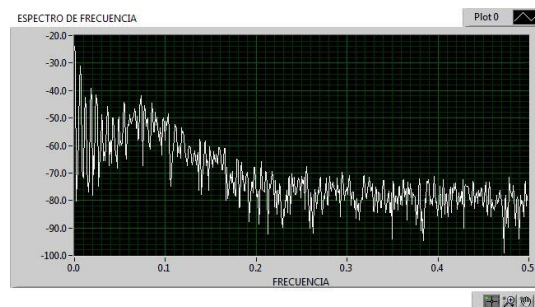


Figura A23 Frecuencia De Modulación de 12KHz

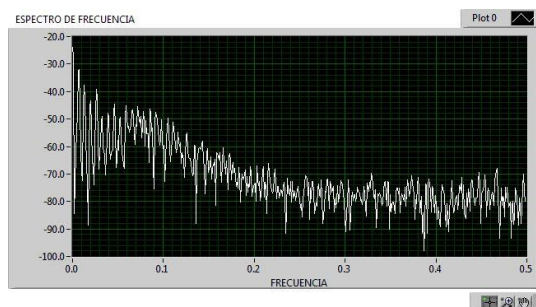


Figura A24 Frecuencia De Modulación de 13KHz

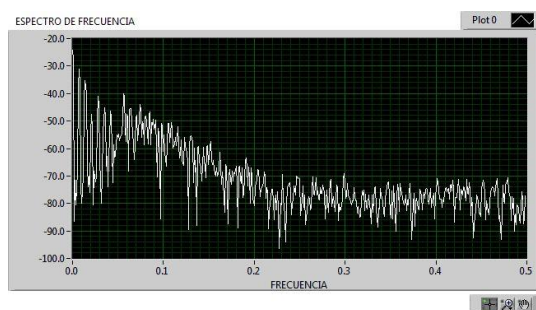


Figura A25 Frecuencia De Modulación de 14KHz

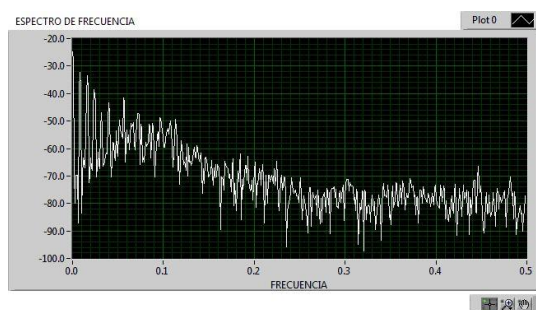


Figura A26 Frecuencia De Modulación de 16KHz

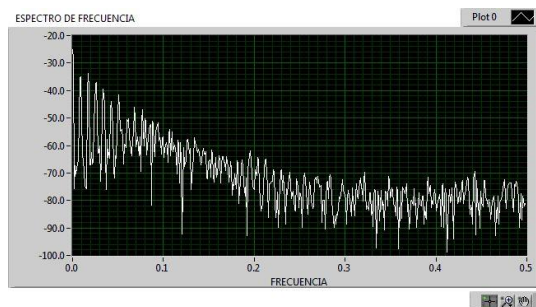


Figura A27 Frecuencia De Modulación de 17KHz

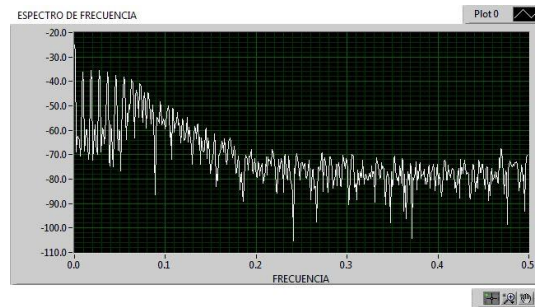


Figura A28 Frecuencia De Modulación de 18KHz

c) Diagrama de fase

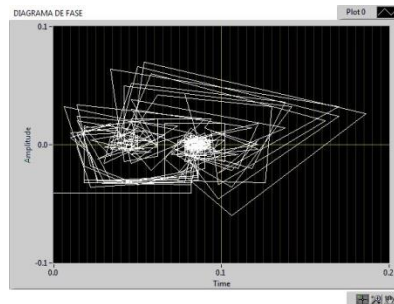


Figura A29 Frecuencia De Modulación de 2KHz

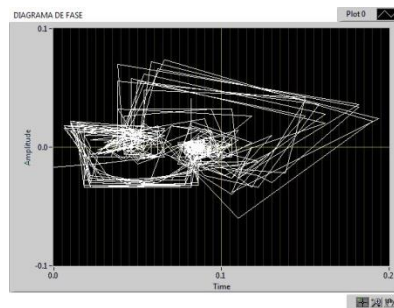


Figura A30 Frecuencia De Modulación de 3KHz

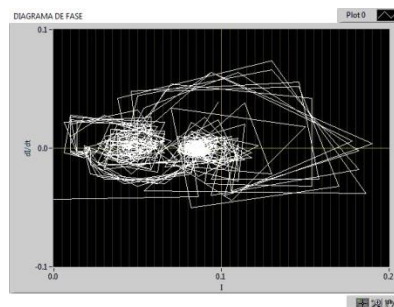


Figura A31 Frecuencia De Modulación de 4KHz

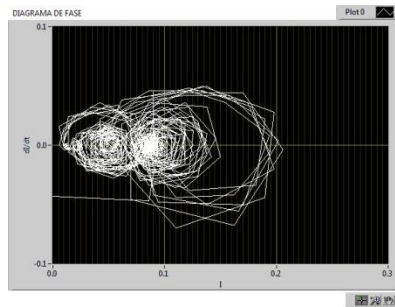


Figura A32 Frecuencia De Modulación de 6KHz

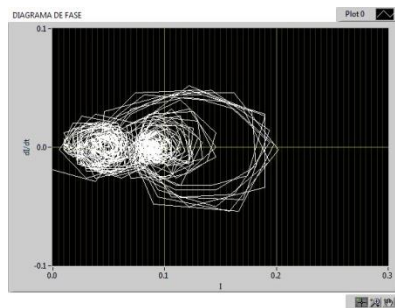


Figura A33 Frecuencia De Modulación de 7KHz

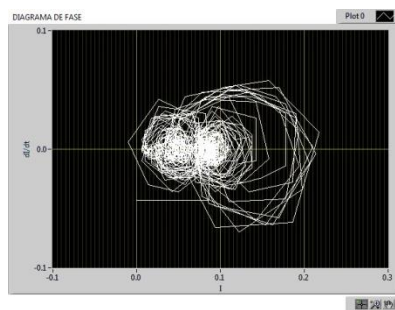


Figura A34 Frecuencia De Modulación de 8KHz

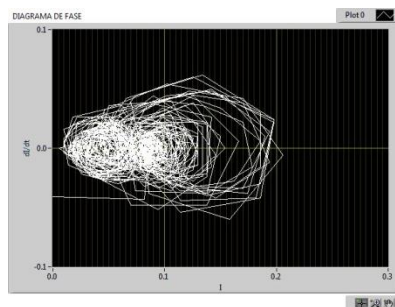


Figura A35 Frecuencia De Modulación de 9KHz

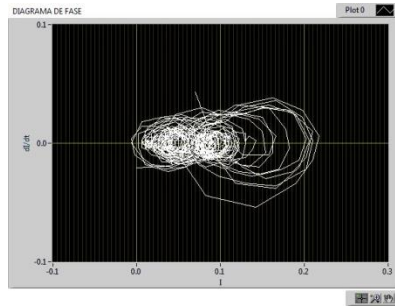


Figura A36 Frecuencia De Modulación de 11KHz

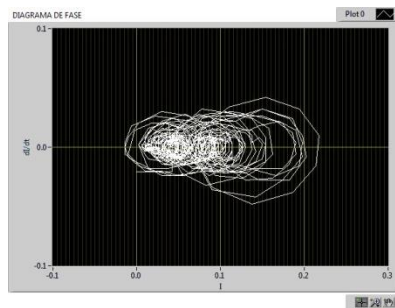


Figura A37 Frecuencia De Modulación de 12KHz

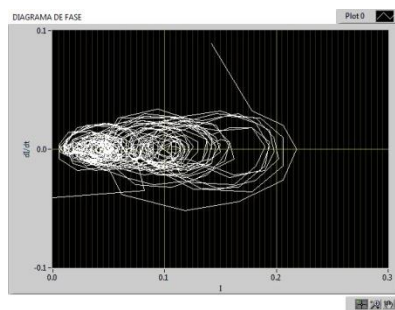


Figura A38 Frecuencia De Modulación de 13KHz

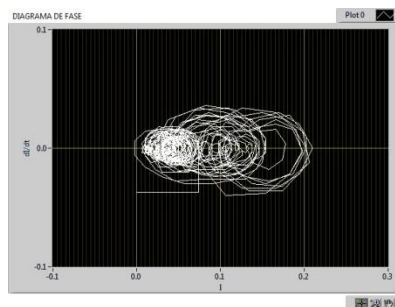


Figura A39 Frecuencia De Modulación de 14KHz

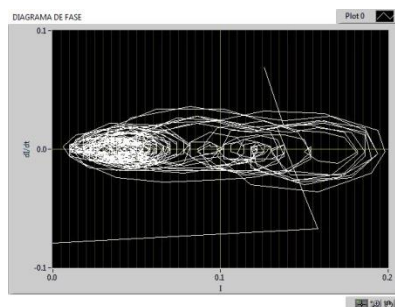


Figura A40 Frecuencia De Modulación de 16KHz

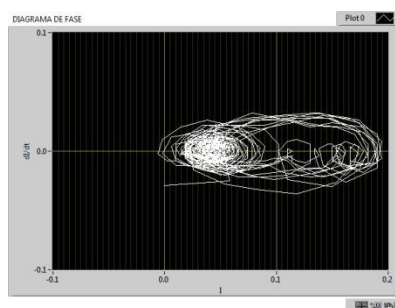


Figura A41 Frecuencia De Modulación de 17KHz

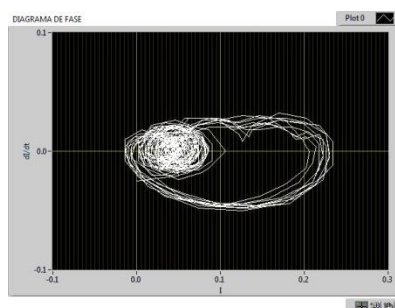


Figura A42 Frecuencia De Modulación de 18KHz

## ANEXO B

### GRÁFICAS VARIANDO LA POTENCIA DE BOMBEO DEL LÁSER

#### a) Señal adquirida del láser

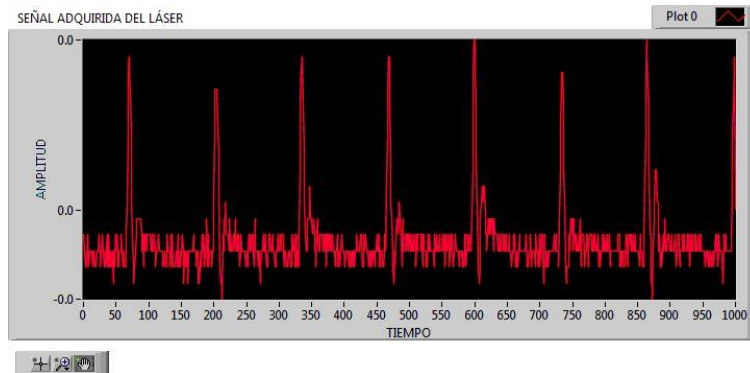


Figura b1 Potencia de bombeo del láser de 2A

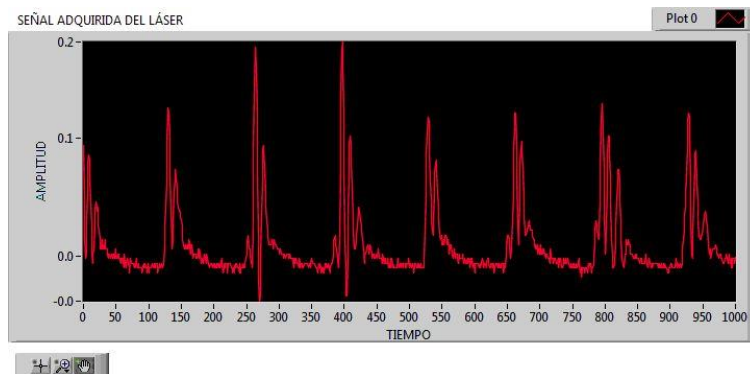


Figura b2 Potencia de bombeo del láser de 2.5A

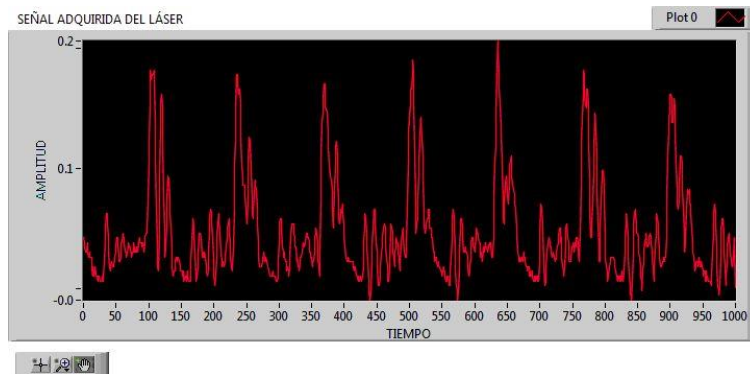


Figura b3 Potencia de bombeo del láser de 3.25A

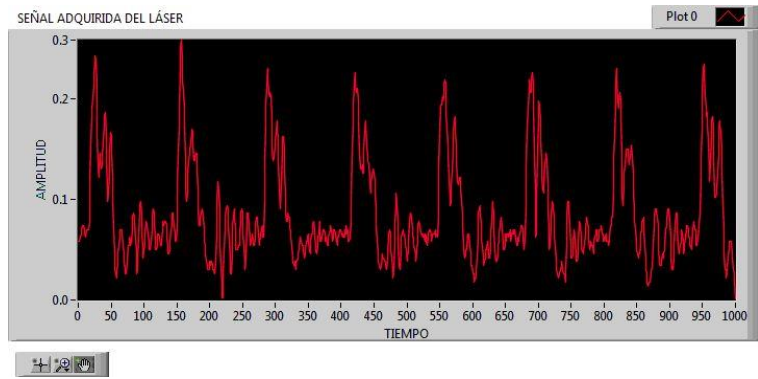


Figura b4 Potencia de bombeo del láser de 3.75A

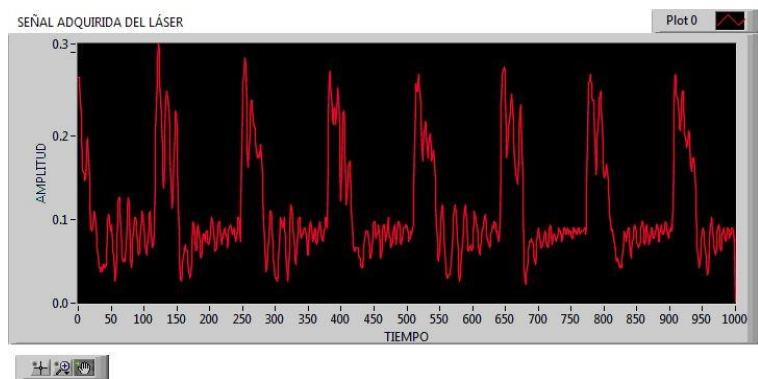


Figura b5 Potencia de bombeo del láser de 4.25A

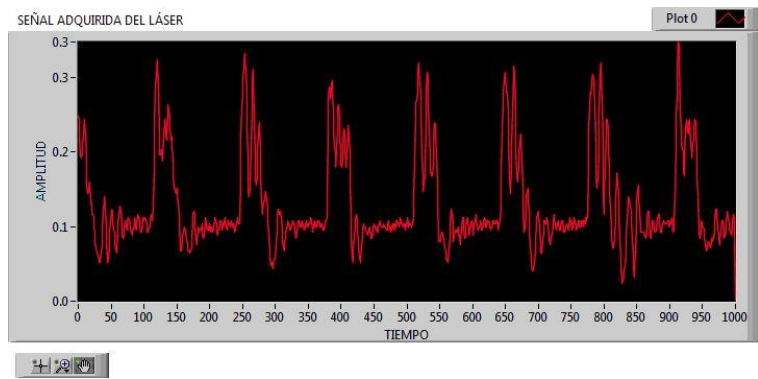


Figura b6 Potencia de bombeo del láser de 4.75A



## b) Espectro de la señal

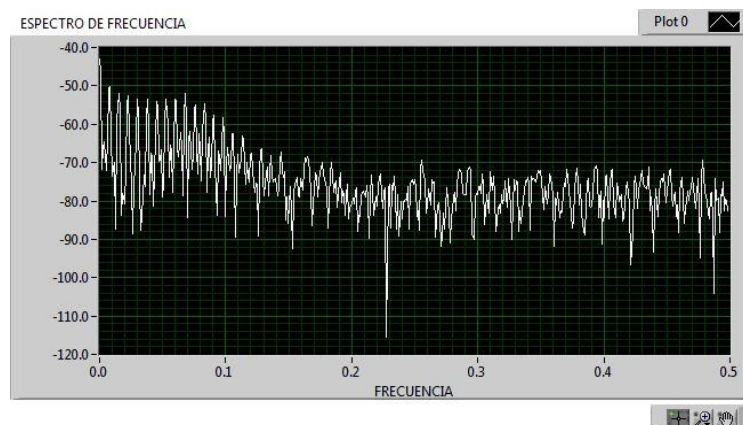


Figura b7 Potencia de bombeo del láser de 2A

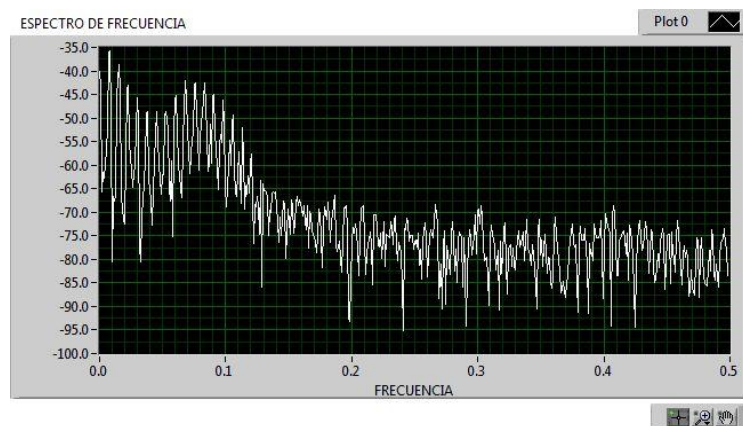


Figura b8 Potencia de bombeo del láser de 2.5A

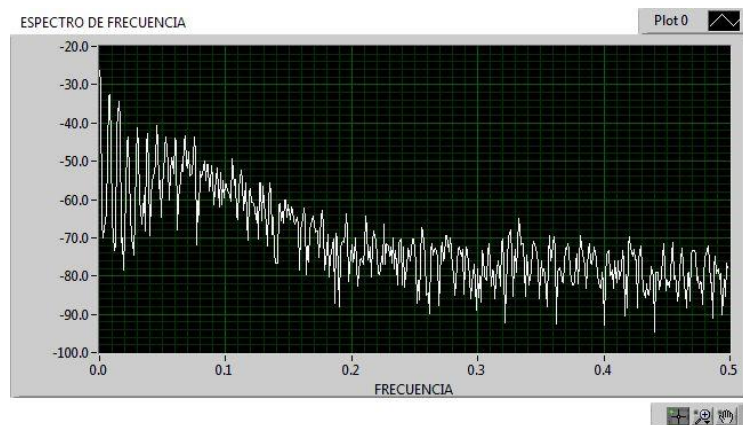
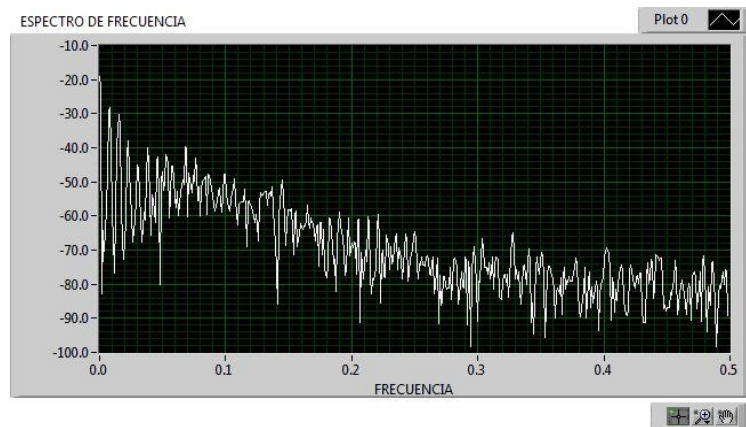
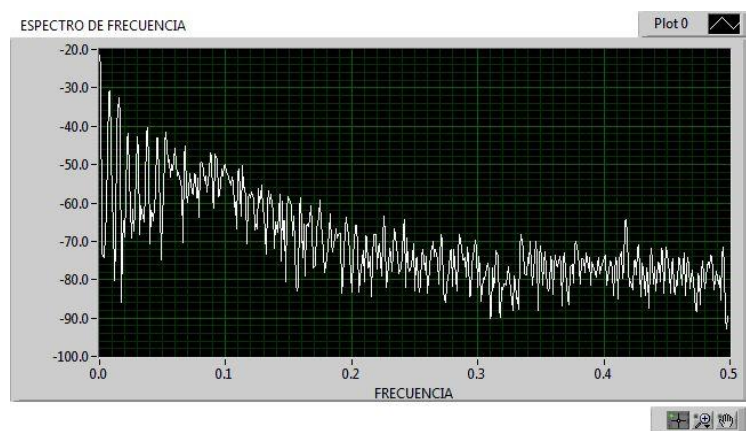


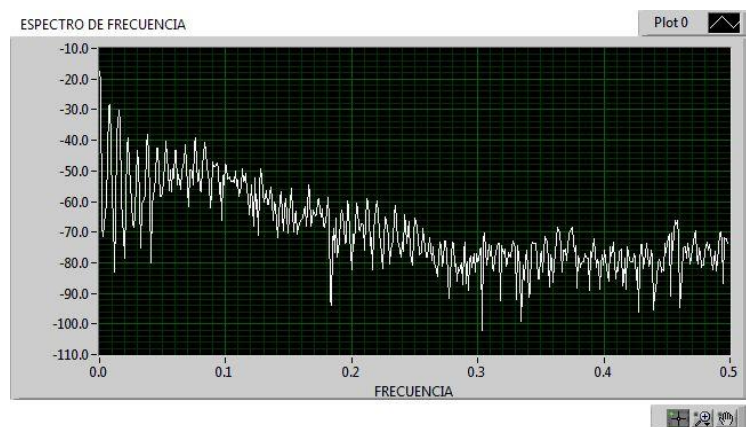
Figura b9 Potencia de bombeo del láser de 3.25A



*Figura b10 Potencia de bombeo del láser de 3.75A*



*Figura b11 Potencia de bombeo del láser de 4.25A*



*Figura b12 Potencia de bombeo del láser de 4.75A*

c) Diagrama de fase

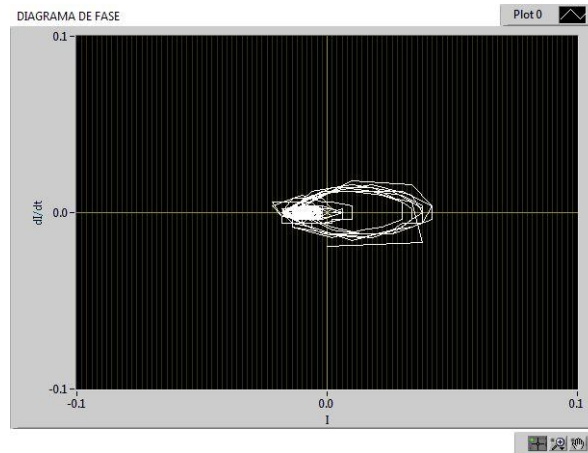


Figura b13 Potencia de bombeo del láser de 2A

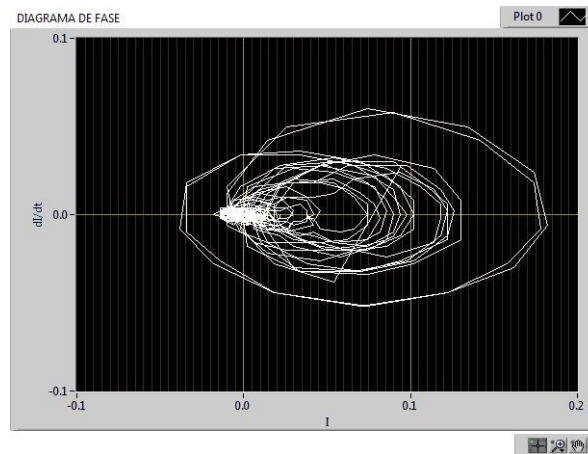


Figura b14 Potencia de bombeo del láser de 2.5A

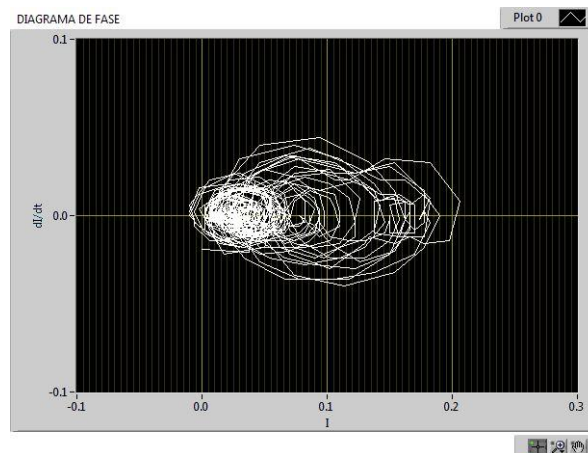


Figura b15 Potencia de bombeo del láser de 3.25A

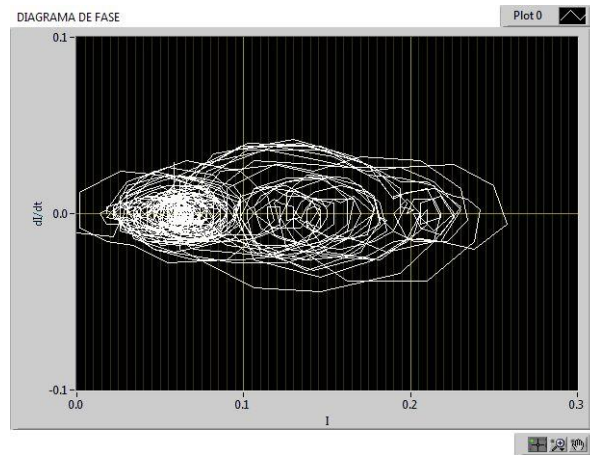


Figura b16 Potencia de bombeo del láser de 3.75A

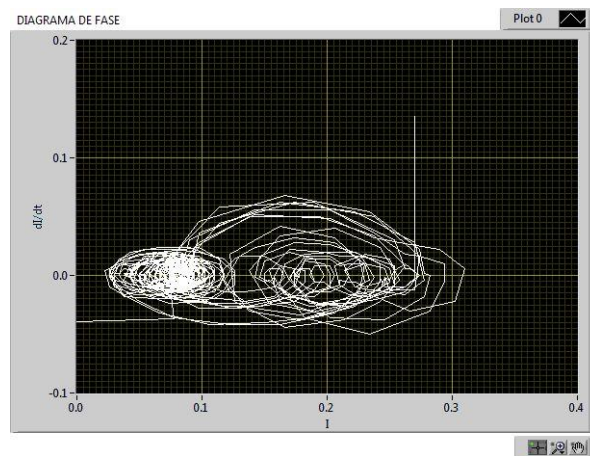


Figura b17 Potencia de bombeo del láser de 4.25A

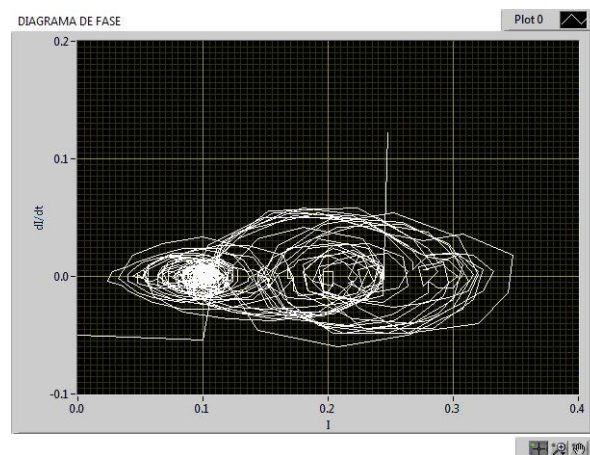


Figura b18 Potencia de bombeo del láser de 4.75A

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES**

---

- Jeff Hecht and Dick Teresi. "Laser, light of a million uses". Dover publications, Inc. New York. 1998.
- Walter Koechner. "*Solid-State Laser Engineering*". Ed. Springer. E.U.A., 1999
- Richard Scheps. "Introduction to laser diode-pumped solid state lasers". Edit. Spie Press. Bellingham, Washington USA. 2002.
- E.E. Coherent. "Lasers, operación, equipo, uso y diseño". Edit. Limusa. Mexico. 1986.
- Liebovitch Larry S. "Fractals and Chaos, Simplified for the Life Sciences". Edit. Oxford. New York. 1998.
- <http://www.monografias.com/trabajos/laser/laser.shtml>
- AT-MIO-16 User Manual, National Instruments, Febrero 1995.
- [www.ni.com](http://www.ni.com)
- Tutorial de Labview 6i
- LabView™ , Data Acquisition Basics Manual, National Instruments, Cap. 2, 1998.
- LabView User Manual, National Instruments, Cap. 13, 1998.
- Mouronte López, Mary Luz (2004). "*Caracterización y análisis de sistemas dinámicos no lineales mediante el estudio del mapa de frecuencias y espacio de fases*". Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Agrónomos (UPM).
- [www.andrew.cmu.edu/course/33-231/vector.pdf](http://www.andrew.cmu.edu/course/33-231/vector.pdf)



**Dr. Daniel Samayoa Penagos**  
**Jefe del Departamento de Gestión Tecnológica**  
**y Vinculación**  
**Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez**  
Presente

Por este conducto, se hace constar que la C.

**Guadalupe López Morales**

alumna de la Carrera de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, con el número de control 05270286, concluyó satisfactoriamente en este Centro la actividad de Residencia Profesional con el proyecto denominado:

**"Caracterización de la dinámica caótica del láser de Nd: YAG Con modulación de Parámetros".**

La C. López Morales estuvo bajo la asesoría del Dr. Víctor Pinto Robledo en los laboratorios del Centro de Investigaciones en Óptica, del 10 de Agosto al 4 de Diciembre de 2009, cumpliendo con 640 horas.

Para los fines que a la interesada convengan, se extiende la presente a los 19 días del mes de Noviembre de 2009.

ATENTAMENTE

  
**Lic. Guillermina Muñiz Palancares**  
Departamento de Servicios Escolares  
Dirección de Formación Académica

  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES**  
**EN OPTICA, A.C.**  
**DIRECCIÓN DE FORMACIÓN ACADÉMICA**  
Servicios Escolares

Gm\*/lhp  
DFA-SE-046

