

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE
VIBRACIÓN EN TURBINAS DE GAS
APLICANDO TÉCNICAS PDS**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR:

ALEJANDRO LEONARDO, AYRAS PERALTA

**PROMOCIÓN
1995 – I**

**LIMA – PERÚ
2003**

**A Dios
A mis Padres
A mis Hermanos
A la “UNI”**

**“PROCESAMIENTO DE SEÑALES DE VIBRACIÓN EN
TURBINAS DE GAS APLICANDO TÉCNICAS PDS”**

SUMARIO

El procesamiento de señales de vibración en Turbinas de Gas mediante el uso de la Transformada Rápida de Fourier FFT es importante ya que nos permite averiguar el estado en que se encuentra una Turbina de Gas, puesto que muchos problemas se manifiestan justamente como vibraciones.

Se realiza simulación de señales de vibración para casos de fallas reportadas a las que se aplica análisis FFT e interpreta los espectros obtenidos usando el programa Matlab.

Se describen los diferentes tipos de sensores de vibración usados en Turbinas de Gas como por ejemplo de Desplazamiento(Proximidad), Velocidad, Aceleración y sensor de fuerza de película de fluido en cojinete(Fiber Fabry –Perotinterferometer FFPI).

Asimismo se realiza la descripción de la Turbina de Gas Siemens modelo V84.3A de 150 MW y las tarjetas usadas para adquisición y procesamiento de señales de vibración provenientes de los cojinetes de la Turbina de Gas.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	3
INTRODUCCIÓN A LA TEORIA DE LA VIBRACIÓN	3
1.1 Definición de vibración	3
1.1.1 Movimiento Armónico Simple (MAS)	4
1.2 Sensores de vibración	8
1.2.1 Acelerómetros	8
1.2.2 Velocidad	11
1.2.3 Desplazamiento	12
1.2.4 Sensor Fiber Fabry-Perotinterferometer (FFPI)	16
1.3 Unidades de medición de vibración	19
1.3.1 Desplazamiento	19
1.3.2 Velocidad	20
1.3.3 Aceleración	20
1.4 Turbina de Gas	21
1.4.1 Introducción	21
1.4.2 Tareas del Sistema	22
1.4.3 Descripción del Sistema	24
1.4.4 Componentes principales de una Turbina de Gas	25
1.4.5 Datos Técnicos	28

1.5 Sensor y tarjetas usadas para adquisición de vibraciones en Turbinas	31
1.5.1 Módulo acondicionador de señal tipo IPC620	31
1.5.2 Módulo separación galvánica GSI130	33
1.5.3 Módulo power supply APF184	34
1.5.4 Módulo procesador de vibración absoluta UVC752	35
1.5.5 Módulo visualizador analógico PLD772	38
1.5.6 Módulo convertidor U/I ABB007	40
1.5.7 Módulo de calibración ACM215	41
CAPÍTULO II	43
ANÁLISIS VIBRACIONAL	43
2.1 Fundamentos	43
2.2 Definición de los estados de los equipos	45
2.2.1 Estado bueno (B)	45
2.2.2 Estado normal (N)	45
2.2.3 Estado tolerable (T)	45
2.2.4 Estado inadmisibles (I)	45
2.3 Evaluación de la medición de amplitud de vibraciones	45
2.3.1 Norma ISO 2372	46
2.3.2 Norma ISO 10816	46
2.3.3 Norma VDI 2059	46
2.4 Interpretación de Espectros	49
2.4.1 Desbalance (Unbalance)	49
2.4.2 Desalineamiento (Misalignment)	50
2.4.3 Eje arqueado (Bowed Shaft)	50

2.4.4 Azote de aceite (Oil Whip)	50
2.4.5 Desgaste mecánico (Mechanical Looseness)	50
2.4.6 Resonancia (Resonance)	52
CAPÍTULO III	53
PROCESAMIENTO DE DATOS	53
3.1 Simulación de señales de vibración usando Matlab	53
3.1.1 Programa “simula.m”	53
3.1.2 Señales generadas	59
3.2 Análisis de espectro de frecuencias usando Matlab	70
3.2.1 Introducción	70
3.2.2 Programa “turbina.m”	72
3.2.3 Aplicación de FFT a las señales generadas	76
3.3 Costos de equipos analizadores de vibración	91
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
ANEXO A : Acrónimos	95
ANEXO B : Programa simula.m	97
ANEXO C : Programa turbina.m	105
ANEXO D : Archivo vibracion1.m	119
ANEXO E : Archivo vibracion2.m	123
BIBLIOGRAFÍA	129

PRÓLOGO

La finalidad del presente documento es demostrar la valiosa utilidad de la Transformada Rápida de Fourier FFT en el diagnóstico del estado de grandes máquinas como son las Turbinas de Gas (siendo este un caso especial que estudiaremos), con tan solo procesar sus señales de vibración.

La vibración es considerada el mejor parámetro de operación para juzgar las condiciones dinámicas tales como Balance, Estabilidad y Esfuerzos aplicados a los componentes de una máquina. Muchos problemas de maquinaria se manifiestan como vibraciones. Cada máquina en su mejor estado de operación tiene un nivel de vibración inherente que puede considerarse normal. Si esta vibración aumenta o llega a ser excesiva, lo más probable es que se deba a una avería ó defecto mecánico.

El análisis espectral por medio de la Transformada Rápida de Fourier FFT, es el método para analizar y resolver problemas de mediciones de vibración del tipo desplazamiento, velocidad ó aceleración

El alcance del presente estudio es para Turbinas de Gas y en particular de la Central Termoeléctrica de Ventanilla S.A. (ETEVENSA) que cuenta con 2 Turbinas de Gas Siemens modelo V84.3A de 150 MW usadas para Generación Eléctrica.

Las limitaciones para el estudio llevado a cabo es la no disposición de información (data) de vibración a procesarse por lo que se realizó simulación de señales de

vibración para el caso de espectros típicos de fallas reportados y poder así realizar el análisis respectivo.

En el Capítulo I se realiza una introducción a la teoría de la vibración, se describen los diferentes sensores de vibración usados en Turbinas de Gas del tipo desplazamiento (proximitor), velocidad, aceleración y sensor de fuerza de película de fluido en cojinete (Fiber Fabry –Perotinterferometer FFPI). Asimismo se describe los componentes principales de la Turbina de Gas Siemens modelo V84.3A y los sensores y tarjetas usadas para adquisición y procesamiento de señales de vibración provenientes de cojinetes de esta Turbina de Gas.

En el Capítulo II se realiza el análisis vibracional, la definición de los estados de los equipos como Bueno(B), Normal(N), Tolerable(T), e Inadmisible(I). Asimismo la evaluación de la medición de amplitud de vibraciones de acuerdo a las Normas ISO 2372, ISO 10816, VDI 2059 y también la interpretación de espectros para casos ya reportados y estudiados como Desbalance, Desalineamiento, Eje Arqueado , Azote de Aceite, Desgaste Mecánico y Resonancia.

En el Capítulo III se realiza el procesamiento de datos, se simula señales de vibración usando un programa realizado en Matlab, para algunos casos de espectros de fallas típicas conocidas para Turbinas de Gas y luego estas se aplican a otro programa hecho en Matlab para realizar el análisis espectral respectivo usando FFT.

También se muestran costos de equipos analizadores de vibración existentes en el mercado actualmente y cabe resaltar que la implementación del sistema en ETEVENSA para monitorear el estado de la Turbina de Gas con el estudio realizado no demandaría mucha inversión.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LA VIBRACIÓN

1.1 Definición de vibración

Todos estamos familiarizados con los efectos físicos de la vibración, los cuales perciben nuestros sentidos: el movimiento de vaivén del columpio de un niño, el movimiento resonante del trampolín después que el nadador ha saltado, la sensación en nuestros pies, cuando una aplanadora pasa muy cerca, el ruido que emana de un taladro neumático, el movimiento y ruido resultante de puntear una cuerda de violín, etc. No es suficiente sentir las vibraciones, debemos definir la vibración en términos matemáticos para comprenderla completamente.

En el sentido más amplio, la vibración puede ser definida como un movimiento de vaivén rápido, especialmente de las partes de un fluido ó de un sólido elástico que ha perdido el equilibrio. En esta relación ya se debería entender, sea aparente o no, toda materia sea gaseosa, líquida o sólida es capaz de sufrir vibración. Hay diferentes tipos de vibración algunas de las cuales, como el movimiento de vaivén de un pistón en un cilindro de motor automotriz o de un columpio de niño, son intencionales y pueden ser útiles e incluso placenteros. Nos concentraremos en una definición muy estrecha de la vibración, como significado de un movimiento periódico no deseado de una Turbina a Gas, sus componentes y accesorios.

La discusión será limitada a la fuente más grande de vibración en una Turbina a Gas, el sistema del rotor, y sus formas más comunes de comportamiento vibracional.

1.1.1 Movimiento Armónico Simple (MAS)

Los movimientos vibratorios más periódicos pueden ser definidos matemáticamente por una suma finita de diferentes movimientos armónicos simples. En muchos casos, tales como el desbalance de un rotor de turbina, la vibración resultante puede ser definida como un MAS de una frecuencia discreta.

Todos los días hay muchos ejemplos de movimientos armónicos simples.

El pistón de motor automotriz al moverse desde la parte más alta de su carrera, donde esta momentáneamente en reposo, y acelera a un máximo en su mitad de carrera, y luego desacelera hasta detenerse momentáneamente en la parte más baja de su carrera para luego empezar su viaje de retorno a la parte más alta, esta describiendo un movimiento armónico simple.

Una masa suspendida en un resorte, alterada de su posición de equilibrio por una fuerza externa, sufre un movimiento periódico el cual podría ser un MAS si no fuera por el extinguimiento friccional del movimiento, causado por la resistencia del aire y por el extinguimiento interno en el material del resorte. El movimiento resultante del sistema masa-resorte es llamado una vibración natural y es similar a un MAS, excepto que la amplitud del desplazamiento, desde la posición neutral ó de equilibrio gradualmente disminuye debido al extinguimiento, hasta que la masa con resorte nuevamente vuelve al estado de reposo en su posición de equilibrio.

El movimiento armónico simple puede ser definido matemáticamente como la proyección, sobre el eje vertical de un vector rotando en la dirección anti-horaria, tal como se muestra gráficamente en la Fig. 1.1. Si el vector de longitud “r” gira a

“ w ”(rad/seg), se moverá a través de un ángulo “ wt ” en un tiempo “ t ” segundos. La proyección vertical representa el desplazamiento “ X ” y es el producto del vector de longitud “ r ” por el “seno” del ángulo “ wt ”. El tiempo tomado para una revolución completa de 2π radianes ó 360° es llamado el tiempo del periodo “ T ” . La forma resultante de la curva es una onda sinusoidal.

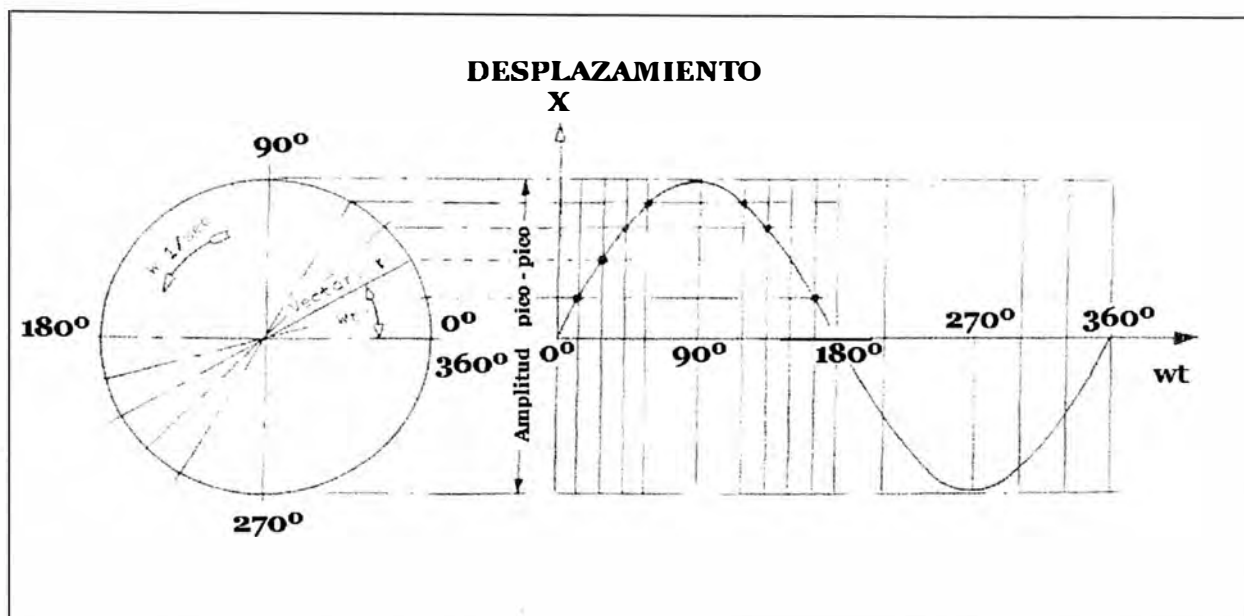


Fig. 1.1 Representación gráfica de Movimiento Armónico Simple (MAS)

Habiendo definido matemáticamente el MAS, podemos ahora examinar los componentes periódicos de la vibración; amplitud de desplazamiento, amplitud de velocidad y aceleración, mediante la diferenciación con respecto al tiempo “ t ”, la velocidad y la aceleración pueden ser obtenidas a partir del desplazamiento “ X ”, como sigue:

$$\text{Desplazamiento} \quad X = r * \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\text{Velocidad} \quad \dot{X} = \omega * r * \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$\text{Aceleración} \quad \ddot{X} = -\omega^2 * r * \sin(\omega t) \quad (3)$$

De estas 03 ecuaciones básicas del MAS, es evidente que el pico de la aceleración estará en fase, mientras que el pico de velocidad estará exactamente desfasado 90° con el pico de desplazamiento.

La velocidad angular será:

$$w = \frac{2 * \pi}{T} = 2 * \pi * f$$

Donde “f” es la frecuencia del movimiento en ciclos/seg (Hz). Reemplazando por

“w” en las ecuaciones (1),(2) y (3) los valores máximos ó picos vendrían a ser:

$$\text{Desplazamiento Máximo} \quad \hat{X} = r \quad (4)$$

$$\text{Velocidad Máximo} \quad \hat{X} = 2 * \pi * f * r \quad (5)$$

$$\text{Aceleración Máximo} \quad \hat{X} = 4 * \pi^2 * f^2 * r \quad (6)$$

El valor de “X” es normalmente llamado la amplitud. Este representa el desplazamiento de la posición de reposo en una sola dirección.

Es usual expresar el desplazamiento en términos de doble amplitud ó valor pico-pico como se muestra en la Fig. 1.1 . Las unidades normales de amplitud de desplazamiento son mils pico-pico. Las unidades normales de amplitud de velocidad son pulg/seg. Es común en la práctica expresar la aceleración como un factor de la aceleración debido a la gravedad, “g”, (donde “g” es aproximadamente 32.2 pies/seg²).

Una aceleración de : 5G = 5*32.2 = 161 pies/seg² . Sustituyendo en las ecuaciones 4,5 y 6 la relación entre la amplitud de desplazamiento , amplitud de velocidad y aceleración puede ser escrita en términos familiares como sigue :

$$A = \frac{V}{\pi * f} = \frac{32.2 * G}{2 * \pi^2 * f^2} \quad (7)$$

donde :

A = amplitud pico-pico

V = máxima velocidad

G = aceleración pico en unidades de gravedad

f = frecuencia de vibración

En un sistema de rotor de turbina muchas fuerzas actúan en diferentes partes , amplitudes y frecuencias. El movimiento periódico resultante y la forma de onda resultante no será una onda sinusoidal pura.

La forma de onda compleja de la señal resultante de vibración puede ser definido matemáticamente por una suma finita de diferentes movimientos armónicos simples. Estas pueden ser graficadas en las figuras 1.2, 1.3, y 1.4 . Considerando el caso de dos sistemas separados masa-resorte, cada una con su propia frecuencia natural de vibración y amplitud. En la Fig. 1.3, asumir que la masa pequeña será vibrante dos veces la frecuencia y la mitad de amplitud de la masa mayor (Fig. 1.2). Los movimientos armónicos simples individuales serán como se muestra en la Fig. 1.2 y Fig. 1.3. Si el sistema más pequeño masa-resorte es colocado ahora encima de la masa más grande, esta continuará vibrando en su propia frecuencia y amplitud relativa a la masa más grande. Sin embargo, el movimiento de la masa pequeña relativo al suelo será una combinación del movimiento de ambas masas como se muestran en la Fig. 1.4. En forma similar los movimientos combinados de diferentes sistemas masa-resorte vibrando a diferentes frecuencias y amplitudes puede ser definido como la suma de los movimientos individuales de masas con respecto al tiempo. Esta puede ser expresada matemáticamente como sigue:

$$X_t = X_1 * \sin(w_1 * t) + X_2 * \sin(w_2 * t) + \dots + X_n * \sin(w_n * t)$$

donde :

X_t = amplitud combinada en el instante, t

X_1, X_2, \dots, X_n = amplitudes de masas individuales

w_1, w_2, \dots, w_n = frecuencias de masas individuales

Un malfuncionamiento diferente del rotor puede causar vibración a diferentes

frecuencias discretas. Esta es la combinación de las frecuencias discretas que resultan en la forma de onda compleja observada en el punto de medición de vibración. Esta puede ser útil para analizar la señal de vibración compleja resolviendo la forma de onda a través de sus componentes discretas en frecuencia por análisis de Fourier. Esta forma de información reducida es denominado espectro armónico ó análisis de señales y los resultados son usualmente presentados como un diagrama de amplitud de desplazamiento versus frecuencia.

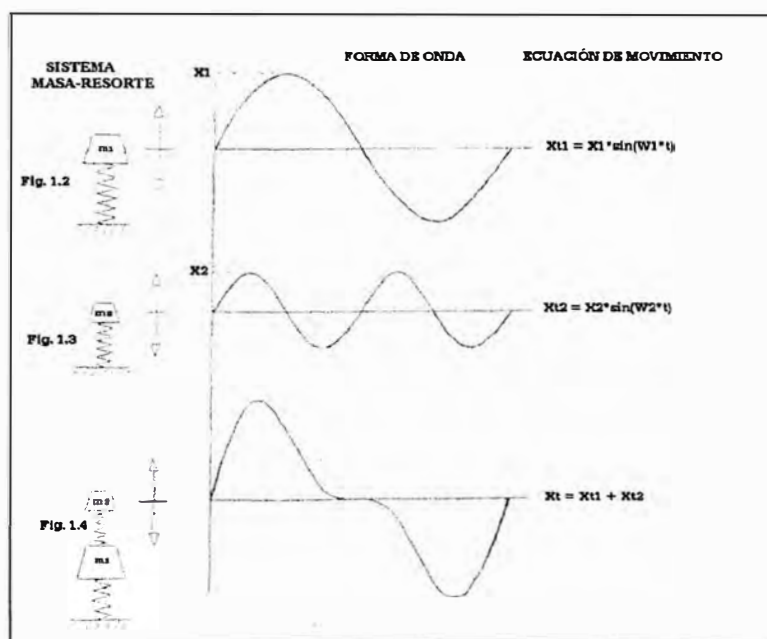


Fig. 1.2 Sistema masa-resorte 1 ; Fig. 1.3 Sistema masa-resorte 2 ;

Fig. 1.4 Sistema masa-resorte resultante

1.2 Sensores de vibración

1.2.1 Acelerómetros

La aceleración es la relación del cambio de velocidad. La aceleración de la vibración se mide para evaluar componentes de vibraciones de altas frecuencias como las generadas por rodamientos y engranajes. Los acelerómetros son montados normalmente en la carcasa de la turbina ó en el soporte de la carcasa del cojinete.

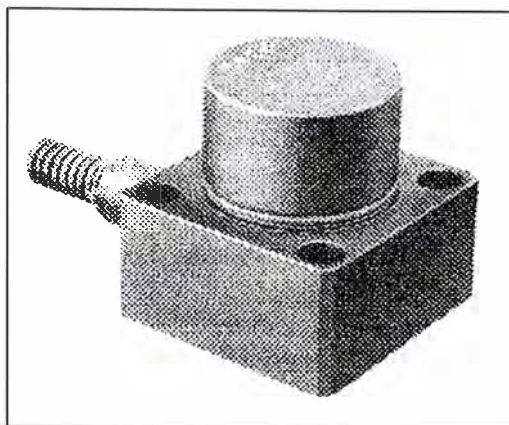


Fig. 1.5 Acelerómetro piezoeléctrico tipo CA201

El acelerómetro que veremos será el acelerómetro piezoeléctrico tipo CA201 de la marca Vibro-Meter mostrado en la Fig. 1.5, el cual está instalado en la turbina Siemens modelo V84.3A de 150MW.

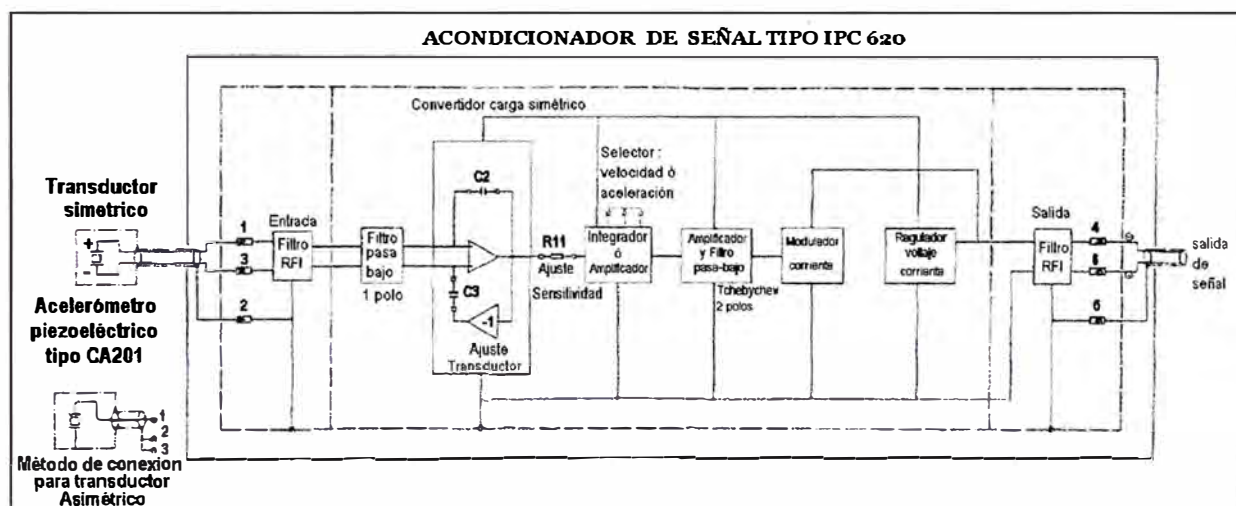


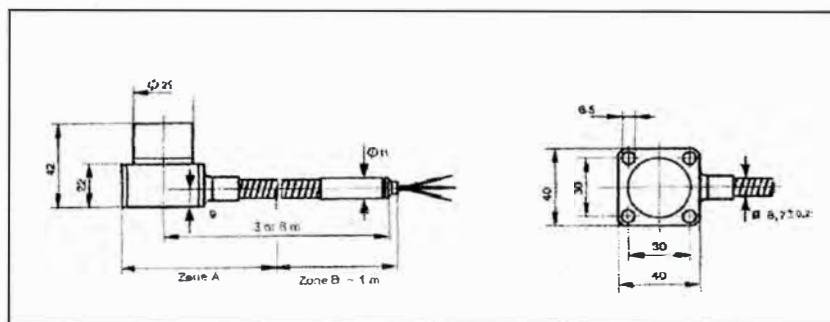
Fig. 1.6 Acelerómetro piezoeléctrico y acondicionador de señal IPC 620

El Acelerómetro piezoeléctrico conjuntamente con el acondicionador de señal tipo IPC 620 de la marca Vibro-Meter como se muestran en la Fig. 1.6 pueden entregar medidas de vibración en unidades de ingeniería ya sea de velocidad ó aceleración de la vibración; este puede ser configurado por medio de dos jumpers en el acondicionador de señal. Cabe señalar que el acondicionador de señal está configurado para entregar mediciones en unidades de velocidad de vibración para

todos los puntos de monitoreo de vibración (existen 4 cojinetes). Asimismo la velocidad de rotación del eje de la turbina es de 60Hz ó 3,600 RPM.

El acelerómetro es un transductor sísmico de pequeño tamaño y amplio rango de frecuencia, muy usado hoy en día sobre todo en equipos colectores / analizadores portátiles. Diseñado para control y medición de vibración en duras condiciones industriales.

El elemento transductor es un cristal piezoeléctrico, el cual produce una carga cuando es sometido a una fuerza. La carga eléctrica producida es proporcional a la aceleración de la vibración. La Fig. 1.7 muestra la disposición mecánica del acelerómetro tipo CA201.



**Fig. 1.7 Disposición mecánica de
acelerómetro tipo CA201**

❖ Especificaciones

- Procesamiento de carga : amplificador de carga
- Sensitividad : $100 \text{ pC/g} \pm 5\%$ a 120 Hz
- Rango de medición dinámica : 0.0001g a 200g pico
- Linealidad :
 - $\leq 1\%$ entre 0.0001g y 20g pico
 - $\leq 2\%$ entre 20g y 200g

- Frecuencia de resonancia : 14 KHz nominal
- Respuesta de frecuencia :
 - $\pm 5\%$ entre 0.5Hz y 3,000Hz
 - $\leq 10\%$ entre 3KHz y 4.5KHz
- Resistencia de aislamiento : mínimo 10^8 ohmios.

1.2.2 Velocidad

La velocidad de la vibración es la unidad más utilizada para propósitos generales de evaluación de máquinas de baja y media velocidad. Estos transductores son montados normalmente en la carcasa de la turbina ó en el soporte de carcasa del cojinete y es mostrado en la Fig. 1.8.

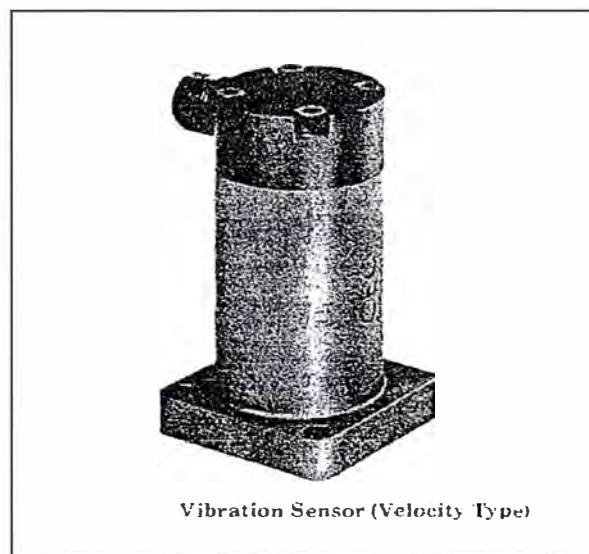


Fig. 1.8 Sensor de vibración tipo Velocidad

El transductor de velocidad genera voltaje automáticamente por el movimiento de un magneto que está sísmicamente montado en una bobina . El voltaje producido en respuesta a la fuerza vibratoria transmitida al transductor es proporcional a la velocidad (por ejemplo, mV/ pulg/seg) y es lineal en el rango de frecuencia habitual de 20 Hz a 2 KHz.

1.2.3 Desplazamiento

El desplazamiento representa la distancia y es utilizada preferentemente en máquinas de bajas revoluciones, utilizando sensores de corrientes parásitas (eddy current probe). Trataremos el Sistema Transductor de Proximidad 3300 serie 8 mm, usado en la Turbina Westinghouse modelo W-501D de 100 MW.

❖ Sistema Transductor de Proximidad 3300 serie 8mm

Este sistema mide la vibración de la máquina, y la posición del eje u otras partes de una máquina en relación a la localización de la sonda. El sistema consiste de una sonda unida a un cable de prueba, un cable de extensión, y un proximitor.

El sistema transductor mide la vibración y posición relativa, sensando el Gap (espacio) entre la punta de la sonda y una superficie conductiva observada. El sistema provee un voltaje negativo proporcional a la distancia del Gap.

Esta señal de voltaje puede ser aplicado a un monitor, instrumentación portátil, ó equipos de diagnóstico donde es usado para determinar la vibración radial, corrimiento de posición axial, y una variedad de otros parámetros de supervisión.

La característica del Sistema Transductor 3300 incluye una construcción resistente, con protección incorporada de puesta a tierra, conectores de acero inoxidable, y excelente estabilidad a la temperatura para ambos, la sonda y el cable de extensión.

Este sistema satisface ó supera los requerimientos del API 670 en muchas áreas.

El Sistema Transductor de Proximidad 3300 serie 8mm consiste de un proximitor, sonda y un cable extensión.

❖ Proximitor

El Proximitor contiene circuitería electrónica que genera una señal de radio

frecuencia (RF), sensa las pérdidas de potencia y genera un voltaje de salida el cual es proporcional al Gap; se muestra en la Fig. 1.9.

Los Proximitores son calibrados para 5mt (16.4 pies) ó 9mt (29.5 pies) de longitud de cable eléctrico. La longitud del cable eléctrico incluye las longitudes combinadas del cable de prueba y el cable de extensión. El Proximitor 3300 está equipado con aislamiento incorporado, que reduce la posibilidad de fuga a tierra.

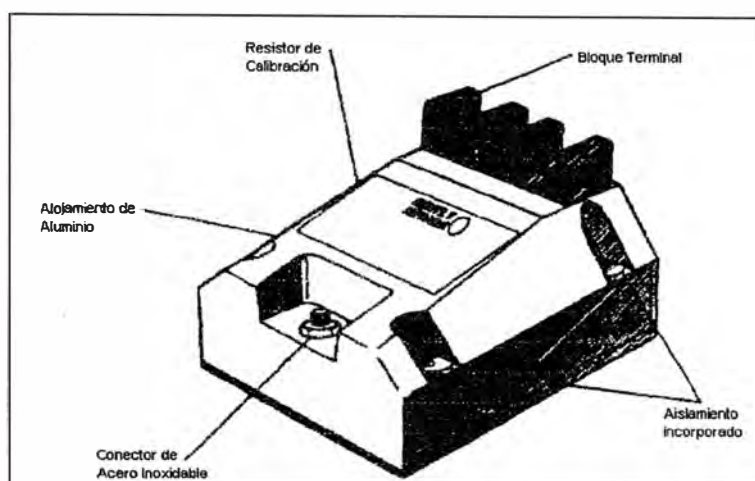


Fig. 1.9 Proximitor 3300

La construcción de la envoltura del Proximitor protege el conector coaxial de daños el cual podría resultar en encorvamiento del Proximitor.

❖ Sonda

La Sonda es el sensor del sistema, se muestra en la Fig. 1.10. Está posicionado cerca a la superficie del eje de tal manera que pueda sensar el Gap entre la punta de la sonda y la superficie del eje. Las sondas están disponibles en diferentes configuraciones que se acomodan a una variedad de aplicaciones y facilitan su instalación. La sonda es una bobina de alambre con un diámetro de aproximadamente 5 mm (0.2 pulg). Con una cubierta protectora de Polyphenylene Sulfide (PPS) incrementa el tamaño de la punta a 8 mm (0.315 pulg). La cubierta protectora provee resistencia mecánica y protección al ambiente severo. La sonda 3300 puede

ser usado en altas presiones de hasta 0.69 Mpa (100 PSI). Las sondas están disponibles con ó sin armadura y conectores sobre el cable de prueba.

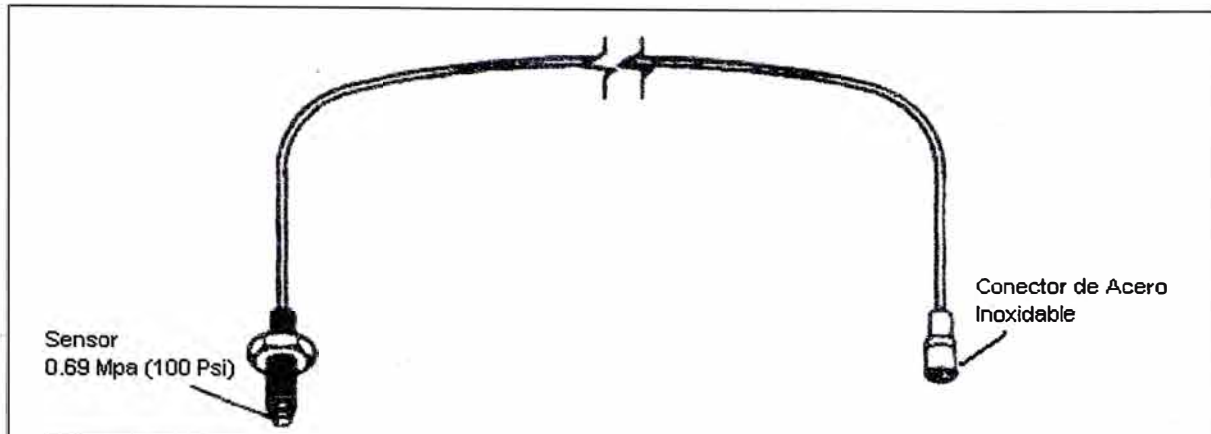


Fig. 1.10 Sonda de proximidad 3300

❖ Cable de Extensión

El Cable de Extensión conecta la sonda con el proximitor y hacen que la longitud del cable eléctrico del sistema sea 5 mt (16.4 pies) ó 9 mt (29.5 pies), este es mostrado en la Fig. 1.11.

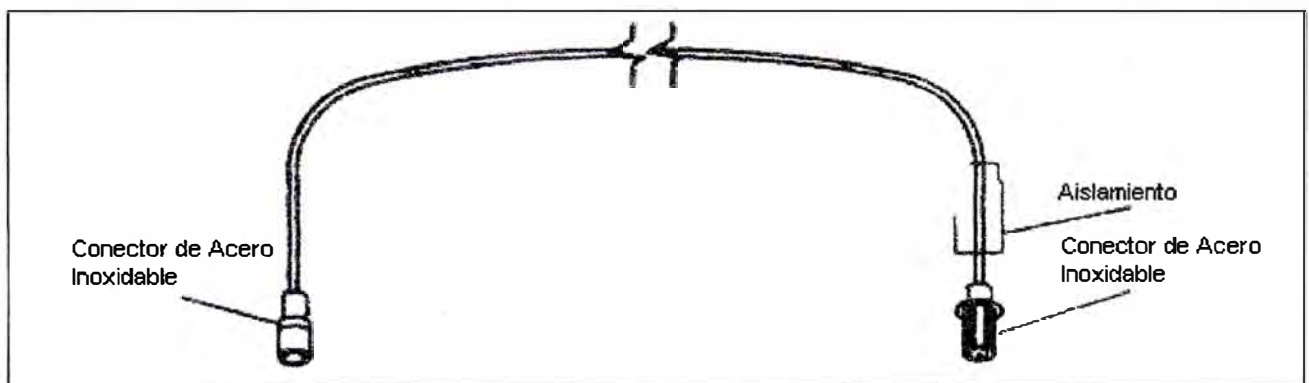


Fig. 1.11 Cable de Extensión 3300

El Cable de Extensión y la punta de prueba ambos tienen una armadura de protección trenzada, campo exterior, que es cubierto con aislamiento de teflón. Esta armadura trenzada no es similar a la armadura de acero inoxidable la cual es montada sobre el cable en algunas versiones.

La Fig. 1.12 muestra como el Cable de Extensión es construido. Una pieza de un tubo encogido es suministrado para el aislamiento del conector. El Cable de

Extensión está disponible con ó sin armadura y conectores.

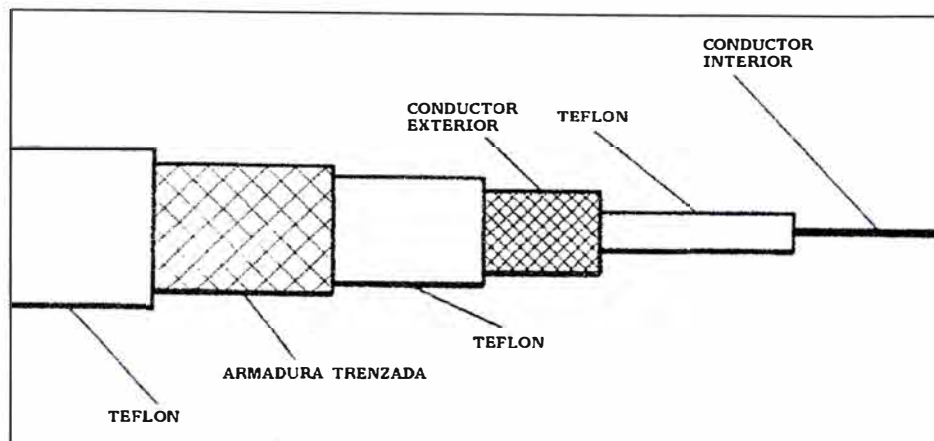


Fig 1.12 Construcción de Cable de Extensión

❖ Como Trabaja el Sistema Transductor de Proximidad

El Sistema Transductor de Proximidad 3300 serie 8mm usa el principio de las corrientes parásitas (eddy current) para medir la distancia entre la punta de la sonda y la superficie a ser observada .

El Proximitor genera una señal de baja potencia de radio frecuencia (RF). Esta señal RF es conectada a la bobina de alambre dentro de la punta de la sonda por el cable de extensión. Cuando el material no conductor está dentro del rango de la señal RF que rodea la punta de sonda, virtualmente toda la potencia liberada a los alrededores del área es regresada a la sonda.

Cuando una superficie conductora se aproxima a la punta de la sonda, la señal RF crea pequeñas corrientes parásitas en la superficie. Estas corrientes parásitas crean una pérdida de potencia medible en la señal RF. En la cercanía del material en cuestión, la pérdida de potencia es mayor.

El sistema usa esta pérdida de potencia para generar un voltaje de salida. El voltaje de salida del Proximitor es linealmente proporcional al Gap sobre un amplio rango. Este rango permite el uso de amplias tolerancias de Gap durante la instalación de la sonda y permite mediciones de posición axial de empuje.

El Sistema Transductor de Proximidad 3300 serie 8 mm, tiene un rango de medición lineal de 2mm (80milis) que se extiende aproximadamente desde 0.25mm (10mils) desde un lado de la sonda hasta aproximadamente 2.28mm(90mils). La sensibilidad del sistema de Gap ó la pendiente de la curva del voltaje de salida versus el Gap, es 7.87V/mm (200mV/mil) proveyendo alta resolución en la medición de la distancia Gap. El sistema mantiene esta precisión sobre un amplio rango de temperatura, incorporando compensación térmica y provee operación confiable en casi todos los ambientes de las máquinas.

1.2.4 Sensor Fiber Fabry-Perotinterferometer (FFPI)

Un nuevo sensor de fuerza de película de fluido en el cojinete ha sido desarrollada por Bearing Plus / KMC y Fiber Dynamics, permitiendo la monitorización continua de cargas dinámicas del cojinete en turbo-maquinarias.

En el corazón de la nueva tecnología, está un robusto medidor de esfuerzo de fibra optica (Fig. 1.13) que empieza en una célula de carga dinámica cuando es implantado bajo cojinetes cargados.

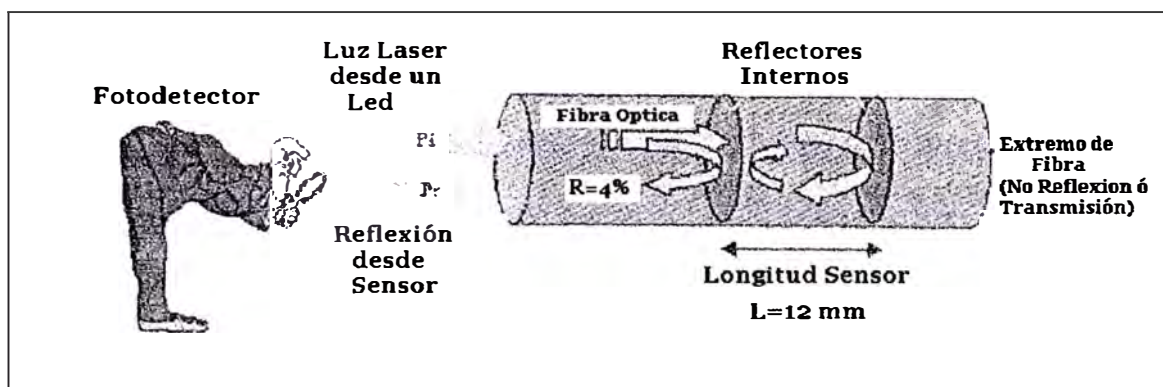


Fig. 1.13 Operación del sensor FFPI.

Originaria de Texas A&M y ahora un producto de "Dynamics Fiber Inc", el sensor FFPI ha estado bajo desarrollo desde 1,986. El sensor FFPI es fabricado de fibra

optica y consiste de dos reflectores internos separados por una distancia, usualmente de unos pocos milímetros a unos pocos centímetros.

Una novedosa técnica de fusión es usada incorporando los reflectores dentro de una longitud continua de fibra optica sin Gap (espacio) de aire, produciendo características más estables ópticas y mecánicas.

Cuando la luz láser es guiada dentro del sensor FFPI, una porción de la luz es reflejada desde cada reflector interno, generando un efecto de interferencia. La interferencia es creada constructivamente (reflexiones están en fase). Cuando las reflexiones están en fase el reflejo de salida está en su valor máximo. Cuando ellas están fuera de fase, un cambio de la fase de π radianes, la salida reflejada está en un mínimo. El cambio de fase es el resultado de cambios en el índice de refracción y/o cambios en la longitud de la cavidad del sensor con respecto a la longitud de onda de luz. Dependiendo de la cantidad que cambia el índice de refracción, ó cambio de la longitud de la cavidad del sensor debido a la perturbación, la potencia reflejada sería barrida a través de efectos de interferencia máxima y mínima.

Esta señal es procesada por una Unidad Acondicionadora de Señal (SCU) que determina la cantidad de perturbación. Por comparación de esta información con una cantidad conocida de perturbación la calibración constante para el sensor es derivada. Además los sensores FFPI son increíblemente sensibles (resolución debajo de 0.005 micras) y compactos, teniendo los siguientes atributos

- Rugosidades (Ruggedness), el sensor ha sido usado por años para medición dinámica en cilindros de presión, en artefactos de combustión interna
- Inmunidad a la interferencia electromagnética
- Intrínsecamente seguro, conveniente para el uso en ambientes peligrosos, por que no hay riesgos potenciales de chispas eléctricas

- Puede ser usado sumergido en fluidos, como agua, aceite, etc
- Puede ser usado a altas temperaturas, hasta los 400 °C
- Cableado de fibra optica, de los sensores hasta el SCU puede ser embalado hasta 7 millas sin necesitar un amplificador de señal

❖ **Beneficios de medir la fuerza**

¿Pero porqué monitorizar el desplazamiento del eje?, si nosotros investigamos los riesgos típicos encontrados en Turbo-maquinarias, nosotros podemos determinar que medición de la máquina tiene más sentido.

En Turbo-maquinarias los principales riesgos son:

- Riesgo por Fricción
- Riesgo por Fatiga
- Riesgo de desgaste de película de fluido en las partes del cojinete
- Riesgo de Inestabilidad

Las sondas de Proximidad pueden ser útiles evaluando el riesgo de fricción, si las sondas son instaladas en lugar adecuado. Sin embargo, ha habido casos donde los niveles de vibración medidos por sondas de proximidad fueron induciendo error debido a la localización de la sonda y la forma del modo de vibración de operación del rotor. Sí las sondas están colocados cerca de nodos, la amplitud medida no indicará cuando ocurra fricción. Para asegurar una medida más exacta se han hecho modos adicionales de formas de sondas, que serán instalados usualmente en el espacio medio (midspan) del rotor.

Para evaluar el riesgo de fatiga y el desgaste, se requiere de un sensor de fuerza. La fuerza actuante sobre los cojinetes, puede ser estimada si la dureza de los cojinetes y los valores amortiguados son certeramente conocidos. Como quiera que sea, estos

parámetros varían con la carga estática y las propiedades actuales precisas del soporte del alojamiento de cojinete son raramente conocidas y cambian con el tiempo. Además, son requeridos cálculos precisos, valores correctos de desplazamiento del eje. Entonces para calcular fuerzas en el cojinete se requiere asumir numerosas cosas.

¿Entonces por qué no se mide las fuerzas directamente?, hasta ahora no ha sido un medio práctico medir fuerzas en el cojinete directamente. Como sea, con el advenimiento del sensor FFPI, la medición de las fuerzas en el cojinete es ahora posible. Mediciones de fuerza hacen posible evaluar el riesgo de fatiga y desgaste. Teniendo también ambos datos de desplazamiento y fuerza, los coeficientes actuales del cojinete pueden ser extraídos analíticamente usando la siguiente relación entre desplazamiento y fuerza :

$$F(\text{vector cantidad}) = k.s.i + c.w.s.j$$

Donde “s” es el desplazamiento del eje, “k” es la rigidez directa y “c” la amortiguación directa. El conocimiento de la rigidez actual del cojinete y el valor de amortiguamiento puede ser extremadamente útil para determinar el riesgo de inestabilidad.

1.3 Unidades de medición de vibración

1.3.1 Desplazamiento

El desplazamiento de la vibración representa la distancia, y es utilizada preferentemente en máquinas de bajas revoluciones. El desplazamiento pico-pico es igual a la distancia total recorrida por el componente vibratorio. Debe ser medido con sensores de corrientes parásitas

medido : mils pico-pico (1mil=0.001”)

micrones pico-pico ($0.0001\text{cm}=0.000001\text{m}$)

1mm=40 mils (aproximadamente)

1.3.2 Velocidad

La velocidad de la vibración es la unidad más utilizada para propósitos generales de evaluación de máquinas de baja y media velocidad. El rango habitual en frecuencia es de 20Hz a 2KHz.

medido : pulg/seg rms ó pico

mm/seg rms

1.3.3 Aceleración

La aceleración es la relación de cambio de velocidad. Típicamente se mide la amplitud pico ó rms, siendo la más utilizada para evaluar altas frecuencias como las generadas por rodamientos y engranajes.

medido : Gs (1G = aceleración producida por la gravedad)

pulg/seg²

mm/seg²

La Tabla 1.1, muestra un resumen de las unidades de medición de vibración de tipo desplazamiento, velocidad y aceleración en los sistemas métrico e ingles.

TIPO DE MEDICION	INGLESA	MÉTRICA
DESPLAZAMIENTO	mils pico-pico	micrones pico-pico
VELOCIDAD	pulg/seg rms ó pico	mm/seg rms
ACELERACIÓN	Gpico pulg/seg ²	G rms ó pico mm/seg ²

Tabla 1.1 : Unidades de Medición

Desde que conocemos la relación matemática vista anteriormente entre el desplazamiento, velocidad y aceleración, el valor de los otros dos puede ser calculado con una calculadora simple, como es mostrado en la Fig. 1.14, si conocemos la frecuencia y una cualquiera de las tres medidas de tipo desplazamiento, velocidad ó aceleración.

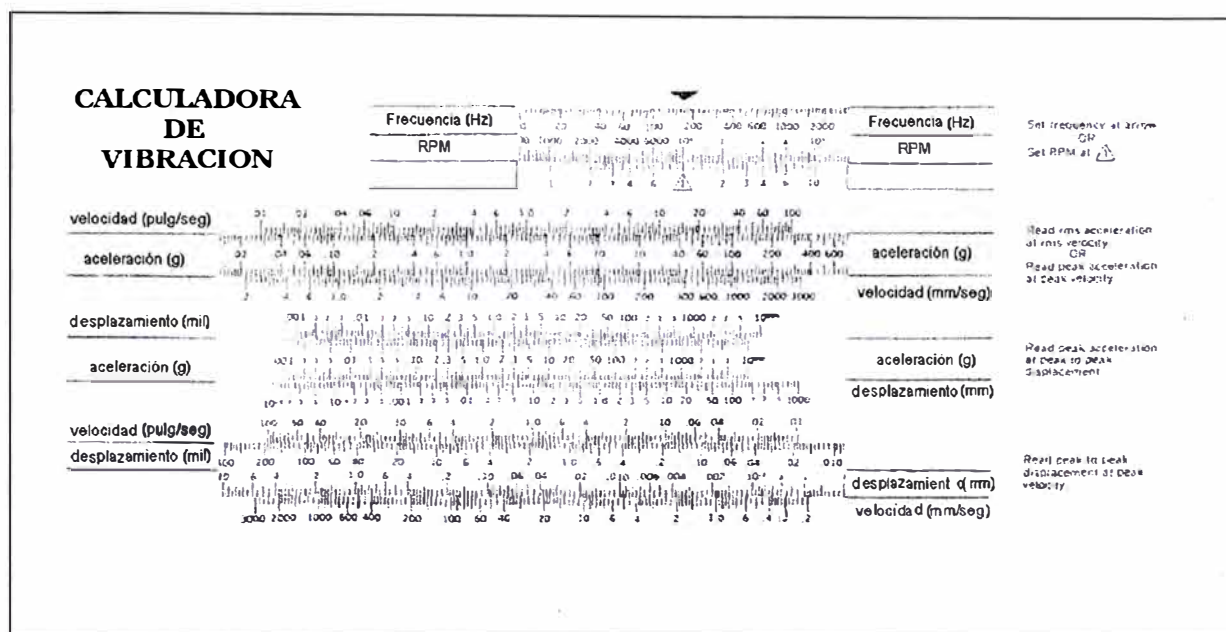


Fig. 1.14 Calculadora de vibración para determinar la relación entre desplazamiento, velocidad y aceleración

1.4 Turbina de Gas

1.4.1 Introducción

Las Turbinas de Gas Siemens son máquinas de un solo eje, de diseño de una sola carcasa. Son adecuadas para hacer funcionar generadores a velocidad constante en sistemas de centrales de carga base. Pueden usarse en ciclos combinados y aplicaciones de calefacción centralizada de barrios o ciudades.

Estas Turbinas de Gas son adecuadas para operar con combustible gaseoso (Gas Natural) y/o combustible líquido (Diesel 2). El proceso cíclico del sistema de Turbina de Gas es un proceso Joule-Brayton mostrado en la Fig. 1.15, comienza con

una compresión de aire ambiental a la presión de descarga del compresor; el calor de la combustión producto del combustible y del aire comprimido eleva la temperatura al valor más alto del proceso. Después de la expansión en la sección de la Turbina regresa a la presión ambiental pero a temperatura elevada. El gas de escape se libera hacia la atmósfera, de modo que el proceso se cierra. En el diagrama T-S tal proceso cíclico encierra una cierta área, la cual representa el trabajo útil específico de este proceso, mientras que el área bajo la línea atmosférica es equivalente a las pérdidas por escape.

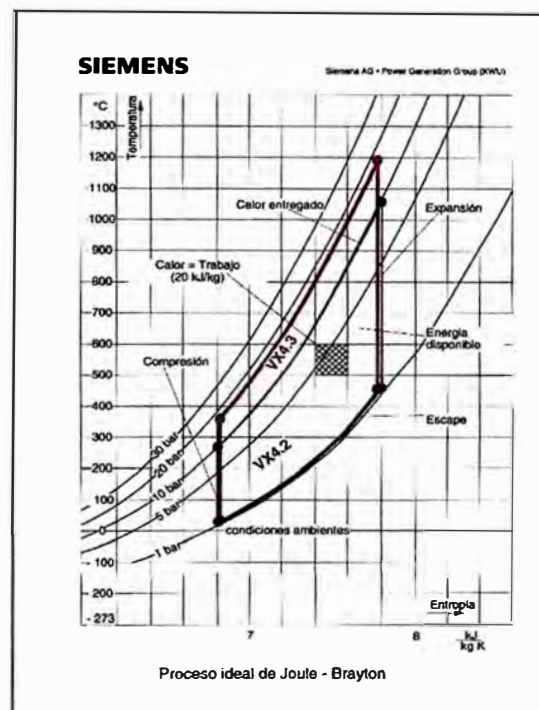


Fig. 1.15 Proceso ideal Joule-Brayton

1.4.2 Tareas del Sistema

La Turbina de Gas es un sistema que comprende los componentes que son necesarios para convertir calor en energía mecánica.

La Fig. 1.16 muestra el flujo de energía de una Turbina de Gas Siemens modelo V94.3A, cabe mencionar que la energía química y el calor son modos de energía de “bajo valor”, mientras que la energía giratoria y eléctrica tienen un “alto valor”. Esta

transformación de los modos de energía de un valor bajo a uno alto se “paga” tomando en consideración la eficiencia del proceso, es decir, que únicamente un tercio de la energía (combustible) química se convierte en energía eléctrica. La mayor parte restante se “pierde” en forma de gas de escape caliente. Sin embargo, una parte de esta pérdida puede recuperarse por medio de un ciclo de vapor de saturación.

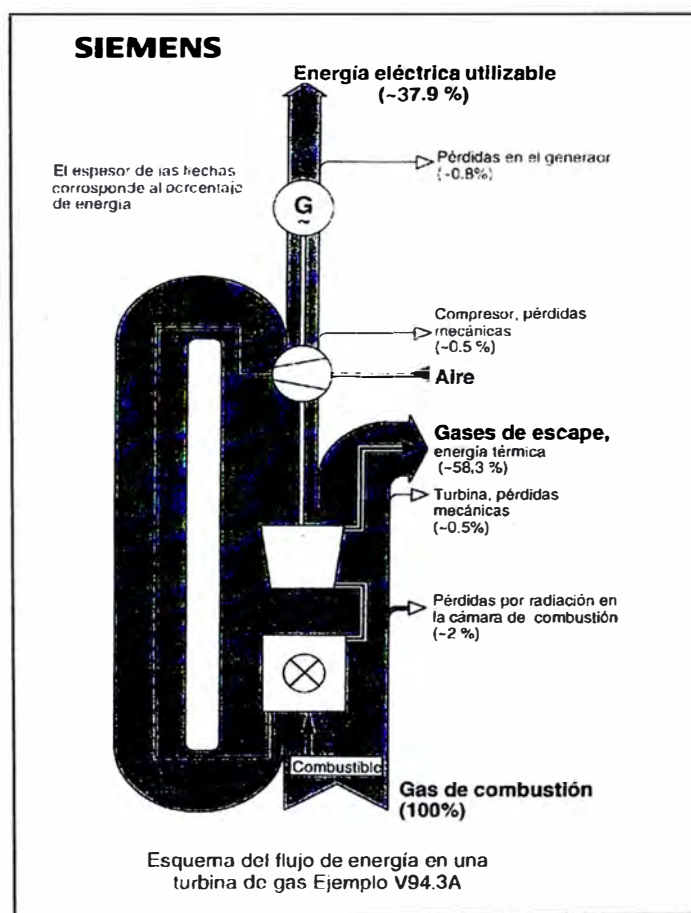


Fig. 1.16 Flujo de energía en una Turbina de Gas

En la Turbina de Gas la sección de la turbina está arreglada de modo que la energía, tanto del compresor como del generador, sea transmitida a un lado (al extremo frío) de la Turbina de Gas. Esto significa que el rotor entre la turbina y la sección del compresor transfiere más del doble de la energía del generador en forma de energía giratoria.

1.4.3 Descripción del Sistema

❖ Diseño del Sistema

La Fig. 1.17 muestra una vista general de una Turbina de Gas, donde el aire de succión entra al sistema de la Turbina de Gas en la entrada del compresor. El flujo de aire de succión es controlado por los álabes guía de posición variable.

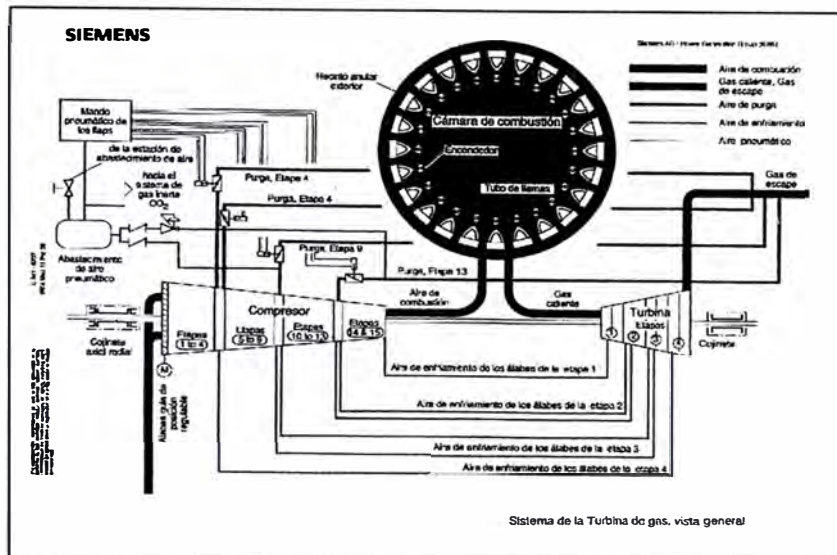


Fig. 1.17 Vista general de la Turbina de Gas

El compresor consiste de 15 etapas de álabes divididas en 4 secciones. Entre estas 4 secciones se encuentran arregladas las líneas de purga, las cuales se abren si la turbina opera a una velocidad que no sea la velocidad nominal de trabajo de 3,600 RPM (por ejemplo durante el arranque y la parada). Esos espacios también se usan para tomar aire para enfriar las secciones calientes de la turbina (de 4 etapas de álabes). Las válvulas de sangrado (Blow-off) que controlan las líneas de purga tienen actuadores neumáticos, los cuales usan el aire del compresor como fluido de trabajo. En el caso de que la Turbina de Gas se apague, el abastecimiento de aire debe ser mantenido por la estación de abastecimiento de aire.

El aire (de combustión) comprimido se recolecta en el recinto anular externo, el cual forma la cámara de combustión para 24 quemadores. En los quemadores el combustible Gas Natural y/o Diesel 2 se suma al aire y se quema. El gas

combustible fluye a través del tubo de llamas hacia los álabes guía de la primera etapa de la turbina y se expande aún más en la sección de la turbina. El gas combustible abandona la Turbina de Gas a través del difusor de escape, al cual las líneas del sistema de purga del compresor también están conectadas.

❖ **Disposición del Sistema**

El compresor y la turbina, los componentes principales de una Turbina de Gas de un solo eje, tienen un rotor común. Este es sostenido por dos cojinetes, los cuales se localizan fuera de la región presurizada. Estos proporcionan las bases para asegurar las cualidades de alineación apropiada constante y excelente funcionamiento.

1.4.4 Componentes principales de una Turbina de Gas

❖ **Rotor**

Comprende un número de discos, cada uno de los cuales contiene una rueda de álabes, y tres ejes huecos, los cuales se mantienen juntos por medio de una barra central de tracción pretensada (Fig. 1.18).

Para proteger la barra central de tracción contra la vibración por flexión los anillos de amortiguamiento están colocados en aquellas posiciones de la barra de tracción donde pueden esperarse las amplitudes de vibración por flexión más grandes. Ellos trabajan sobre la base de superficies de deslizamientos infinitamente pequeñas y de este modo disipan la energía vibratoria por medio de la fricción.

La carcasa del cojinete del compresor contiene un cojinete mixto (axial/radial) y un cojinete de empuje.

Los cojinetes son lubricados con aceite lubricante que es abastecido por el sistema de lubricación. En el caso de baja velocidad se suministra aceite de levante de alta

presión en el fondo de los armazones de los cojinetes(se corta cuando la velocidad es mayor a 600 RPM).

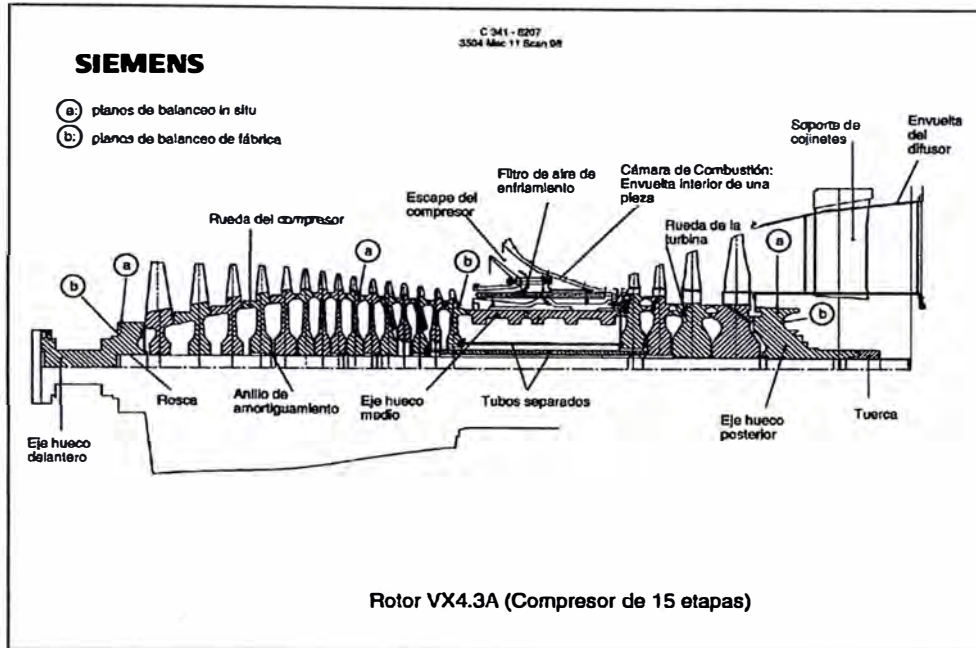


Fig. 1.18 Rotor de Turbina Siemens modelo V84.3A de 150 MW

En el extremo del compresor está instalado un mecanismo de giro hidráulico, que consiste de una turbina Pelton la cual trabaja sobre la base del flujo de aceite lubricante. La presión de las dos bombas de aceite lubricante de operación es transformada a velocidad por medio de 6 boquillas que se encuentran ubicadas en la parte superior del alojamiento del cojinete del compresor. Los chorros de aceite ejercen un impulso sobre los álabes que se encuentran montados al eje intermedio entre el compresor y el generador. De este modo, el rotor se hace girar a una velocidad de aproximadamente 120 RPM, el cual sirve para evitar el pandeo térmico del eje del rotor luego de una parada de la turbina y conseguir un enfriamiento uniforme del rotor evitando problemas de alta vibración en arranques sucesivos de la turbina (seteos de protección por vibración : alarma en 9.3mm/s y disparo en 14.7 mm/s).

❖ Compresor

La Turbina Siemens modelo V84.3A consta de 15 etapas de álabes para comprimir el aire del medio ambiente de 1 bar hasta aproximadamente 16 bar al final de la última etapa del compresor.

❖ Cámara de Combustión

Consiste de una cámara de llamas de forma anular y 24 quemadores (Fig. 1.19).

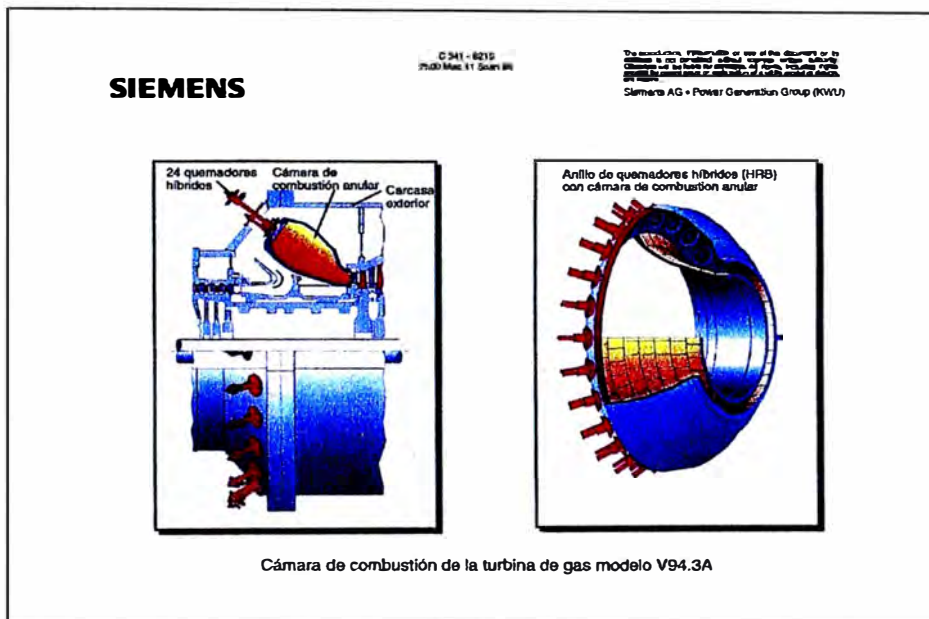


Fig. 1.19 Cámara de combustión de la Turbina de Gas

Siemens modelo V84.3A de 150 MW

La cámara de llamas es de un diseño de doble armazón y comprende una sección de núcleo de una sola pieza, la cual encierra el rotor, y una camisa de presión, la cual es dividida horizontalmente por una junta de envuelta y a través de la cual los quemadores se extienden hacia la región de combustión. Los blindajes térmicos, proporcionados sobre la superficie interna, protegen esas tres carcassas del flujo de gas caliente. Los 24 quemadores en la cámara de llamas de forma anular producen un patrón de temperaturas relativamente uniforme corriente arriba de la turbina.

❖ Turbina

La Turbina de Gas Siemens modelo V84.3A mostrada en la Fig. 1.20 posee 4 etapas de álabes móviles.

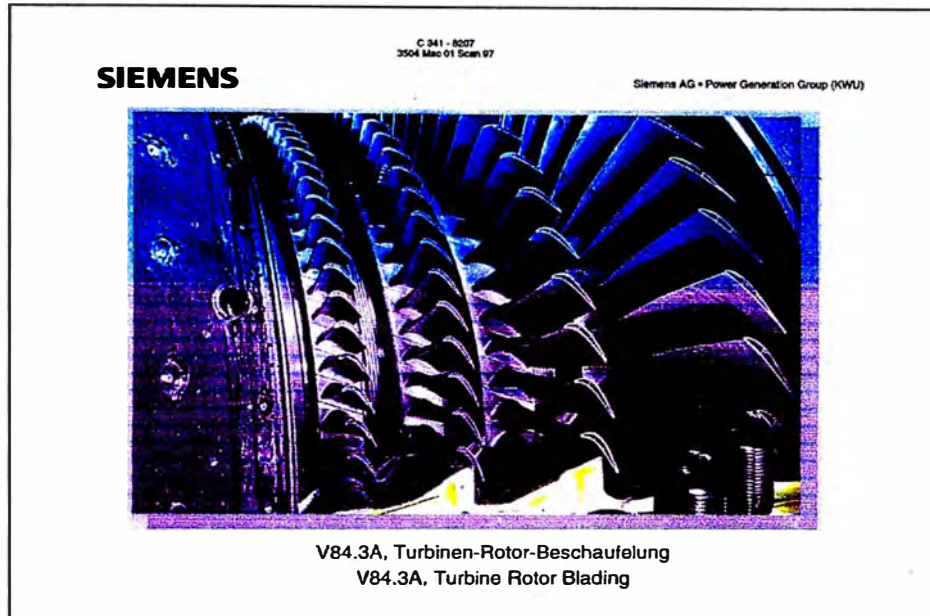


Fig. 1.20 Turbina de 4 etapas de álabes

1.4.5 Datos Técnicos

La Tabla 1.2, muestra los parámetros de diseño de una Turbina de Gas Siemens modelo V84.3A a condiciones ISO.

Los datos de operación se hacen a condiciones ISO y carga base (plena carga).

Las condiciones ISO son :

- Altitud : nivel del mar
- Humedad relativa del aire : 60%
- Presión : 1.013 bar
- Temperatura : 15 ° C

Parámetros de diseño de una Turbina de Gas Siemens modelo V84.3 A		
Velocidad	60	1/S
Intervalo de velocidad admisible	95..103	%
Potencia máxima admisible	200	MW
Combustible	Gas Natural	Diesel 2
Valor calorífico menor (KJ/Kg)	50,056	42,000
Temperatura entrada turbina (°C)	1,190	1,190
Potencia en el acoplamiento (MW)	170.5	166.3
Eficiencia de la turbina (%)	38.7	38.3
Caudal aire entrada al compresor (Kg/s)	440	440
Temperatura salida compresor (°C)	413.3	413.4
Factor de presión del compresor	16.8	16.7
Caudal combustible (Kg/s)	8,813	10,340
Caudal salida turbina (Kg/s)	448.8	450.3

Tabla 1.2 Parámetros de Turbina de Gas

Las dos últimas variables (temperatura y presión) son las que tienen mucha influencia sobre los valores de funcionamiento (potencia, eficiencia, etc), puesto que tienen un impacto sobre la densidad del aire de succión y de este modo sobre el gasto másico del compresor.

La Tabla 1.3, muestra la comparación de una Turbina en ciclo abierto y ciclo combinado, donde observamos que la eficiencia del proceso se eleva de 38% hasta 57.9% y la potencia eléctrica generada se eleva de 170 MW a 254 MW.

La Tabla 1.4, muestra un resumen de las características más importantes de cada uno de los componentes de una Turbina de Gas Siemens.

Comparación de una Turbina en ciclo abierto y ciclo combinado		
	Ciclo abierto	Ciclo combinado
Potencia eléctrica (MW)	170	254
Frecuencia (Hz)	60	60
Eficiencia (%)	38	57.9
Heat rate (Btu/Kwh)	8,980	5,890
Exhaust gas flow rate (Kg/s)	454	
Exhaust gas temperature (°C)	562	
Emisiones NOx (ppm)	< 25	

Tabla 1.3 : Turbina en ciclo abierto y ciclo combinado

Datos de componentes de Turbina				
	Rotor	Compresor	Turbina	Generador
Número de etapas	*	15	4	*
Peso (Tn)	72	260		41
Otros				200 MVA ,60 HZ , 3φ Cos(φ)=0.85 / 16Kv / 7,216 A

Tabla 1.4 : Componentes de Turbina

1.5 Sensor y tarjetas usadas para adquisición de vibraciones en Turbinas

Para la adquisición de vibraciones en la Turbina Siemens modelo V84.3A de 150 MW se usan equipos de la marca Vibro-Meter, que se detallan en la Tabla 1.5.

Nº	DESCRIPCIÓN	MODELO	MARCA
1	Sensor Acelerómetro piezoeléctrico	CA201	Vibro-Meter
2	Modulo acondicionador señal	IPC620	Vibro-Meter
3	Modulo separación galvánica	GSI130	Vibro-Meter
4	Modulo power supply	APF184	Vibro-Meter
5	Modulo procesador de vibración absoluta	UVC752	Vibro-Meter
6	Modulo visualizador analógico	PLD772	Vibro-Meter
7	Modulo convertidor U/I	ABB007	Vibro-Meter
8	Modulo de calibración	ACM215	Vibro-Meter

Tabla 1.5 : Equipos usados para adquisición de vibraciones

en Turbina Siemens

1.5.1 Módulo acondicionador de señal tipo IPC620

Convierte una señal de carga en una señal de corriente modulada, este es mostrado en la Fig. 1.21. Posee filtros RFI en la entrada y salida, que provee inmunidad efectiva frente a las interferencias RF y otras interferencias electromagnéticas. El acondicionador transmite la señal modulada al módulo de separación galvánica GSI130, el cual asegura una separación galvánica desde la diferencia de potencial de tierra a 4KV.

El acondicionador posee filtros pasa-bajos e integrador que posibilitan varias

opciones en el procesamiento de la señal antes de su transmisión.

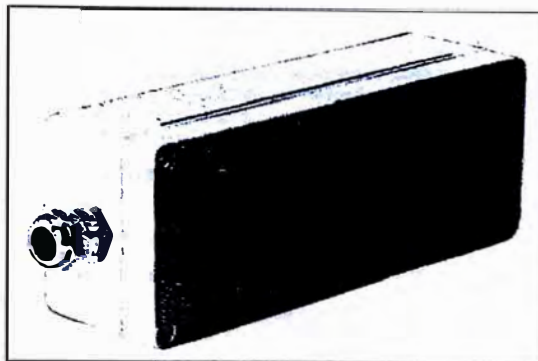


Fig. 1.21 Módulo acondicionador de señal tipo IPC620

❖ Especificaciones

Características de entrada :

- Transductor de adaptación : acelerómetros unipolares ó bipolares
- Sensitividad de entrada : 10 a 200pC/g
- Filtro RFI : red LC simétrica
- Diseño de circuito : amplificador simétrico de carga
- Banda dinámica : máx. 600gp a 10KHz

máx. 500gp de 10KHz a 20KHz

Características de transferencia :

- Banda de frecuencias (sin filtro LP) :
 aceleración : 2Hz a 20KHz (-3dB)
 velocidad : 3Hz a 20KHz (-3dB)
- Filtro LP :
 tipo : Tchebychev 2 polos
 frecuencias de corte : 200Hz a 20KHz(-1dB)

Características de salida

- Transmisión de señal :
 principio : modulación de corriente
 filtro RFI : red LC simétrica
 corriente de reposo : $12\text{mA} \pm 1\text{mA}$
- Salida de modulación de corriente :
 sensibilidad : $20 \mu\text{A/g}$ ó $50 \mu\text{A/g}$
 modo : aceleración ó velocidad(con integración)

Alimentación

- voltaje $18\text{Vdc} \pm 5\%$ (desde la unidad GSI)
- corriente $I_{\text{máx}} \leq 17\text{mA}$

1.5.2 Módulo separación galvánica GSI130

Se utiliza para alimentar transductores y acondicionadores (Fig. 1.22) , asimismo leer señales entregadas por ellos. Este módulo entrega una señal de voltaje proporcional a la corriente consumida por el acondicionador (Consumo $\leq 20\text{mA}$). Esta señal de voltaje es directamente disponible para analizar la señal del acondicionador.



Fig. 1.22 Módulo separación galvánica GSI130

❖ Especificaciones

voltaje de alimentación

- voltaje de alimentación : 24Vdc \pm 5 % desde la tarjeta procesadora

señal UVC752

- consumo : 60mA

- voltaje hacia acondicionador :

sin carga : 18 V \pm 1V

con carga 20mA : 16 V \pm 1V

- banda de paso :

DC a 10KHz \pm 5 % < -1dB para 20KHz

- separación galvánica entre la entrada y la salida : \geq 4KV rms

1.5.3 Módulo power supply APF184

El convertidor DC-DC tipo APF 184 (Fig. 1.23), se utiliza para abastecer sistemas electrónicos modulares con voltajes de entrada bajos. Las mayores ventajas son alta fidelidad, baja ondulación y excelente respuesta dinámica.



Fig. 1.23 Módulo power supply APF184

El voltaje de entrada esta aplicado directamente al filtro de entrada, el voltaje se limita en un convertidor avanzado y se transforma de 1 a 3 voltajes regulados de +15Vdc , -15Vdc y 24Vdc. El voltaje de salida está dirigido a un circuito de control

con líneas internas donde este voltaje se compara con un voltaje de referencia. Un transformador de control regula el voltaje cambiando la relación del convertidor avanzado.

❖ Especificaciones

Características de salida :

- voltajes de salida nominal ($U_o \text{ nom}$) : +15Vdc , -15Vdc , +24Vdc
- corriente de salida máx. ($I_o \text{ máx}$) : +1.5 A , -1.0 A , +0.6 A
- estabilidad de voltaje de salida U_o a plena carga : $\pm 0.6\%$
- limitación de corriente de salida 1.1 * ($I_o \text{ máx.}$)
- corriente de cortocircuito de salida 1.3 * ($I_o \text{ máx.}$)
- protección contra sobrevoltaje de salida 1.3 * ($U_o \text{ nom}$)

Características de entrada :

- gama de voltajes de entrada ($U_i \text{ nom}$) : 14...70 VDC
- eficiencia : 75 % (mín)

1.5.4 Módulo procesador de vibración absoluta UVC752

Se utiliza para procesar señales de vibración absoluta (Fig. 1.24). La vibración absoluta se mide generalmente con transductores sísmicos sobre cojinetes de máquina ó sobre estructuras metálicas. Esta tarjeta puede adaptarse a acondicionadores de señal de varios voltajes.

Posee dos canales de medición independientes , los cuales están equipados con amplificadores de entrada y salida ajustables para señal AC y DC.

Además, dos circuitos “amplificador / integrador” permiten escoger integración doble para expresar señales de vibración AC en modo velocidad ó desplazamiento.

Los rectificadores que posee son circuitos de alta precisión que permiten medir el valor eficaz “RMS” real de señales de vibración y dan la correspondiente señal DC para el monitoreo.



**Fig. 1.24 Módulo procesador de vibración
absoluta UVC752**

El procesador de vibración está diseñado para adaptar el detector de nivel y la tarjeta visualizadora analógica PLD772 para el monitoreo de vibración de doble canal.

La tarjeta calibradora ACM215, puede usarse para inyectar una señal de calibración en los circuitos de entrada.

Posee un conmutador en el panel frontal que permite elegir la lectura de señales de vibración en canal 1 ó canal 2 en un visualizador. Asimismo estas señales de vibración están disponibles en los conectores BNC a prueba de corto-circuito para conexión a un osciloscopio, un analizador de espectro u otros instrumentos de análisis de señal.

❖ **Especificaciones**

Características de entrada :

- transductor adaptante : todo sistema transductor sísmico
- diseño de circuito : amplificador asimétrico de entrada
- voltaje : 0 a ± 15 AC / DC protegido

- impedancia : 100 k Ω
- sensibilidad : 20 ó 50 mV/g
- bloqueo de integrador : 1.5 seg. para velocidad y
3 seg. para desplazamiento

Características de transferencia :

- banda de frecuencias (sin filtro) :
 aceleración 0.5Hz (-3dB) a 20KHz (-3dB)
 velocidad 1Hz (-3dB) a 20KHz (-3dB)
 desplazamiento 3Hz (-3dB) a 20KHz (-3dB)
- error lineal : $\leq 1 \%$
- circuito rectificador : rectificador de valor raíz cuadrada media real
- calibración : RMS, pico ó medio
- tiempo de respuesta : 400 mseg
- función de transferencia :

$$U_{out} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_{in}^2 \cdot dt}$$

Características de salida

- voltaje AC : mV/unidad ó 10Vp-p para FSD
- modo : aceleración + velocidad + desplazamiento
- impedancia : baja $\leq 10\Omega$ y 1K Ω
- voltaje DC : 0 a 10V para FSD
- conectores BNC

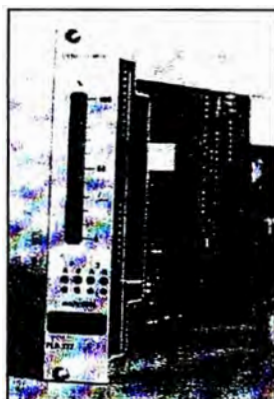
Otras :

- voltaje de alimentación $\pm 15 \text{ Vdc} \pm 5\%$

- corriente de alimentación : máx. 100 mA
- suministro para transductores :
 voltaje máx. 10 Vdc
 corriente : 0.5 ó 4 mA a prueba de cortocircuito
- posee circuitos de autocomprobación “Ok system”

1.5.5 Módulo visualizador analógico PLD772

Es un módulo de doble canal que cumple todos los requisitos de visualizador, monitoreo y alarma (Fig. 1.25). Este módulo basado en microprocesador con interfaces analógicas y digitales, dos visualizadores versátiles, 4 led indicadores de alarma.



**Fig. 1.25 Módulo visualizador
analógico PLD772**

Ambos visualizadores analógico y digital permiten controlar varios parámetros físicos como posición, vibración, presión ó temperatura. Esos parámetros pueden ser representados con señales unipolares ó bipolares. Un histograma grande y brillante asegura una visualización a primera vista, y un visualizador alfanumérico de 4 dígitos permite leer el valor exacto en unidades de ingeniería.

Este módulo permite realizar el monitoreo de dos canales con calibración individual ó común, la tercera entrada permite representar parámetros auxiliares y de monitoreo.

Los correspondientes niveles de “alarma(alert)” y “peligro(danger)” se representan en contraste en el histograma con la selección de la lectura de canal. Cuando se sobrepasa el primer nivel de alarma, el histograma se enciende y los indicadores led mostrarán el estado de alarma. Posee salidas de relé de alarma de todos los detectores de nivel.

❖ **Especificaciones**

Características de entrada

- entradas analógicas 3 entradas de 0 a $\pm 10\text{Vdc}$
- impedancia de entrada : $\geq 100\text{K}\Omega$
- filtro LP : 50 Hz (-3 dB), 6 dB/Octava

Características de salida :

- salidas de corriente : 4-20mA en 500Ω , con entrada 0 a +10Vdc
- salidas de relé : transistor de colector abierto (máx. 25V y $I_c=40\text{mA}$)
- salidas digitales : transistor de colector abierto (máx. 25V y $I_c=40\text{mA}$)

Características de equipo

- convertidor A/D
 integración de doble inclinación, 30 conversiones/seg
 resolución : 12 bits, más segundo y sobredistancia
 precisión : 0.05% de lectura las bandas de voltaje DC
- Microprocesador : CPU Z80, 8-bit a 6MHz, con 8KB de RAM
- RAM estática No-Volátil : con memoria EEPROM, 10,000 ciclos de almacenaje
 (retención de datos de 100 años)
- visualizador lineal (0-100%): histograma verde fluorescente de vacío
 resolución : 51 segmentos

precisión : 3% de escala completa

- visualizador digital : 4 caracteres alfanuméricos rojos

escala completa : máx. FSD = 999

precisión : 0.05% de escala completa

- indicadores de alarma : dos Led's por canal indican el estado de alarma

alert : led ambar, indica primer nivel sobrepasado

danger : led rojo, indica primer segundo sobrepasado

- alimentación :

voltaje $\pm 15\text{Vdc} \pm 5\%$

corriente +130 mA, -130 mA

1.5.6 Módulo convertidor U/I ABB007

Es un módulo que tiene espacio para 4 sub-módulos conectables tales como filtros LP, HP, BP, rectificadores (tipo SMVR, SRMS ó STPR) ó convertidores voltaje/corriente (Tipo SVCC). Cuando se usa en sistemas con módulos procesadores u otros módulos, este hace posible un post-procesamiento de señales, por ejemplo : una señal de vibración filtrada en dos bandas de frecuencias ó una señal de voltaje 0-10Vdc convertida en una salida de 4-20mA.



Fig. 1.26 Módulo convertidor U/I ABB007

nota :

- SMVR , sub-módulo rectificador de valor medio
- SRMS , sub-módulo rectificador de valor RMS
- STPR , sub-módulo rectificador de valor pico

❖ Especificaciones

Características físicas :

- entrada : hasta 20 señales de entrada
- salida 1 a 4 salidas
- alimentación del circuito : $\pm 15 \text{ Vdc} \pm 5 \%$
- sub-módulos : máximo 4

1.5.7 Módulo de calibración ACM215

Por medio de un conmutador de teclas situado en el panel frontal del módulo ACM215 (Fig. 1.27), pueden inyectarse dos señales simuladas ajustables de vibración en el circuito de entrada del procesador UVC752. La frecuencia (f_1 y f_2) y el nivel de entrada de la señal de calibración pueden establecerse con un interruptor y potenciómetro que permiten comprobar los componentes de canal de control.

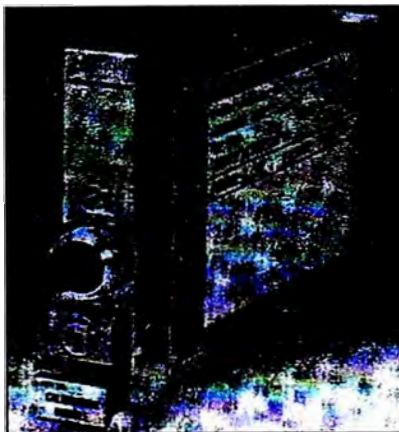


Fig. 1.27 Módulo de calibración ACM215

El nivel puede leerse en el módulo indicador. En un sistema de control de vibración computarizado, f1 y f2 pueden inyectarse automáticamente como una señal de calibración.

❖ **Especificaciones**

Características y controles :

- selector de frecuencia : conmutador f1/f2
- señal de comprobación f1+f2 : Onda seno
- frecuencia de comprobación – f1 (HZ) :
55,60,70,80,90,100,125,175,200,250,300,350,400,450,500
- frecuencia de comprobación – f2 (HZ) :
500,750,1000,1500,2000,2500,3000,4000,5000
- nivel de calibración : potenciómetro de 10 vueltas (10K Ω)
- precisión : 1%
- amplitud : 0-100% de FSD
- modo : para corresponder a características de procesador UVC752
- comprobación de calibración : conmutador operación / calibración
- alimentación :
voltage : $\pm 15\text{Vdc} \pm 5\%$
corriente : +10mA , -10mA

CAPÍTULO II

ANÁLISIS VIBRACIONAL

2.1 Fundamentos

Las vibraciones de máquinas se producen por el movimiento oscilante de los componentes mecánicos (alrededor de su punto neutro) y como resultado de la reacción a fuerzas internas ó externas.

La Fig. 2.1, muestra los planos posibles de medición de vibración : axial y radial (horizontal y vertical).

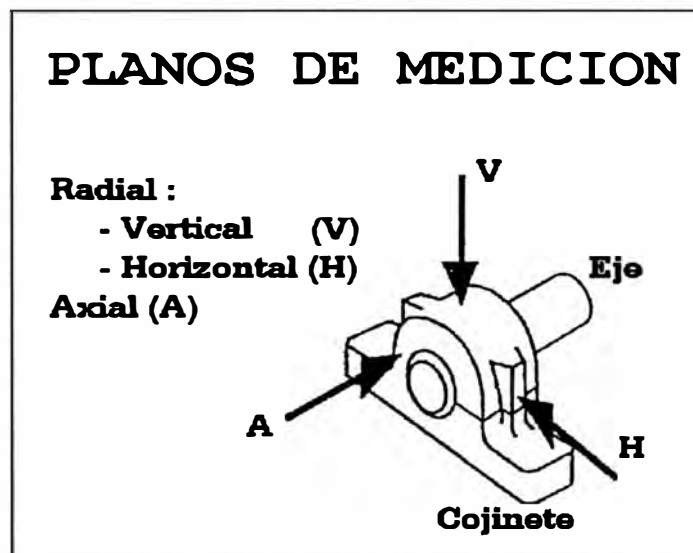


Fig. 2.1 Planos de medición de vibración

Se mide la vibración de los componentes de la máquina ó de la estructura, comparándose luego el nivel de vibración con su valor normal. Esto indica el estado actual de la máquina y su evolución en el tiempo. Si el nivel de vibraciones aumenta,

normalmente hay avería.

La Fig. 2.2, muestra un sistema de instrumentación de medición de vibración compuesto por el sensor, amplificador de carga, acondicionador, registrador y visualizador.

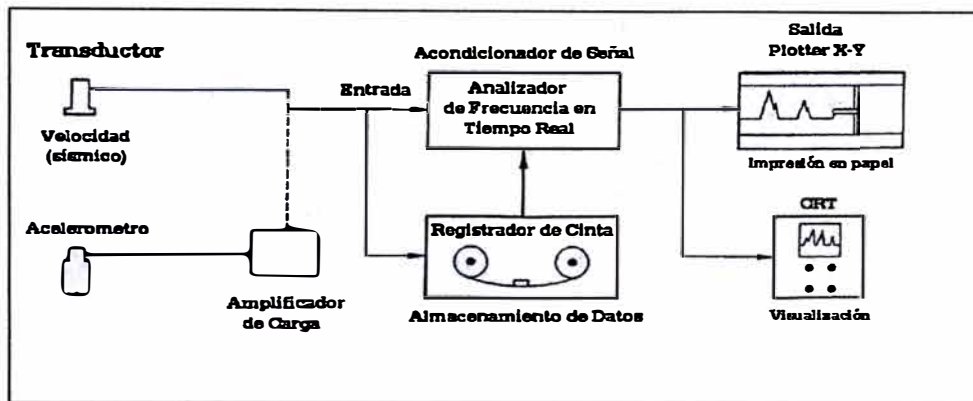


Fig. 2.2 Sistema de instrumentación de medición vibración

Cada problema mecánico ó defecto genera vibraciones en forma particular. Usamos herramientas de análisis (FFT) para investigar el tipo de vibración, y de esta manera identificar el defecto y su causa raíz. Corrigiendo esta evitaremos que el problema se repita.

Cuando se analizan las vibraciones, hay dos componentes de la señal que deben ser observadas en primera instancia : su amplitud y su frecuencia.

La amplitud es la magnitud de la señal vibratoria, e indica la severidad de la falla.

Cuando aumenta esta , mayor es el problema. La amplitud depende del tipo de máquina y es siempre relativo al nivel de vibración de una máquina “buena” y “nueva”.

La frecuencia es el número de veces que se repite el ciclo en un periodo de tiempo determinado. Con la frecuencia a la cual ocurre la vibración, nosotros podemos determinar claramente el tipo de falla (ciertos tipos de fallas típicas ocurren a ciertas frecuencias); determinando así que lo está causando y tomar acción para corregir el problema.

2.2 Definición de los estados de los equipos

2.2.1 Estado bueno (B)

Equipo típico de un buen balanceo, alineado y conservado al que deberán realizarse chequeos periódicos.

2.2.2 Estado normal (N)

Equipo típico donde se inician probables fallas mínimas, se deberán chequear periódicamente vigilando incrementos en los niveles de vibración.

2.2.3 Estado tolerable (T)

Probables fallas que se pronostican en el equipo de manera que se pueda realizar análisis vibracional para identificar el problema. Hacer un programa para posible intervención.

2.2.4 Estado inadmisibles (I)

Equipo típico con una vibración severa, potencialmente peligrosa, se debe efectuar de inmediato el análisis detallado de vibración para identificar el problema, se recomienda que estos equipos deben ser intervenidos a la brevedad posible para evitar fallas durante su operación.

2.3 Evaluación de la medición de amplitud de vibraciones

Cuatro principios son usualmente usados para evaluar los valores globales de vibraciones

- Norma ISO 10816

Se comparan los valores con los límites establecidos en la Norma ISO 10816.

- Seguimiento de tendencia

Se compara el valor corriente con los obtenidos en un periodo de tiempo. El programa para registrar los valores de vibraciones provee facilidades para el ploteo de tendencias.

- Comparación con el espectro de referencia (baseline comparison)

- Comparación con máquinas similares

Mide varias máquinas del tipo similar, bajo las mismas condiciones y juzgue los resultados por comparación.

Si es posible, utilice las cuatro opciones para evaluar el estado de una máquina. El seguimiento de tendencia siempre debe realizarse.

2.3.1 Norma ISO 2372

Esta Norma se muestra en la Tabla 2.1 y se aplica para mediciones de vibración de tipo velocidad en mm/seg.

2.3.2 Norma ISO 10816

Esta norma reemplaza a la conocida 2372, refiriéndose a los valores aconsejados de vibraciones tomadas en las partes no rotativas, según la Tabla 2.2 para mediciones de vibración de tipo velocidad en mm/seg.

2.3.3 Norma VDI 2059

Especifica los límites para un comportamiento aceptable, alarma y parada para mediciones de vibración de tipo desplazamiento (μm).

Los límites de vibración son los siguientes

A: Límite de comportamiento aceptable de vibración

$$b = \frac{3,600}{\sqrt{RPM}} \text{ (}\mu\text{m)}$$

B: El punto de ajuste para la alarma de vibración

$$b = \frac{6,750}{\sqrt{RPM}} \text{ (}\mu\text{m)}$$

C: El punto de ajuste para la parada

$$b = \frac{9,900}{\sqrt{RPM}} \text{ (}\mu\text{m)}$$

La Fig. 2.3, muestra los niveles de vibraciones aceptables (A) así como los de alarma (B) y parada (C) para diferentes velocidades del eje, en unidades de desplazamiento de vibración (μm).

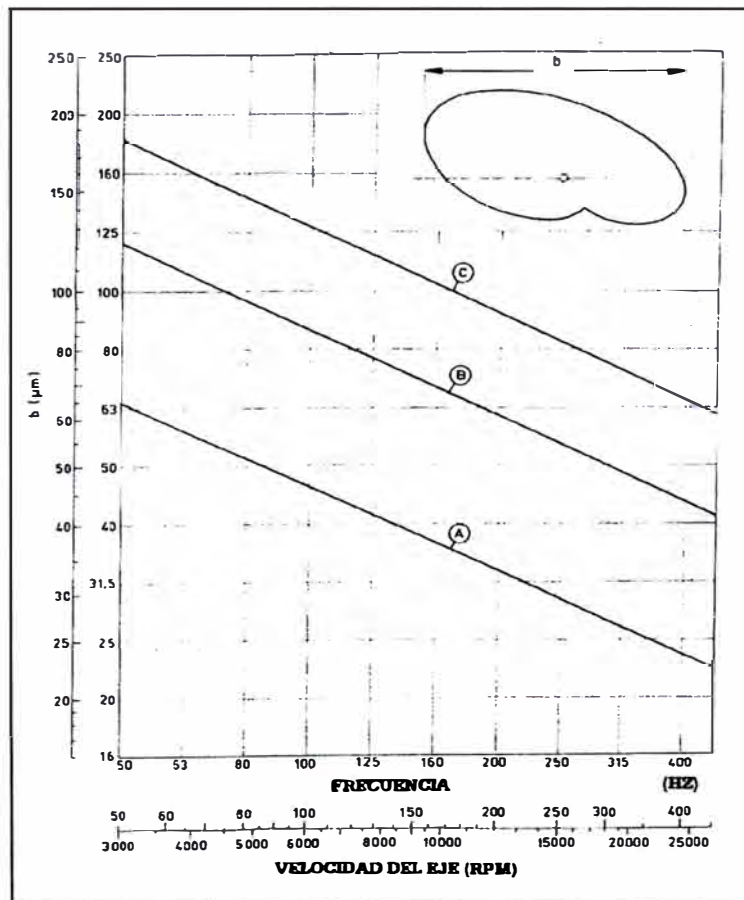


Fig. 2.3 Vibraciones admisibles del eje

VELOCIDAD RMS

(mm/s)

45	45	45	45	45
28	INADMISIBLE	INADMISIBLE	INADMISIBLE	INADMISIBLE
18				18
11.2			11.2	TOLERABLE
7.1		7.1	TOLERABLE	7.1
4.5	4.5	TOLERABLE	4.5	NORMAL
2.8	TOLERABLE	2.8	NORMAL	2.8
1.8	1.8	NORMAL	1.8	BUENO
1.12	NORMAL	1.12	BUENO	
0.71	0.71	BUENO		
0.45	BUENO			
0.28	*	**	***	****
0.18	0.18	0.18	0.18	0.18

Tabla 2.1 Norma ISO 2372

donde :

* Máquinas pequeñas hasta los 15 KW

** Máquinas medianas de 15-75 KW ó sobre los 300 KW con cimentación especial

*** Máquinas grandes con cimentación rígida y con frecuencia natural, máquinas veloces

**** Máquinas grandes con alta velocidad de operación, cimentación con frecuencia natural (Turbomáquinas)

GRUPO DE MAQUINA		RANGO DE EVALUACION mm/s (rms)			
VDI	ISO	BUENO	NORMAL	ADMISIBLE	NO ADMISIBLE
K	I	< 0.7	0.7 a 1.8	1.8 a 4.5	> 4.5
M	II	< 1.1	1.1 a 2.8	2.8 a 7.1	> 7.1
G	III	< 1.8	1.8 a 4.5	4.5 a 11	> 11
T	IV	< 2.8	2.8 a 7.1	7.1 a 18	> 18

Tabla 2.2 Norma ISO 10816

donde :

Grupo K : Máquinas pequeñas hasta los 15 KW, montaje rígido

Grupo M : Máquinas medianas de 15 a 75 KW, montaje rígido

Grupo G : Máquinas grandes, montaje rígido

Grupo T : Turbo-Máquinas, montaje elástico.

2.4 Interpretación de Espectros

Una máquina de rotación en operación continua genera vibraciones complejas. El carácter de estas vibraciones es una mezcla compleja de varias frecuencias las cuales están estrechamente relacionadas para las diferentes funciones de los componentes de la máquina. Estas frecuencias de vibración son usualmente una función de la frecuencia de rotación de la máquina, ó múltiples de ella, y son útiles para resolver algunos problemas de vibración. Algunas de las causas más comunes y características de problemas de vibración en instalaciones de turbinas de combustión son listadas en la Tabla 2.3.

2.4.1 Desbalance (Unbalance)

Una fuente de vibración significativa en las Turbinas de Combustión de Gas es el desbalance. Este desbalance normalmente es causado por alguna falla dentro de la máquina que cambia las características de vibración de operación normal de la máquina y hace posible aislar e identificar la fuente. La amplitud de las lecturas de vibración son proporcionales a la cantidad de desbalance y la frecuencia es la misma que la velocidad rotacional de la máquina. Por ejemplo un rotor desbalanceado en una máquina de 3,600 r.p.m. tendrá una frecuencia de vibración alta de 3,600 r.p.m. ó 60 ciclos por segundo.

2.4.2 Desalineamiento (Misalignment)

Desalineamiento de acoplamientos, ejes y cojinetes resulta en indicaciones de vibración axial muy altas. Este desplazamiento axial puede ser como 150% del desplazamiento horizontal ó vertical y ocurre a dos veces la velocidad de rotación de la máquina.

Esto ocurre más comúnmente sobre acoplamientos del generador con carga, acoplamientos de engranaje con carga y accesorios del acoplamiento de engranaje. Una carencia de lubricación adecuada en algunas instalaciones de acoplamiento resultará en el mismo tipo de características de vibración como desalineamiento.

2.4.3 Eje arqueado (Bowed Shaft)

Un eje ó rotor arqueado puede resultar de un inapropiado enfriamiento. La vibración resultante de esto será generalmente axial a una ó dos veces la frecuencia de rotación. Las vibraciones de este tipo usualmente disminuirán bajo operación, si esta arranca y acelera a velocidad sin disparo.

2.4.4 Azote de aceite (Oil Whip)

Una condición conocida como azote de aceite podría tener lugar en la funda de cojinete cargado ligeramente. Esta inestabilidad es reflejada en la frecuencia de vibración cercana, pero siempre ligeramente inferior que, la mitad de la frecuencia del eje actual. Azote de aceite es básicamente un problema de cojinete y debería ser corregido en el cojinete.

2.4.5 Desgaste mecánico (Mechanical Looseness)

La vibración debida a desgaste mecánico de acoplamiento con un ligero

desalineamiento de acoplamientos ó cojinetes generalmente ocurre a dos veces la frecuencia de rotación de la máquina. Las causas son fuerzas rotacionales desbalanceadas y cargas de torque cambiantes, siendo el mismo tipo de vibración característico creado por excesiva tolerancia(clearances) ó separación de cojinete.

Causas y características de problemas de vibración		
causa común	eje de mayor vibración	frecuencia nominal de vibración
Desbalance (Unbalance)	vertical	una por revolución
Desalineamiento (Misalignment)	axial	dos por revolución y múltiples bajos
Cojinetes (Bearings)	axial ó vertical	alta frecuencia 4 – 85 por revolución
Engranajes (Gears)	axial ó vertical	número de dientes por r/min
Eje arqueado (Bowed Shaft)	axial	una ó dos por revolución
Rozamientos (Rubs)	vertical	alta frecuencia 30 – 65 por revolución
Desgaste mecánico (Mechanical Looseness)	axial ó vertical	dos por revolución
Azote de aceite (Oil Whip)	vertical	poco menos que $\frac{1}{2}$ r/min del eje
Resonancia (Resonance)	vertical	velocidades críticas de la Turbina
Pulsación de la frecuencia (Beat Frequencies)	vertical	fluctuación periódica

Tabla 2.3 : Causas y características de problemas de vibración

2.4.6 Resonancia (Resonance)

Cada parte de la turbina de combustión, así como también la misma turbina de combustión, tiene una frecuencia de resonancia. La sincronización de varias de estas frecuencias resulta en un nivel de vibración alta a algunas velocidades de la máquina. Esto está referido como velocidades críticas y la vibración a estas velocidades decrecerá con un incremento ó decrecimiento en la velocidad de la máquina.

Una turbina de combustión de gas nunca debe ser operada en una condición de velocidad resonante ó crítica. Si estos puntos de velocidad crítica están dentro del rango de operación normal, ellas deben ser pasadas rápidamente para prevenir ó reducir posibles daños de vibración a la máquina.

CAPÍTULO III

PROCESAMIENTO DE DATOS

3.1 Simulación de señales de vibración usando Matlab

3.1.1 Programa “simula.m”

❖ Descripción

Sabemos que todo movimiento vibratorio resultante puede ser expresado matemáticamente por una suma finita de diferentes movimientos armónicos simples (MAS), donde cada MAS es una señal senoidal ($S[i]$) con su respectiva amplitud ($A[i]$), frecuencia ($F[i]$) y fase ($P[i]$) expresado de la manera siguiente:

$$S[i] = A[i] * \text{sen}[2 * \pi * F[i] * t + P[i]]$$

La finalidad del programa “simula.m” justamente es generar esta señal resultante de una suma finita de “ns” señales senoidales ingresadas :

$$V[t] = \sum_{i=1}^{ns} S[i]$$

Para eso el programa solicita el ingreso del tiempo de muestreo “ts” y del tiempo final “tf” hasta donde se evaluará la suma finita y verifica que $0 \leq ts \leq tf$.

También se ingresa las señales senoidales, con sus respectivas amplitudes, Frecuencias y Fases. El programa restringe que las frecuencias a ingresarse cumplan

con el Teorema de Nyquist de muestreo $F[i] \leq fs / 2$, donde “fs” es la frecuencia de muestreo $fs=1/ts$.

Las señales senoidales se evalúan en el rango de $[0 , tf]$ cada “ts” segundos para obtener la suma finita de señales senoidales y obtener la señal resultante cuyos muestras se almacena en un archivo llamado “vibracion.m”, para luego aplicarle la FFT y obtener su espectro de frecuencia mediante el programa “turbina.m” en Matlab. Además este programa ofrece la opción de visualizar un reporte final con los datos ingresados : nombre de Archivo guardado, tiempo de muestreo, tiempo final de evaluación, número de muestras guardadas, la cantidad de señales ingresadas y sus datos de amplitud, frecuencia y fase. También muestra la gráfica en el tiempo de la señal resultante y la gráfica de amplitud vs frecuencia de cada una de las señales ingresadas.

Con el programa “simula.m” trataremos de simular algunos espectros característicos de fallas que se presentan en turbinas de acuerdo a la Tabla 2.3 vista anteriormente.

❖ Diagrama de flujo

El diagrama de flujo para el programa “simula.m”, es mostrado en la Fig. 3.19.

❖ Contenido

El contenido del programa está en el Anexo B.

❖ Ejecución

La ejecución del programa “simula.m” se realiza desde la línea de comandos de Matlab digitando el nombre del archivo como se muestra en la Fig. 3.1.

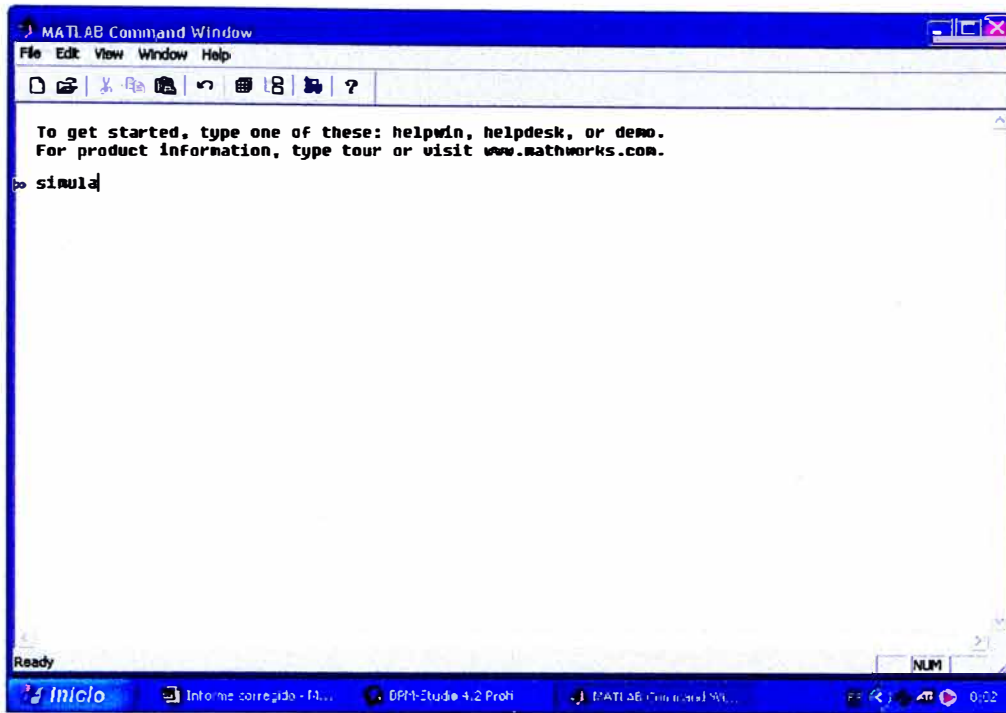


Fig. 3.1 Ejecución del programa “simula.m”

La Fig. 3.2 es un pantalla informativa de cómo el programa genera la señal resultante de una suma finita de señales senoidales con sus respectivas amplitudes, frecuencias y fases.

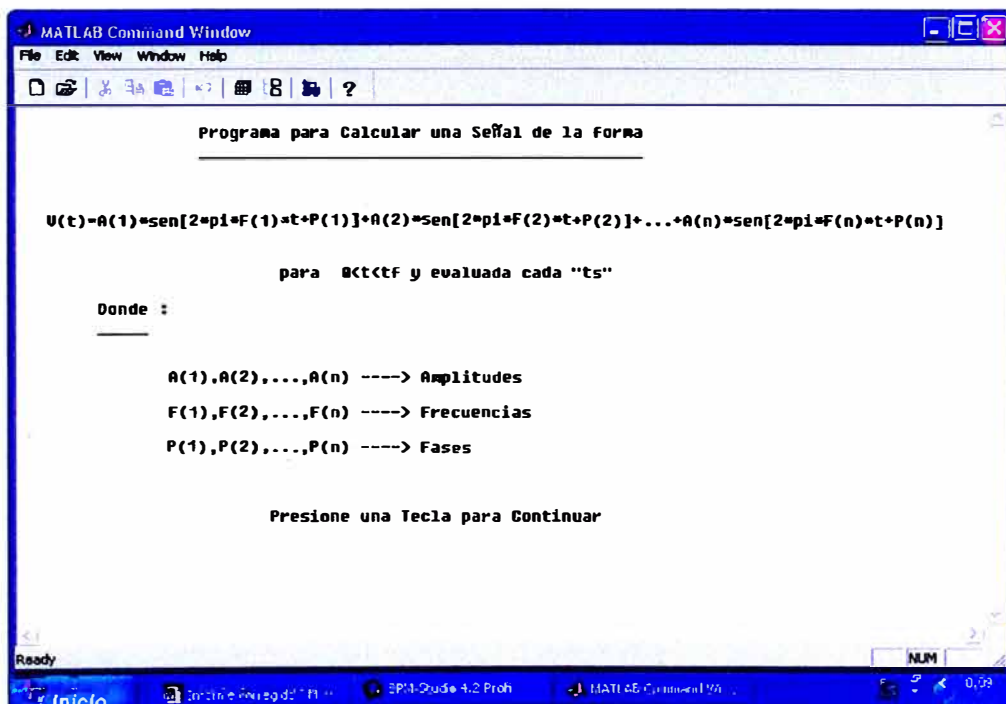


Fig. 3.2 Pantalla informativa

La Fig. 3.3 muestra el ingreso del tiempo de muestreo “ts” y tiempo final “tf” de evaluación de la señal resultante.

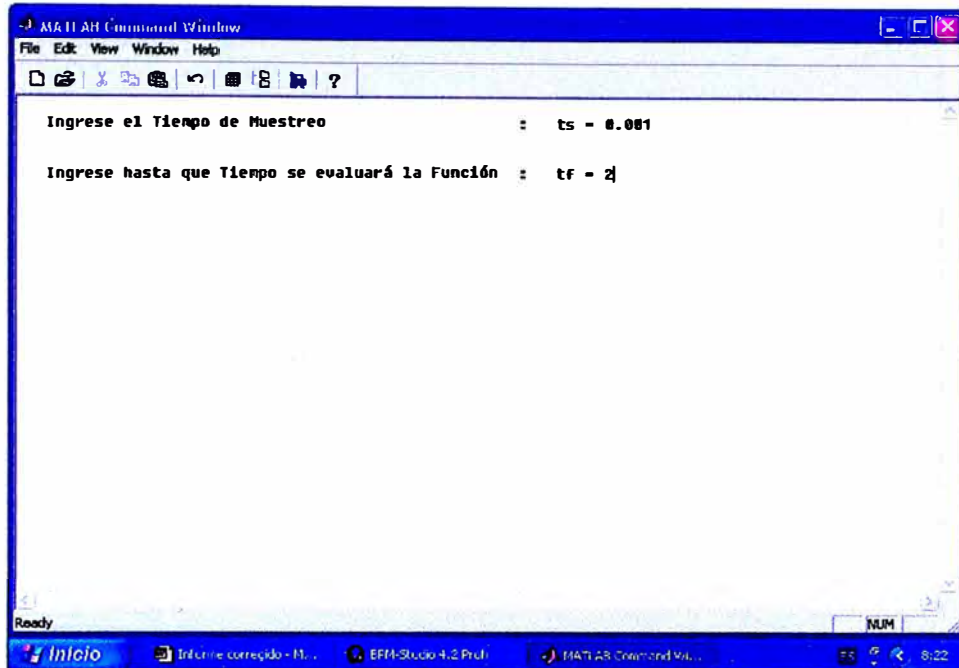


Fig. 3.3 Ingreso de “ts” y “tf”

La Fig. 3.4 muestra el ingreso de los datos de la “primera señal” : frecuencia, amplitud, y fase.

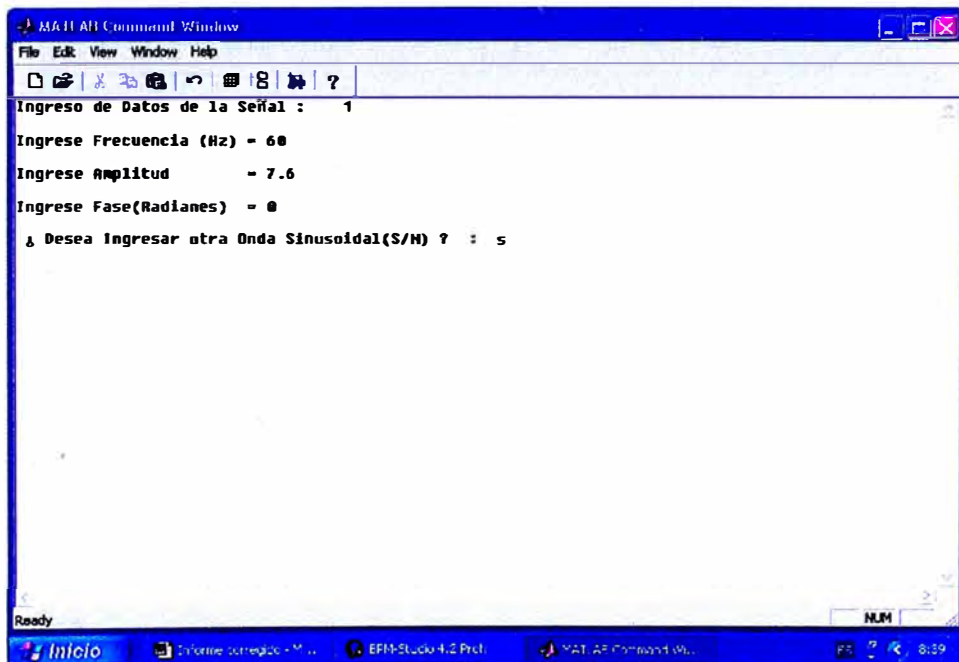


Fig. 3.4 Ingreso de los datos de la “primera señal”

La Fig. 3.5 muestra el ingreso de los datos de la “segunda señal” frecuencia, amplitud, y fase.

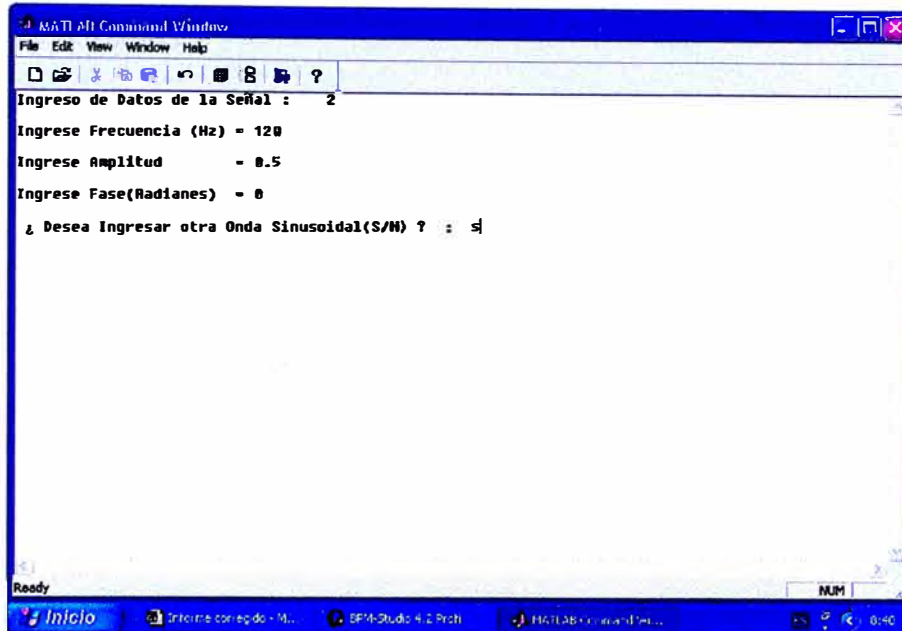


Fig. 3.5 Ingreso de los datos de la “segunda señal”

La Fig. 3.6 muestra el ingreso de los datos de la “tercera señal” (última) : frecuencia, amplitud, y fase. Además se muestra en pantalla la cantidad de datos guardados y si se desea visualizar el reporte final.

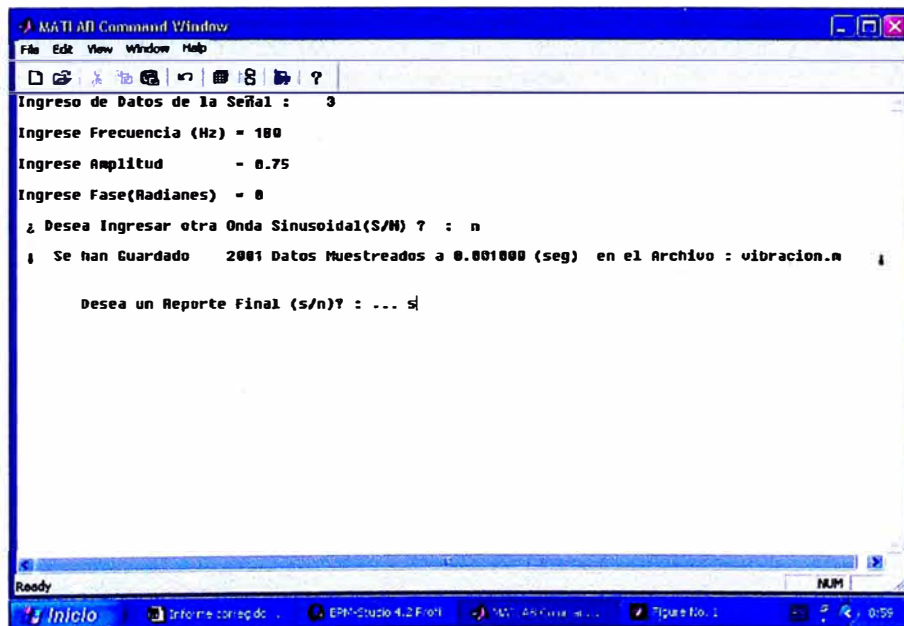


Fig. 3.6 Ingreso de los datos de la “tercera señal”

La Fig. 3.7 imprime en pantalla los resultados obtenidos señal resultante en el tiempo y sus componentes de frecuencia.

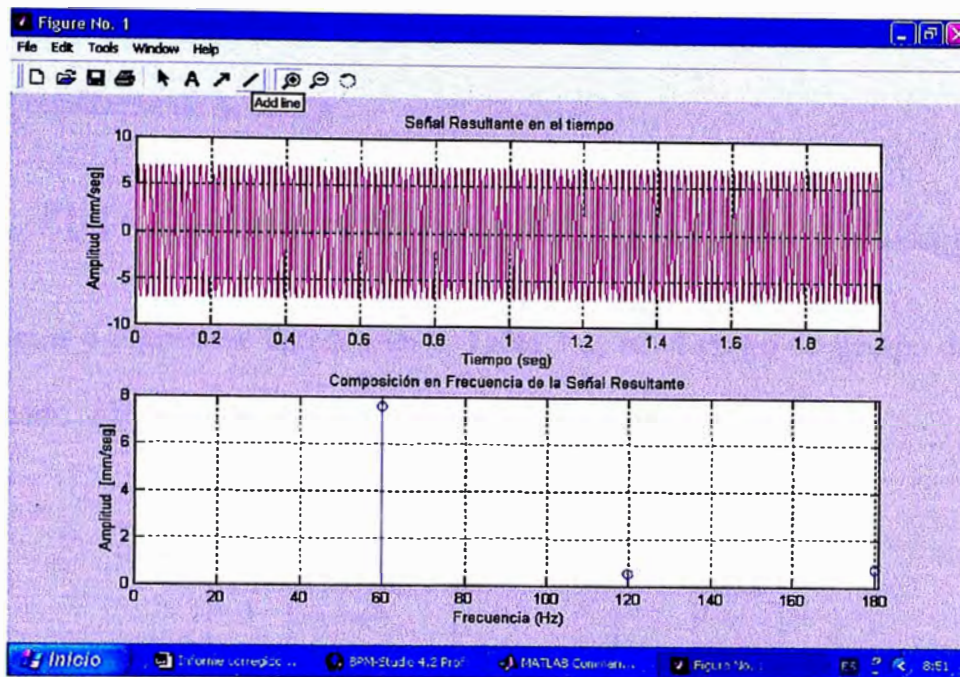


Fig. 3.7 Gráfica de la señal resultante en el tiempo y sus componentes en frecuencia

La Fig. 3.8 muestra el reporte final de los datos ingresados para la generación de la señal resultante.

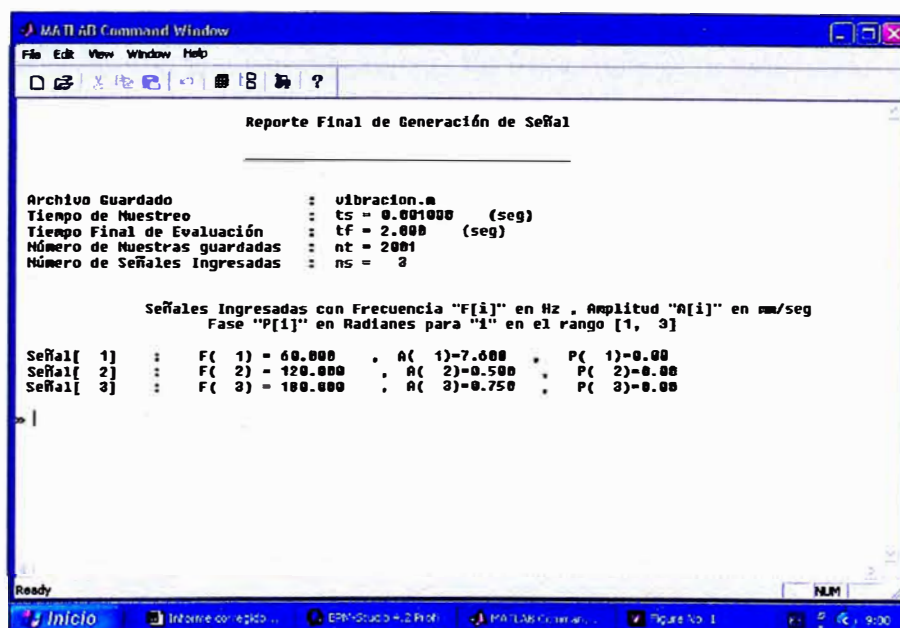


Fig. 3.8 Impresión en pantalla de reporte final

3.1.2 Señales generadas

❖ Vibración radial a la frecuencia menor que 1/2 x RPM del rotor

Para este caso mediante el programa “simula.m” se generará una señal de vibración resultante de la forma

$$V[t] = \sum_{i=1}^4 A[i] * \text{sen}[2 * \pi * F[i] * t + P[i]] \quad (\text{mm/seg})$$

con los datos a ingresarse listados en la Tabla 3.1, en el rango de tiempo de 0 a 1seg. y muestreado cada 1mseg.

i	F[i] (Hz)	A[i] (mm/seg)	P[i] (Rad)
1	28	5.3	0
2	60	0.5	0
3	120	0.3	0
4	180	0.1	0

Tabla 3.1 Datos para vibración radial a la frecuencia menor que 1/2 x RPM del rotor

La Fig. 3.9 muestra la impresión en pantalla de los resultados obtenidos señal resultante en el tiempo y sus componentes de frecuencia para este caso.

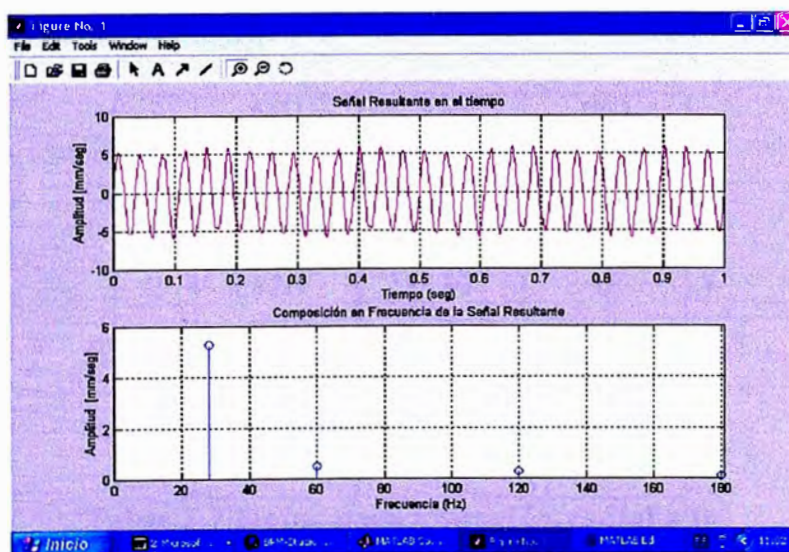


Fig. 3.9 Gráfica de la señal resultante en el tiempo y sus componentes en frecuencia para 1/2 x RPM

La Fig. 3.10 muestra el reporte final con el nombre del archivo “vibracion1.m” que guarda la información (se adjunta en “ANEXO D”).

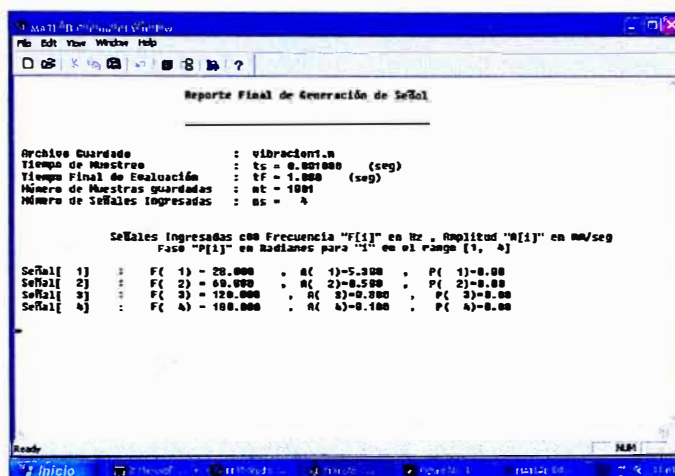


Fig. 3.10 Reporte final para 1/2 x RPM

❖ **Vibración radial a la frecuencia fundamental 1X (60Hz) del rotor**

Para este caso mediante el programa “simula.m” se generará una señal de vibración resultante de la forma :

$$V[t] = \sum_{i=1}^5 A[i] * \text{sen}[2 * \pi * F[i] * t + P[i]] \quad (\text{mm/seg})$$

con los datos a ingresarse listados en la Tabla 3.2, en el rango de tiempo de 0 a 1.5seg. y muestreo cada 1mseg.

i	F[i] (Hz)	A[i] (mm/seg)	P[i] (Rad)
1	60	6.20	0
2	120	0.30	0
3	180	0.15	0
4	240	0.10	0
5	300	0.13	0

Tabla 3.2 Datos para vibración radial a la frecuencia fundamental 1X (60Hz) del rotor

La Fig. 3.11 muestra la impresión en pantalla de los resultados obtenidos señal resultante en el tiempo y sus componentes de frecuencia para este caso.

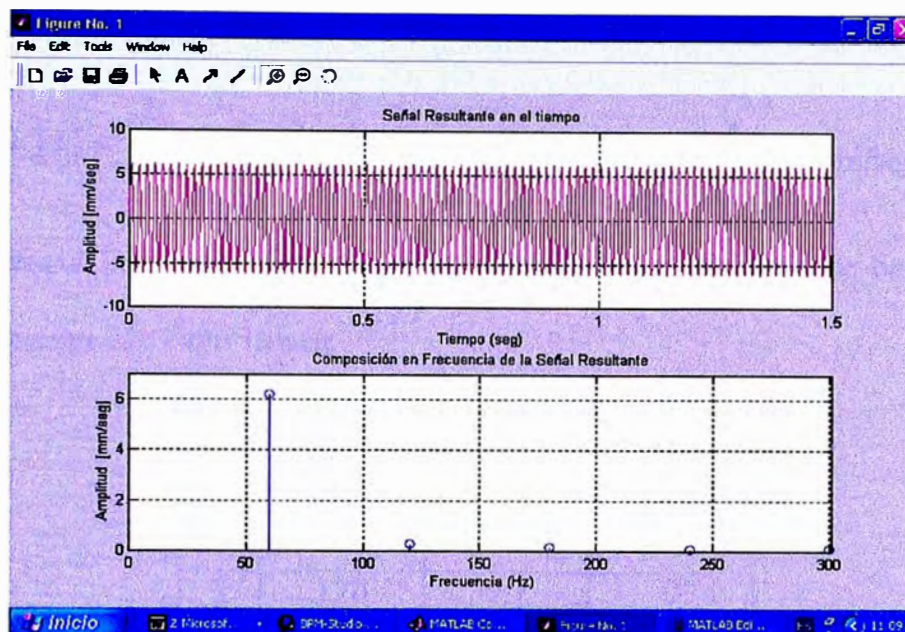


Fig. 3.11 Gráfica de la señal resultante en el tiempo y sus componentes en frecuencia para vibración en 1X (60Hz)

La Fig. 3.12 muestra el reporte final con el nombre del archivo “vibracion2.m” que guarda la información (se adjunta en “ANEXO E”).

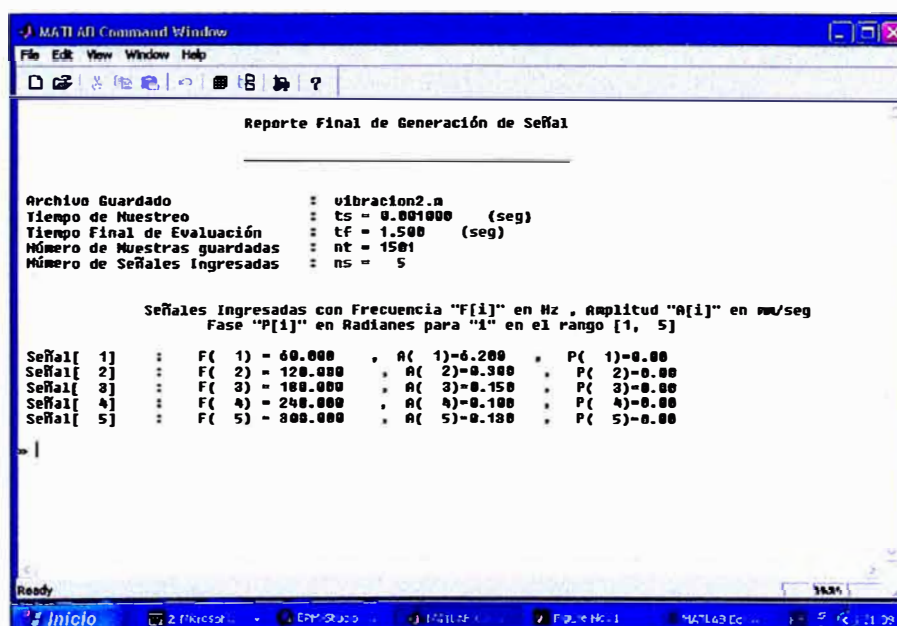


Fig. 3.12 Reporte final para vibración a la frecuencia fundamental 1X (60Hz)

❖ **Vibración radial a la frecuencia armónica 2X (120Hz) del rotor**

Para este caso mediante el programa “simula.m” se generará una señal de vibración resultante de la forma

$$V[t] = \sum_{i=1}^3 A[i] * \text{sen}[2 * \pi * F[i] * t + P[i]] \quad (\text{mm/seg})$$

con los datos a ingresarse listados en la Tabla 3.3, en el rango de tiempo de 0 a 0.7seg. y muestreado cada 1mseg.

i	F[i] (Hz)	A[i] (mm/seg)	P[i] (Rad)
1	60	0.5	0
2	120	5.7	0
3	300	0.9	0

Tabla 3.3 Datos para vibración radial a la frecuencia armónica 2X (120Hz) del rotor

La Fig. 3.13 muestra la impresión en pantalla de los resultados obtenidos señal resultante en el tiempo y sus componentes de frecuencia para este caso.

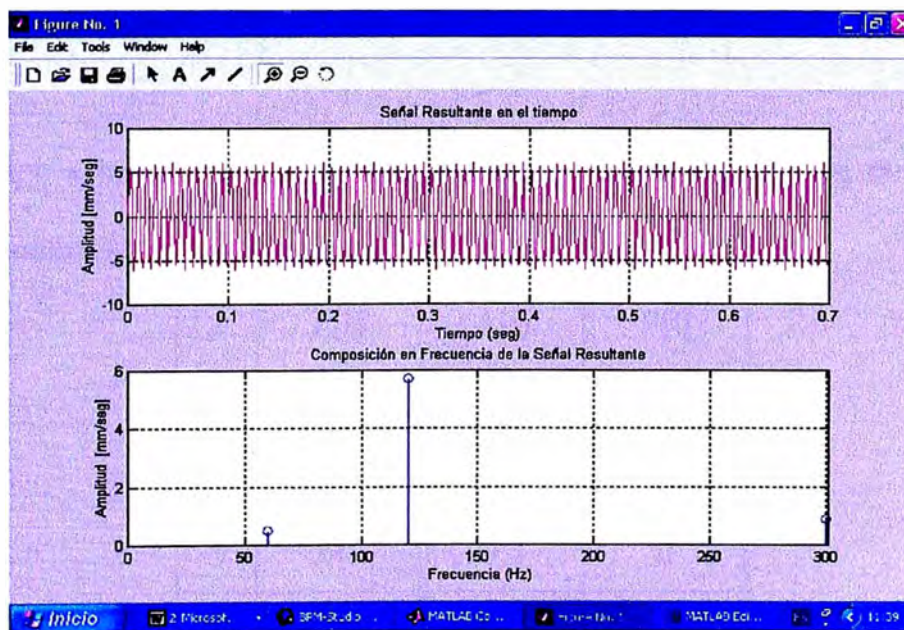


Fig. 3.13 Gráfica de la señal resultante en el tiempo y sus componentes en frecuencia para vibración en 2X (120Hz)

La Fig. 3.14 muestra el reporte final con el nombre del archivo “vibracion3.m” que guarda la información.

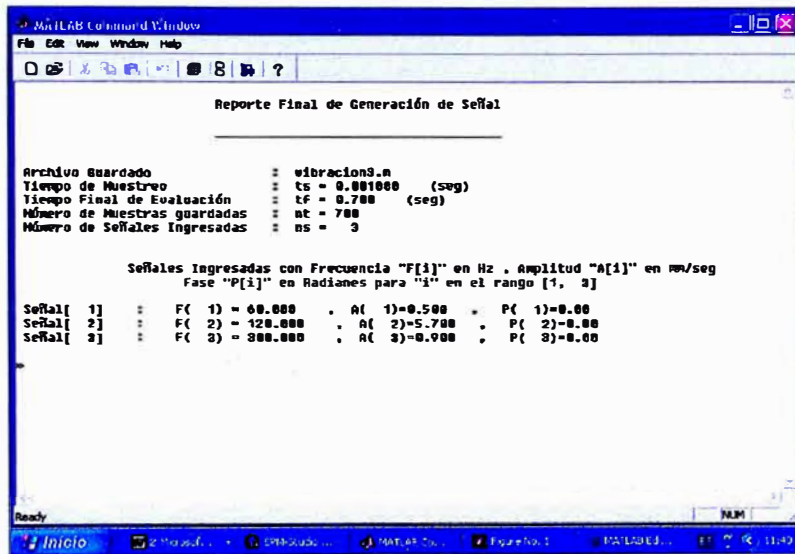


Fig. 3.14 Reporte final para vibración a la frecuencia 2X (120Hz)

❖ Vibración radial a la frecuencia armónica 65X (3.9KHz) del rotor

Para este caso mediante el programa “simula.m” se generará una señal de vibración resultante de la forma :

$$V[t] = \sum_{i=1}^4 A[i] * \text{sen}[2 * \pi * F[i] * t + P[i]] \quad (\text{mm/seg})$$

con los datos a ingresarse listados en la Tabla 3.4, en el rango de tiempo de 0 a 0.12seg. y muestreado cada 0.1mseg.

i	F[i] (Hz)	A[i] (mm/seg)	P[i] (Rad)
1	60	0.2	0
2	240	0.3	0
3	540	0.4	0
4	3900	5.8	0

Tabla 3.4 Datos para vibración radial a la frecuencia armónica 65X (3.9KHz) del rotor

La Fig. 3.15 muestra la impresión en pantalla de los resultados obtenidos señal resultante en el tiempo y sus componentes de frecuencia para este caso.

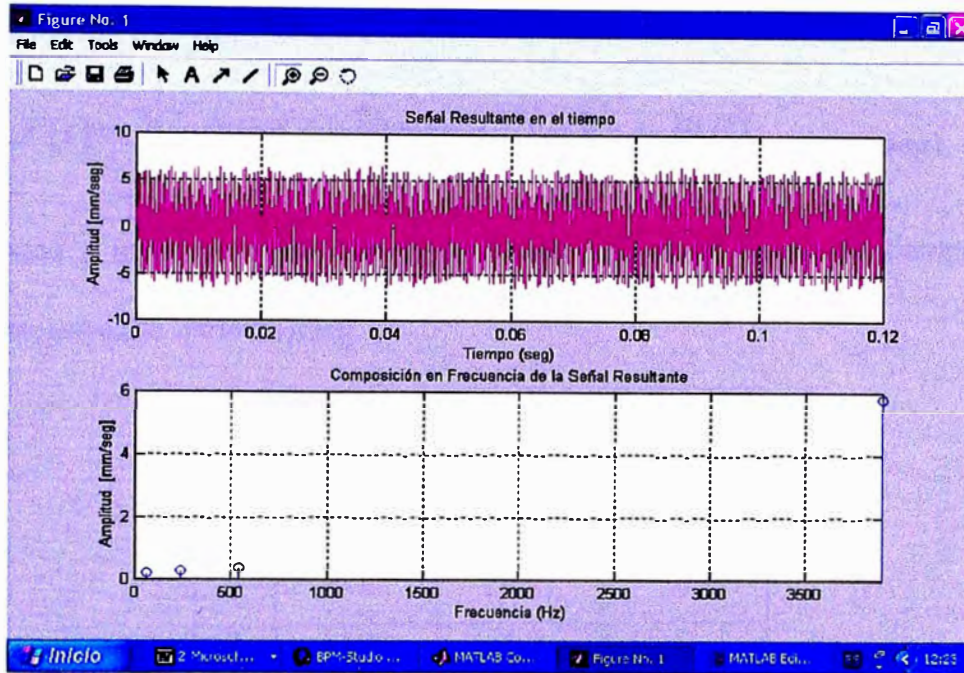


Fig. 3.15 Gráfica de la señal resultante en el tiempo y sus componentes en frecuencia para vibración en 65X (3.9KHz)

La Fig. 3.16 muestra el reporte final con el nombre del archivo “vibracion4.m” que guarda la información.

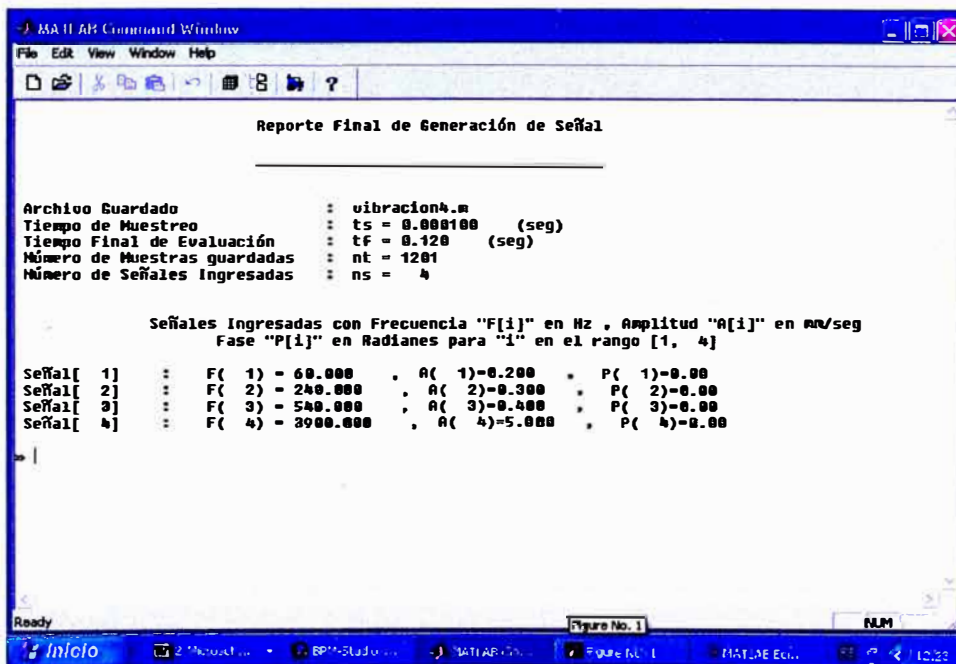


Fig. 3.16 Reporte final para vibración en 65X (3.9KHz)

❖ **Vibración radial a la frecuencia armónica 85X (5.1KHz) del rotor**

Para este caso mediante el programa “simula.m” se generará una señal de vibración resultante de la forma

$$V[t] = \sum_{i=1}^3 A[i] * \text{sen}[2 * \pi * F[i] * t + P[i]] \quad (\text{mm/seg})$$

con los datos a ingresarse listados en la Tabla 3.5, en el rango de tiempo de 0 a 0.1seg. y muestreado cada 83μseg.

i	F[i] (Hz)	A[i] (mm/seg)	P[i] (Rad)
1	60	0.5	0
2	600	0.7	0
3	5100	4.9	0

Tabla 3.5 Datos para vibración radial a la frecuencia armónica 85X (5.1KHz) del rotor

La Fig. 3.17 muestra la impresión en pantalla de los resultados obtenidos señal resultante en el tiempo y sus componentes de frecuencia para este caso.

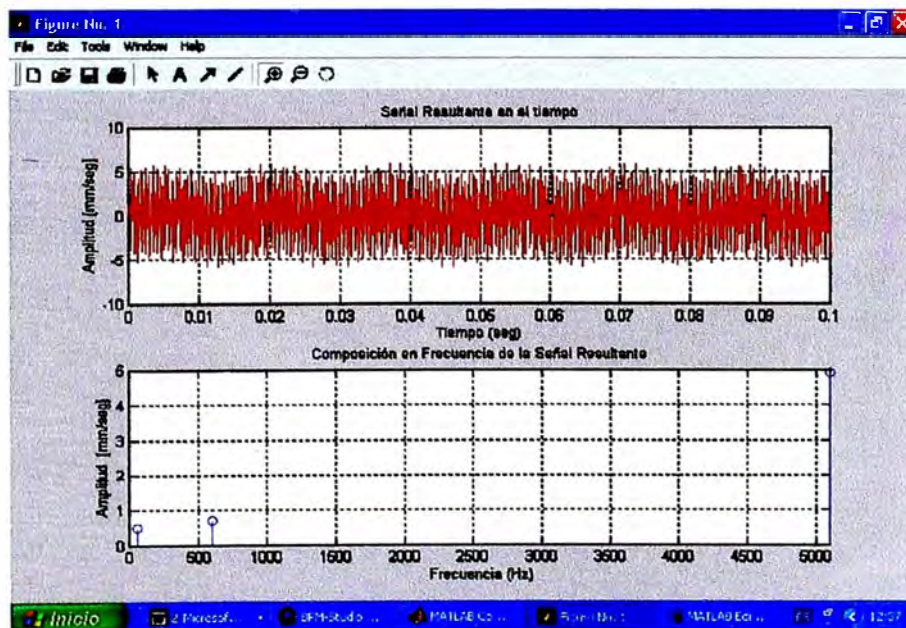


Fig. 3.17 Gráfica de la señal resultante en el tiempo y sus componentes en frecuencia para vibración en 85X (5.1KHz)

La Fig. 3.18 muestra el reporte final con el nombre del archivo “vibracion5.m” que guarda la información.

```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
Reporte Final de Generación de Señal
-----
Archivo Guardado           : vibracion5.m
Tiempo de Muestreo        : ts = 0.000083 (seg)
Tiempo Final de Evaluación : tf = 0.100 (seg)
Número de Muestras guardadas : nt = 1205
Número de Señales Ingresadas : ns = 3

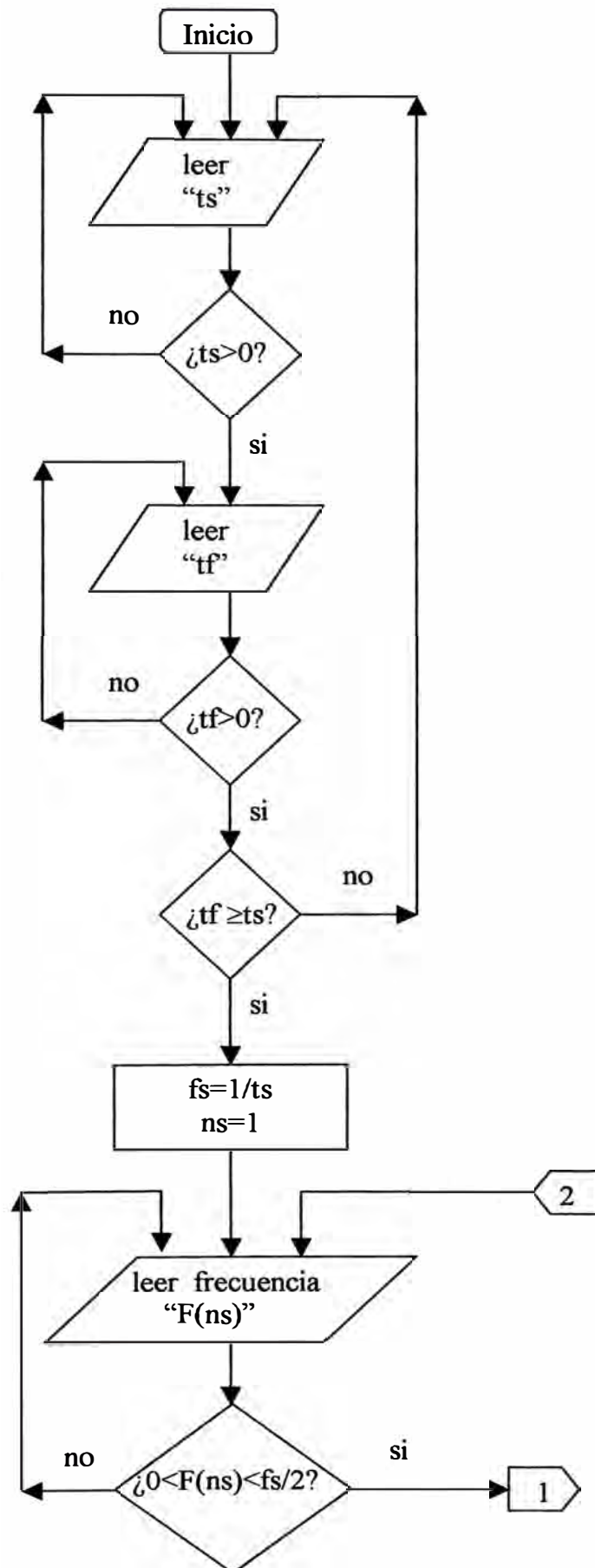
Señales Ingresadas con Frecuencia "F[i]" en Hz , Amplitud "A[i]" en mm/seg
Fase "P[i]" en Radianes para "i" en el rango [1, 3]

Señal[ 1] : F( 1) = 60.000 , A( 1)=0.500 , P( 1)=0.00
Señal[ 2] : F( 2) = 600.000 , A( 2)=0.700 , P( 2)=0.00
Señal[ 3] : F( 3) = 5100.000 , A( 3)=4.900 , P( 3)=0.00

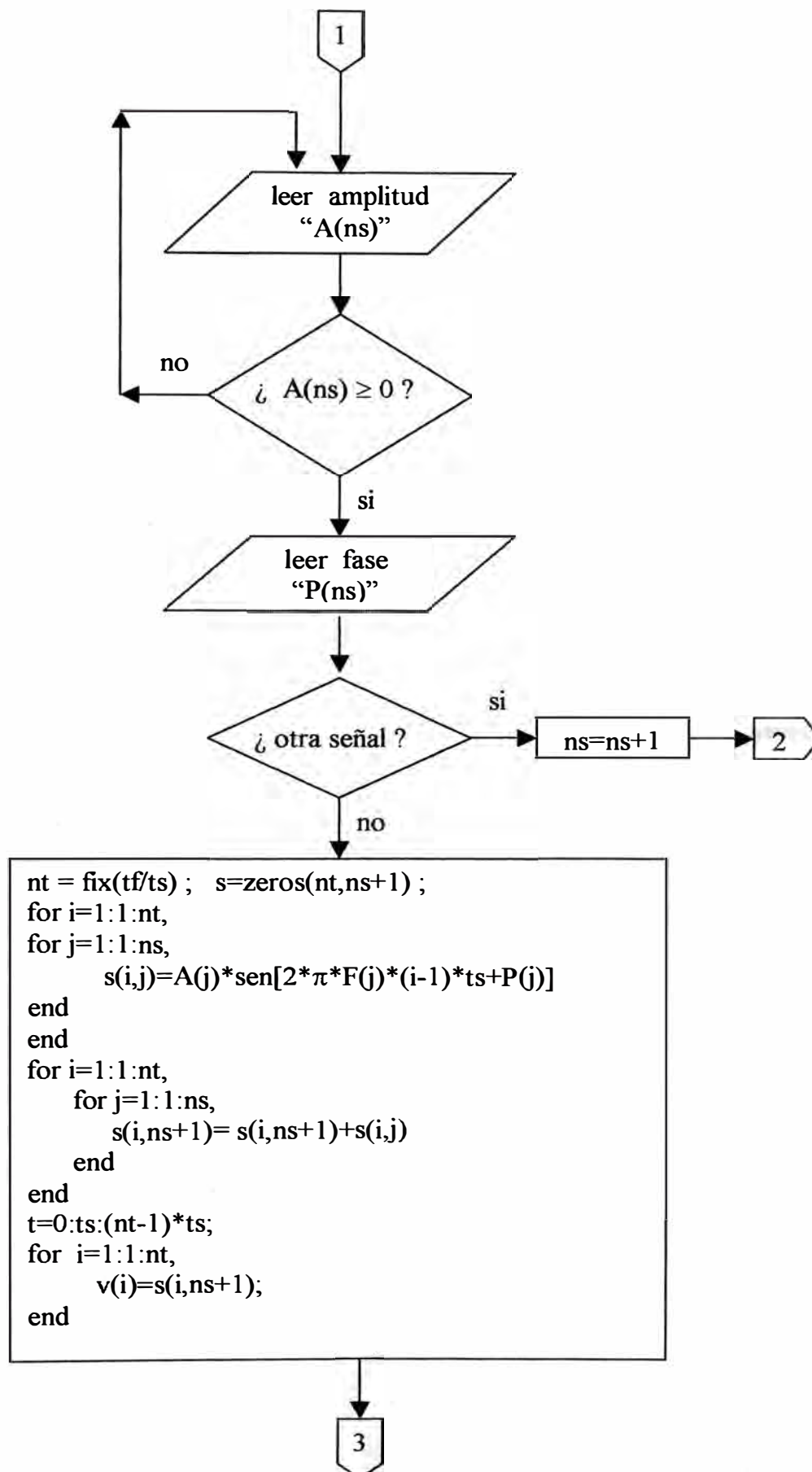
Ready
  
```

Fig. 3.18 Reporte final para vibración en 85X (5.1KHz)

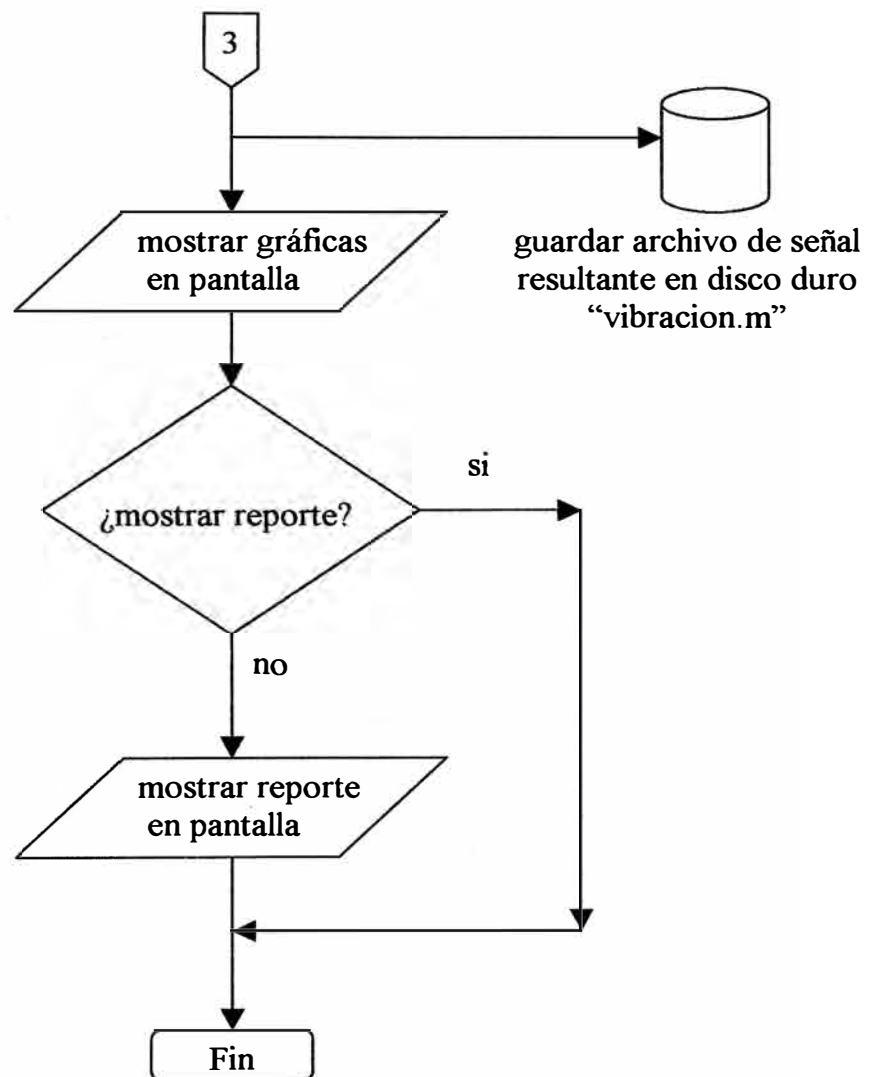
Fig. 3.19 Diagrama de flujo de programa “simula.m”



**Fig. 3.19 Diagrama de flujo de programa “simula.m”
(continuación)**



**Fig. 3.19 Diagrama de flujo de programa “simula.m”
(continuación)**



3.2 Análisis de espectro de frecuencias usando Matlab

3.2.1 Introducción

❖ Transformada Discreta de Fourier (DFT)

La “Transformada Discreta de Fourier” (DFT), es la representación de Fourier de señales de longitud finita. La DFT, puede ser explícitamente calculada, y juega un rol importante en una amplia variedad de aplicaciones de procesamiento de señales que incluyen el filtrado y análisis espectral.

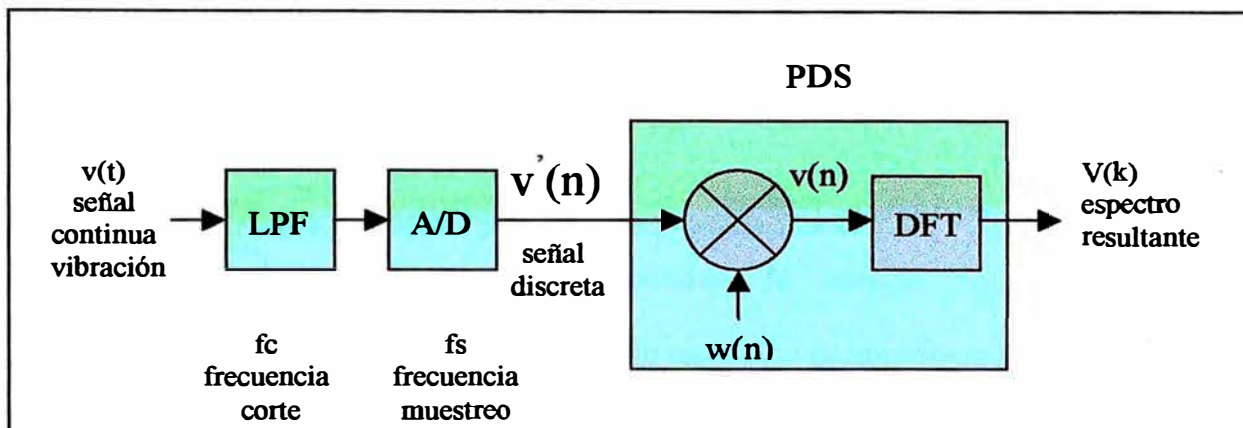


Fig. 3.20 Diagrama de análisis de Fourier de señales continuas aplicando La Transformada Discreta de Fourier (DFT)

En la Fig. 3.20, se limita el ancho de banda de la señal continua de vibración “ $v(t)$ ” por medio del filtro pasa-bajo (LPF) a la frecuencia de corte (f_c). Luego esta señal filtrada se muestrea usando un convertidor analógico/digital (A/D) a una frecuencia de muestreo ($f_s = 1/t_s$), la cual debe cumplir el teorema de Nyquist del muestreo ($f_s \geq 2 \cdot f_c$) evitando el efecto Aliasing que no permitiría recuperar la señal original. Se obtiene así la señal discreta “ $v'(n)$ ”, estando ya en la capacidad de aplicar procesamiento digital de señales (PDS). En nuestro caso para obtener la DFT aplicamos una ventana “ $w(n)$ ” a la señal “ $v'(n)$ ” para limitarla :

$$v(n) = v'(n) * w(n)$$

donde “ $w(n)$ ” puede ser una ventana rectangular, triangular, hamming, etc.

Seguidamente aplicamos el algoritmo de la DFT para “N” muestras de la señal “v(n)”

$$V(k) = \sum_{n=0}^{N-1} v(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N}$$

para $0 \leq k \leq N-1$

donde :

v(n) : vector de entrada de longitud “N”

V(k) : vector de salida DFT de longitud “N”

❖ Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Se denomina Transformada Rápida de Fourier (FFT) a los algoritmos desarrollados colectivamente con la finalidad de realizar cálculos altamente eficientes de la DFT, ahorrando así tiempo de ejecución para obtener los resultados.

La mayoría de los procedimientos para mejorar la eficiencia en los cálculos de la DFT explotan las propiedades de periodicidad y de simetría de $e^{j2\pi kn/N}$, como son :

1. $e^{-j2\pi k(N-n)/N} = e^{j2\pi kn/N} = (e^{j2\pi kn/N})^*$ compleja conjugada simétrica ;
2. $e^{-j2\pi kn/N} = e^{-j2\pi k(n+N)/N} = e^{-j2\pi(k+N)n/N}$ periodicidad de “n” y “k”.

Los algoritmos de FFT se basan en el principio fundamental de descomponer el cálculo de una DFT de una secuencia de longitud “N” en transformadas DFT’s sucesivamente más pequeñas, como son el diezmado en el tiempo de una secuencia temporal y el diezmado de frecuencia. La forma en que se aplica este principio conduce a una variedad de algoritmos diferentes, todos ellos comparables en cuanto a mejora de velocidad de cómputo.

Los algoritmos varían en eficiencia, pero todos ellos requieren menos multiplicaciones y sumas que la evaluación directa (cuya carga computacional es proporcional a N^2) de la ecuación mencionada anteriormente.

El programa Matlab utiliza un algoritmo rápido para calcular la DFT para el caso de un número de muestras que sea potencia de 2, que permite ahorrar tiempo de ejecución para obtener el análisis espectral.

3.2.2 Programa “turbina.m”

❖ Descripción

La finalidad del programa “turbina.m” es procesar la señal resultante obtenida mediante el programa “simula.m” que almacenó toda la información en un archivo de nombre “vibracion.m”. Esta señal resultante será tomada como una señal de vibración a quien aplicaremos Transformada Rápida de Fourier FFT, para el caso que el número de muestras sea una potencia de 2 y así obtener su espectro de frecuencias.

El programa “turbina.m” ofrece la opción de usar filtro pasa-banda para capturar una armónica de una frecuencia cualquiera y mostrar el espectro resultante.

❖ Diagrama de flujo

El diagrama de flujo para el programa “turbina.m”, es mostrado en la Fig. 3.32

❖ Contenido

El contenido del programa está en el Anexo C.

❖ Ejecución

La ejecución del programa “turbina.m” se realiza desde la línea de comandos de Matlab digitando el nombre del archivo como se muestra en la Fig. 3.21.

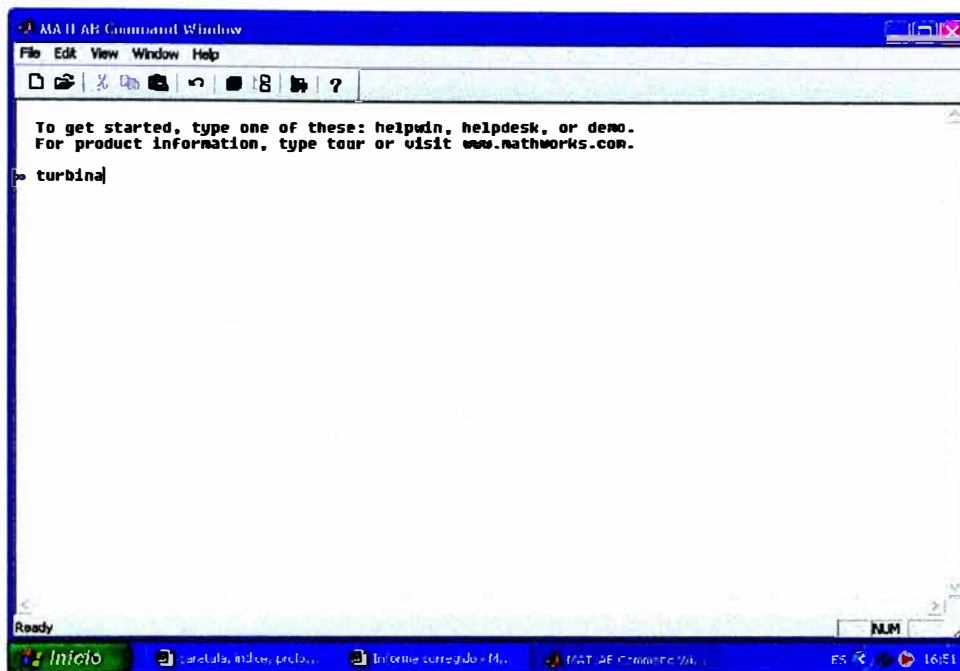


Fig. 3.21 Ejecución del programa “turbina.m”

La Fig. 3.22 imprime en pantalla la cantidad de muestras que tiene el archivo “vibracion1.m” y se pide el ingreso del tiempo de muestreo.

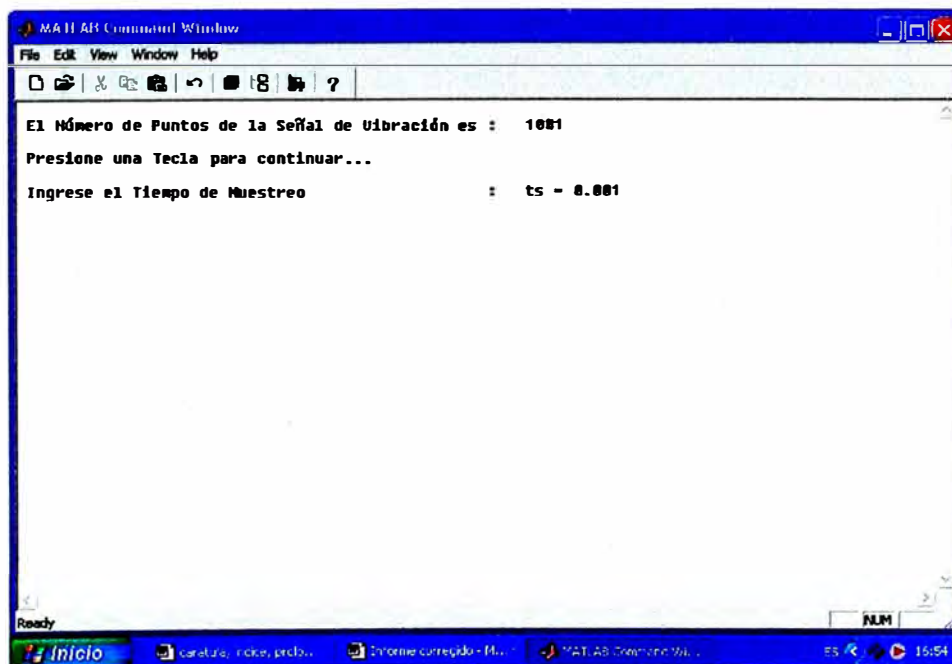


Fig. 3.22 Ingreso del tiempo de muestreo “ts”

La Fig. 3.23 muestra la pantalla si se desea aplicar filtro pasa-banda a la señal original para luego recién calcular su espectro de frecuencias.

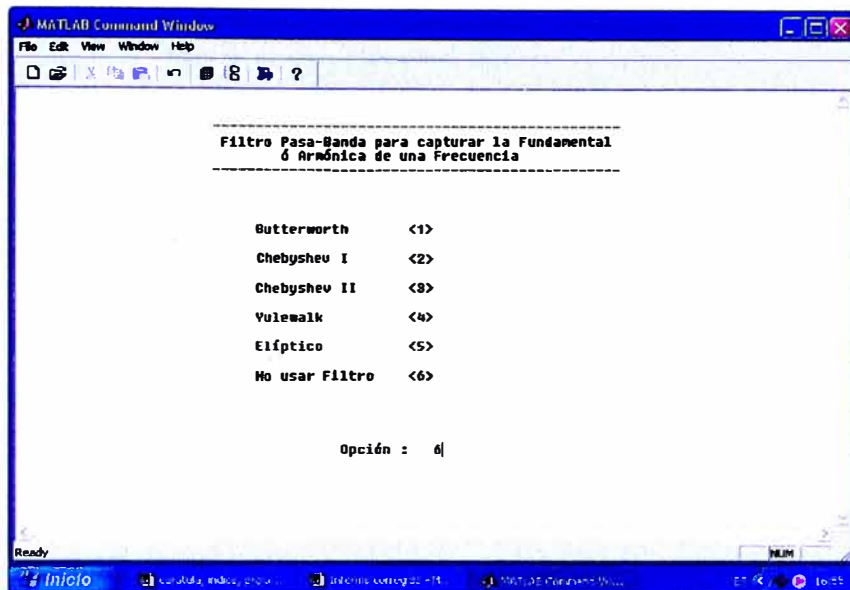


Fig. 3.23 Pantalla para aplicar filtro pasa-banda

La Fig. 3.24 muestra la pantalla en el caso de haberse elegido no usar filtro pasa-banda y el Ingreso de la cantidad de puntos “N” a quienes aplicaremos la FFT, así como el punto “nx” sobre el cual se tomarán los datos.

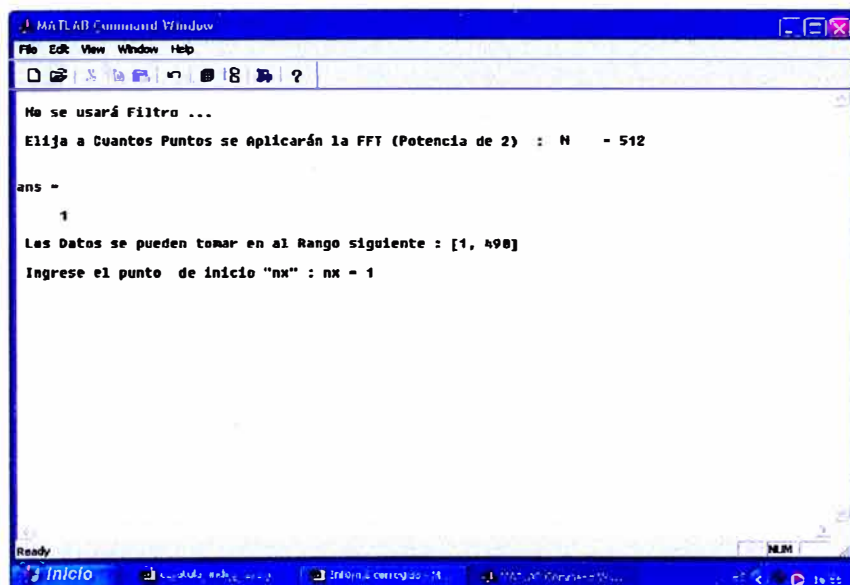


Fig. 3.24 Pantalla para ingresar “N” y “nx”

La Fig. 3.25 es para elegir uno de los tipos de ventanas disponibles que se usará.

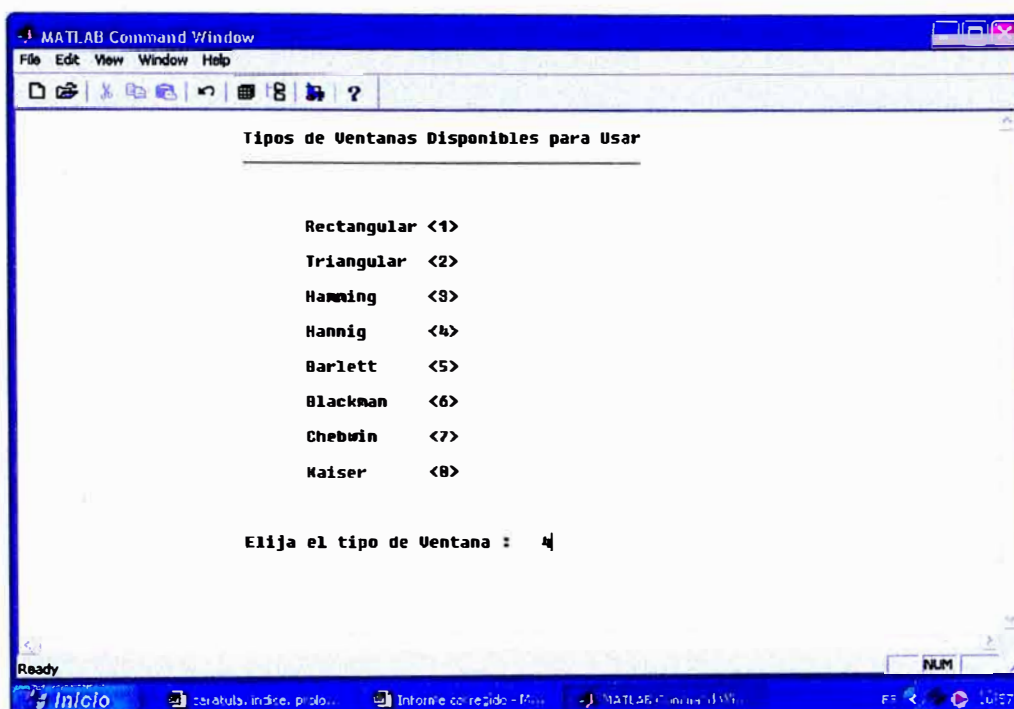


Fig. 3.25 Pantalla para elegir el tipo de ventana a usar

La Fig. 3.26 es para mostrar el espectro resultante de la señal .

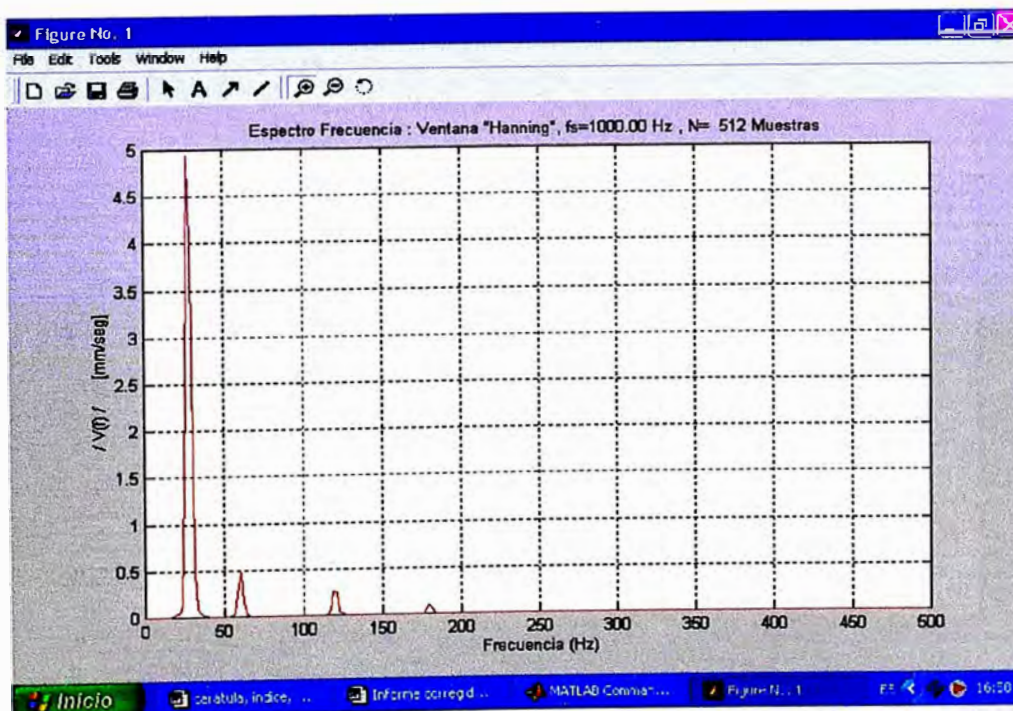


Fig. 3.26 Pantalla mostrando el espectro resultante

3.2.3 Aplicación de FFT a las señales generadas

❖ Espectro de frecuencia de vibración menor que $1/2 \times \text{RPM}$

Los resultados que se obtienen procesando el archivo “vibracion1.m”, y se muestran en la Fig. 3.27, donde observamos que en el espectro analizado hay un pico predominante de 5.2 mm/seg cerca de los 28 Hz, que implicaría un problema de “remolino de aceite en cojinete” (oil whirl in bearing). Este problema es frecuente en cojinetes de manguito (sleeve bearings) y se refleja en vibración producida por una inadecuada lubricación debido a la excesiva separación de cojinete. Este problema puede causar daños severos a cojinetes, sellos y componentes aerodinámicos con poco ó sin movimiento evidente de la carcasa. Por tanto para superar el problema habría que corregir la separación adecuada en el cojinete.

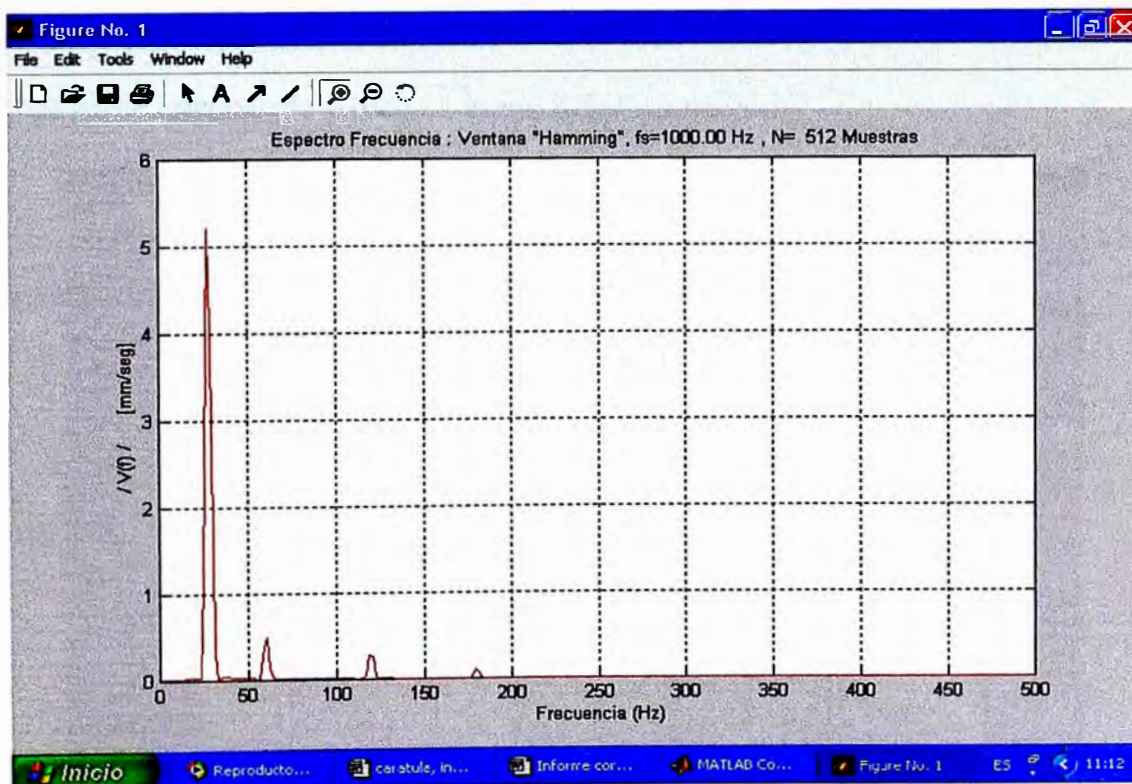


Fig. 3.27 Espectro resultante a $1/2 \times \text{RPM}$

❖ Espectro de frecuencia de vibración 1X RPM

Los resultados que se obtienen procesando el archivo “vibracion2.m”, y se muestran en la Fig. 3.28, donde observamos que en el espectro analizado hay un pico predominante de 5.7 mm/seg a 60 Hz (1X) que implicaría un problema debido a cualquiera de los motivos siguientes : desbalance, eje de rotación doblado, cojinete de trabajo excéntrico, desalineamiento.

El desbalance es la causa más común de vibración cuya acción correctiva sería balancear el eje del rotor; y para el caso de eje de rotación doblado habría que colocar la unidad en velocidad de giro (turning gear) hasta enderezar el eje.

Para cojinete de trabajo excéntrico reaccionará como desbalance; y en el caso de desalineamiento de acoplamientos, ejes y cojinetes la vibración axial ocurre en un nivel alto. El desalineamiento ocurre generalmente sobre acoplamientos del generador con carga y acoplamientos de engranaje con carga. Una carencia de lubricación adecuada en algunas instalaciones de acoplamiento resultará en el mismo tipo de características de vibración como desalineamiento.

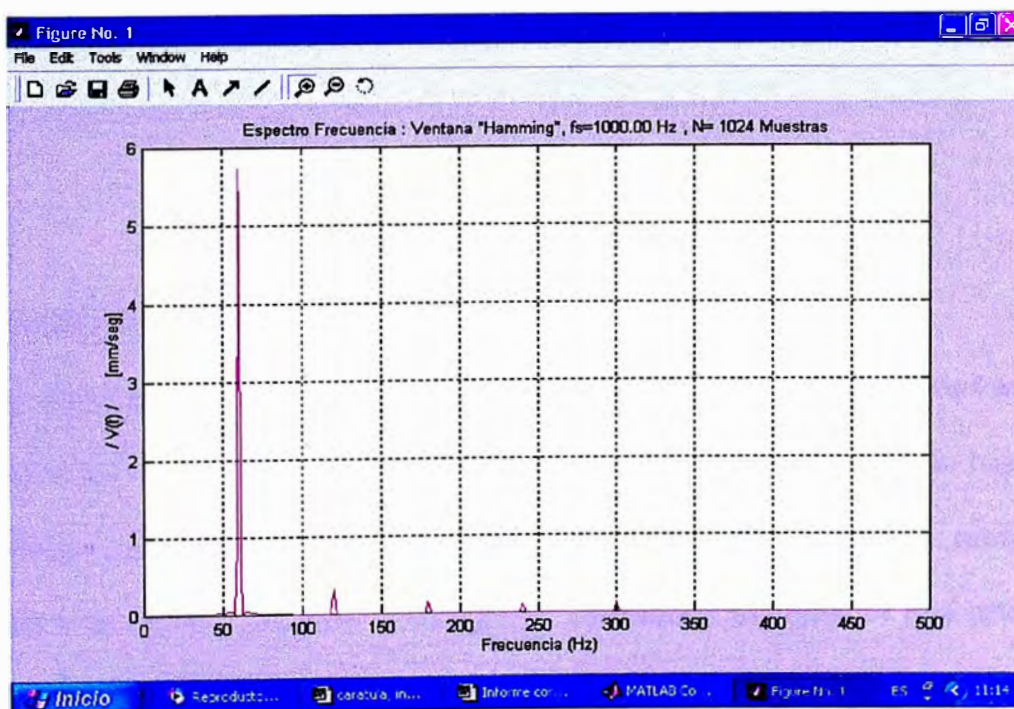


Fig. 3.28 Espectro resultante a 1X RPM

❖ Espectro de frecuencia de vibración 2X RPM

Los resultados que se obtienen procesando el archivo “vibracion3.m”, y se muestran en la Fig. 3.29, donde observamos que en el espectro analizado hay un pico predominante de 5.2 mm/seg a 120 Hz (2X) que implicaría un problema debido a cualquiera de los motivos siguientes : acoplamiento bloqueado (ocurre también elevada vibración axial), flojedad mecánica del cojinete y/o soportes (se refleja en desalineamiento).

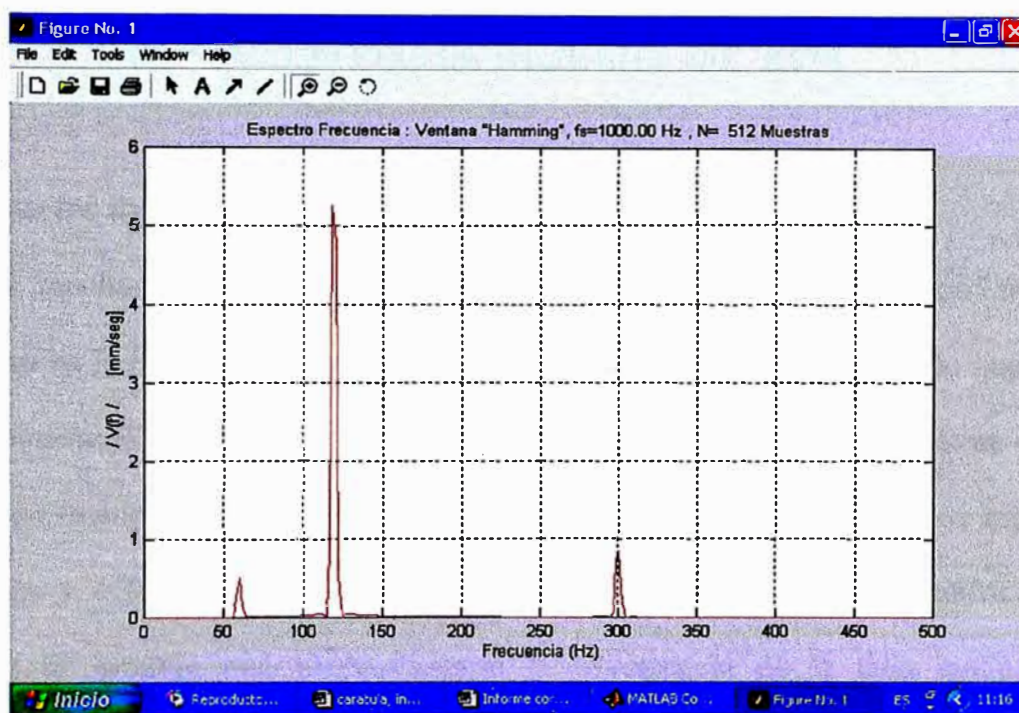


Fig. 3.29 Espectro resultante a 2X RPM

❖ Espectro de frecuencia de vibración 65X RPM

Los resultados que se obtienen procesando el archivo “vibracion4.m”, y se muestran en la Fig. 3.30, donde observamos que en el espectro analizado hay un pico predominante de 5.6 mm/seg a 3.9 KHz (65X) que implicaría un problema de rozamiento en el eje, que debe solucionarse eliminando el contacto que exista entre los componentes del estator y del rotor.

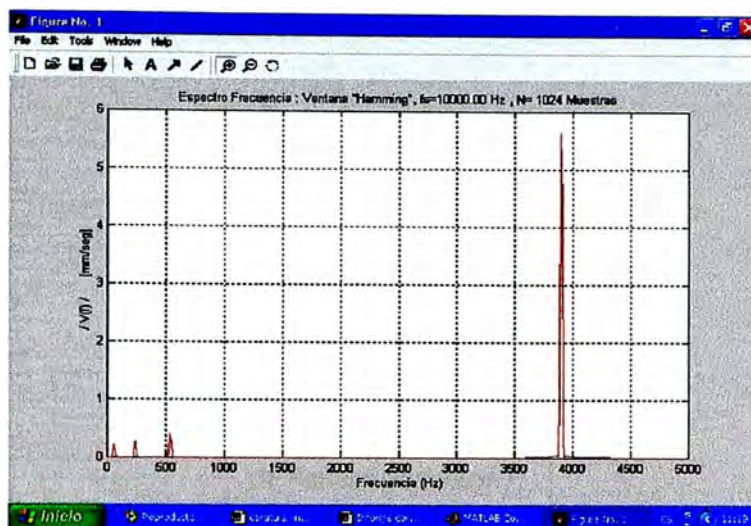


Fig. 3.30 Espectro resultante a 65X RPM

❖ **Espectro de frecuencia de vibración 85X RPM**

Los resultados que se obtienen procesando el archivo “vibracion5.m”, y se muestran en la Fig. 3.31, donde observamos que en el espectro analizado hay un pico predominante de 4.5 mm/seg a 5.1 KHz (85X) que implicaría un problema debido a una falla en cojinete. Conociendo la posición axial del rotor en los puntos específicos de carga y velocidad, se puede supervisar el desgaste del metal antifricción del cojinete de empuje que proporcionaría la advertencia de la falla inminente del cojinete de empuje.

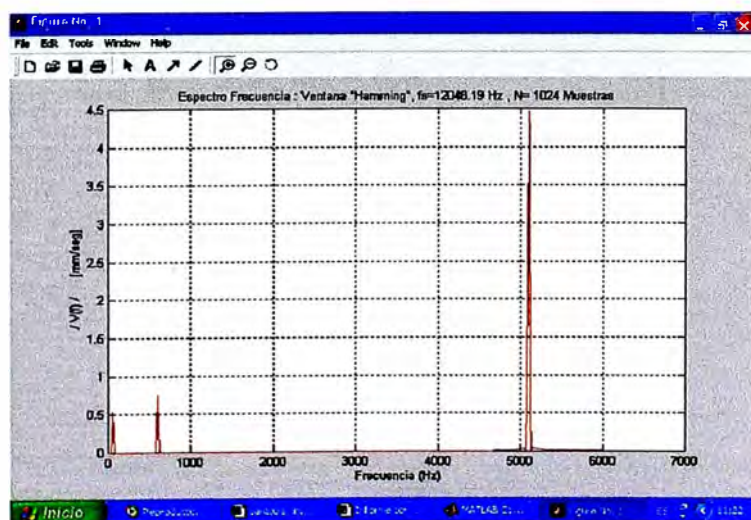
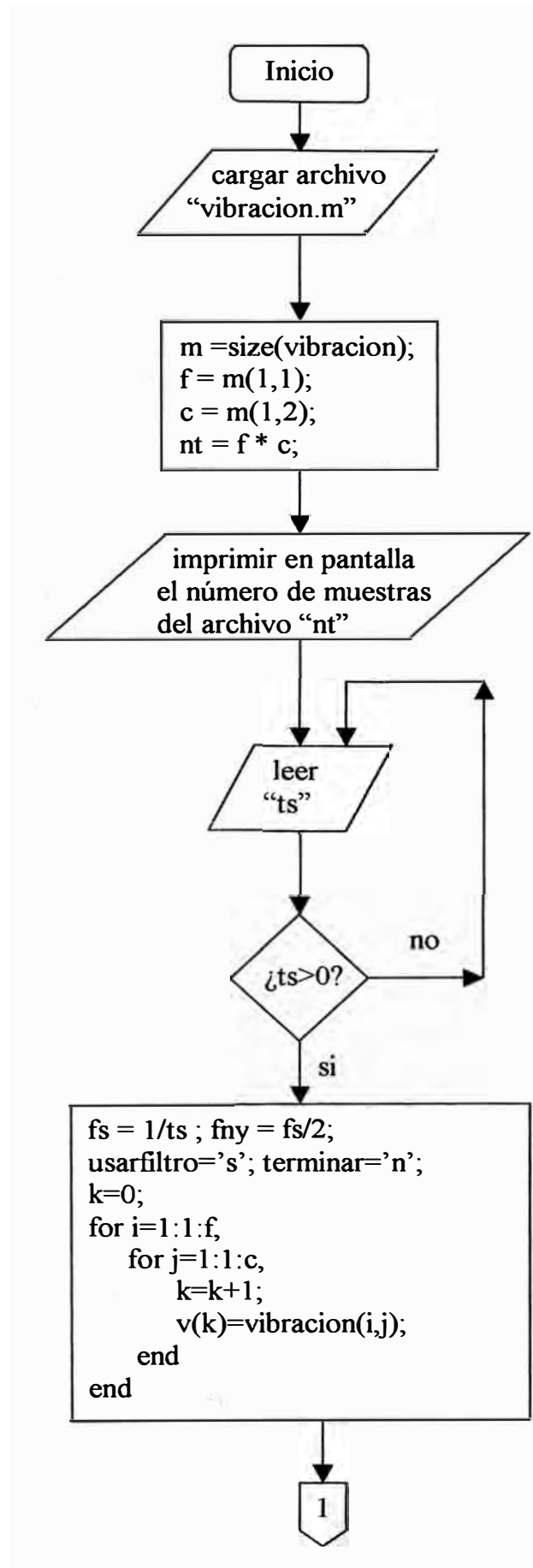
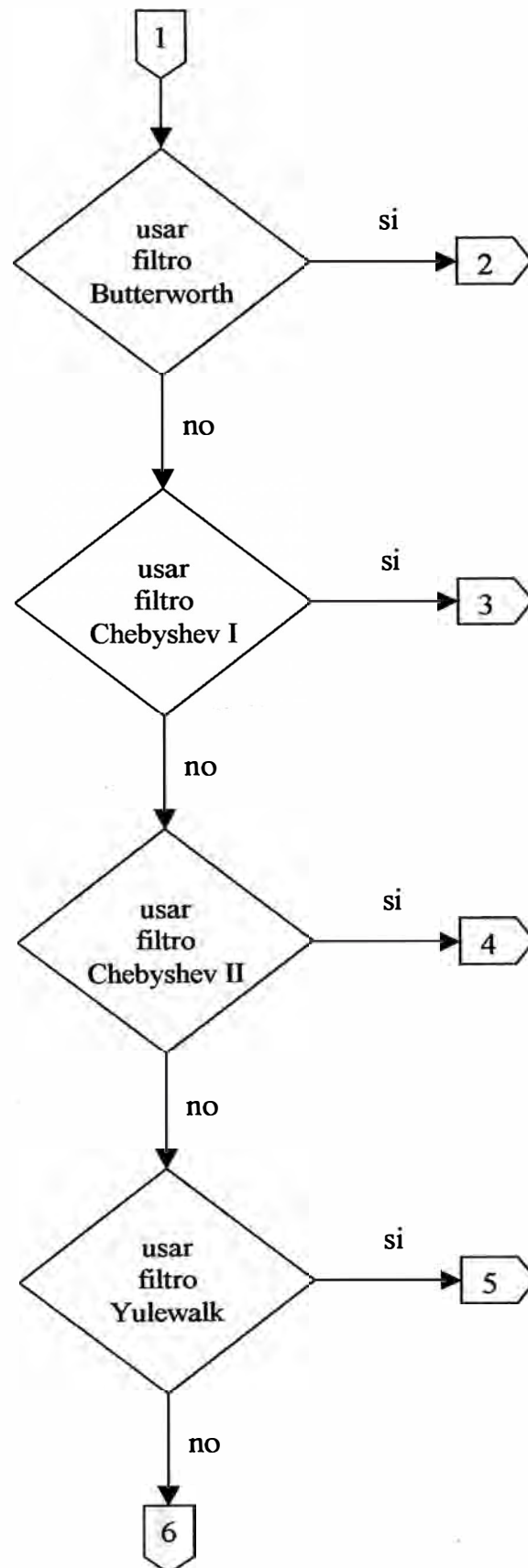


Fig. 3.31 Espectro resultante a 85X RPM

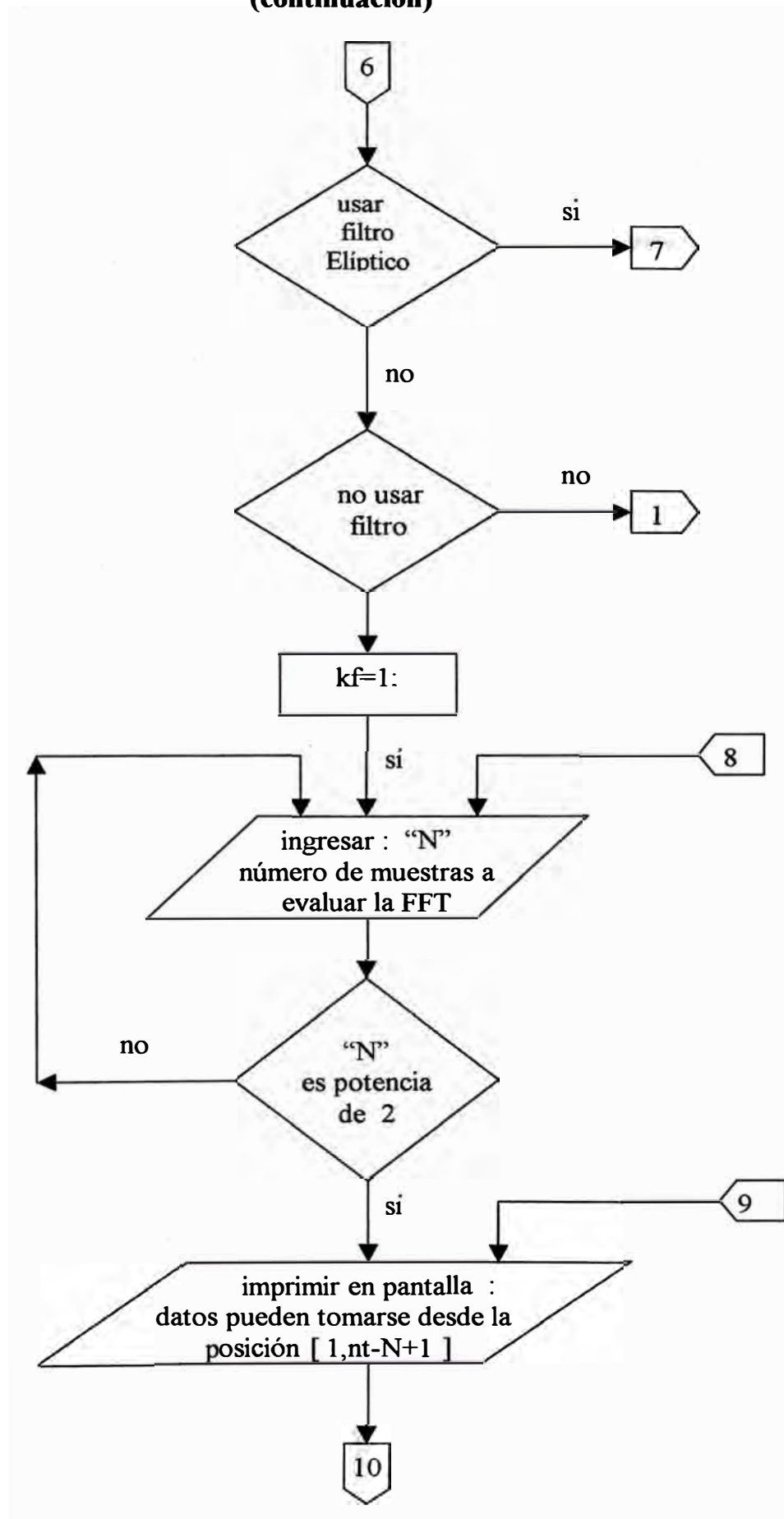
Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”



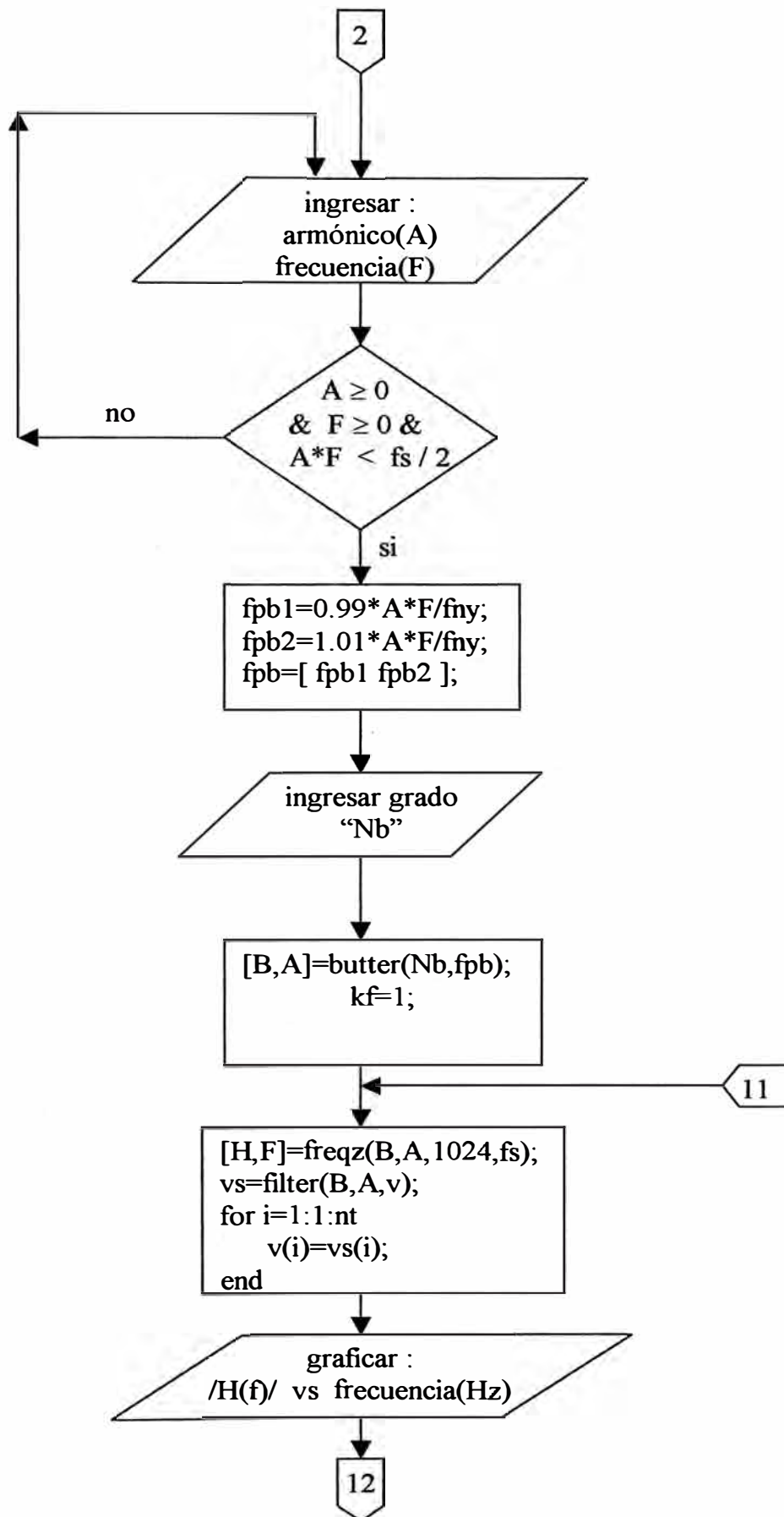
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



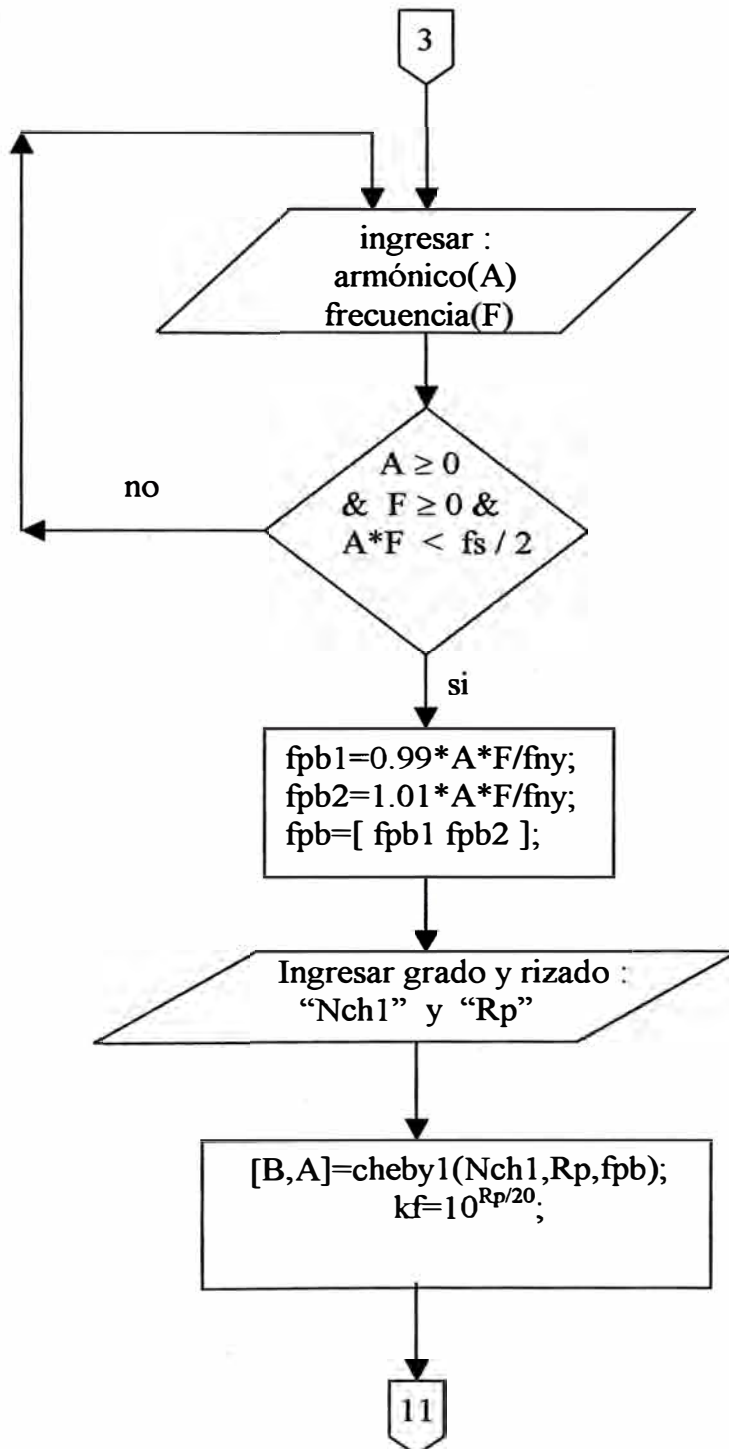
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



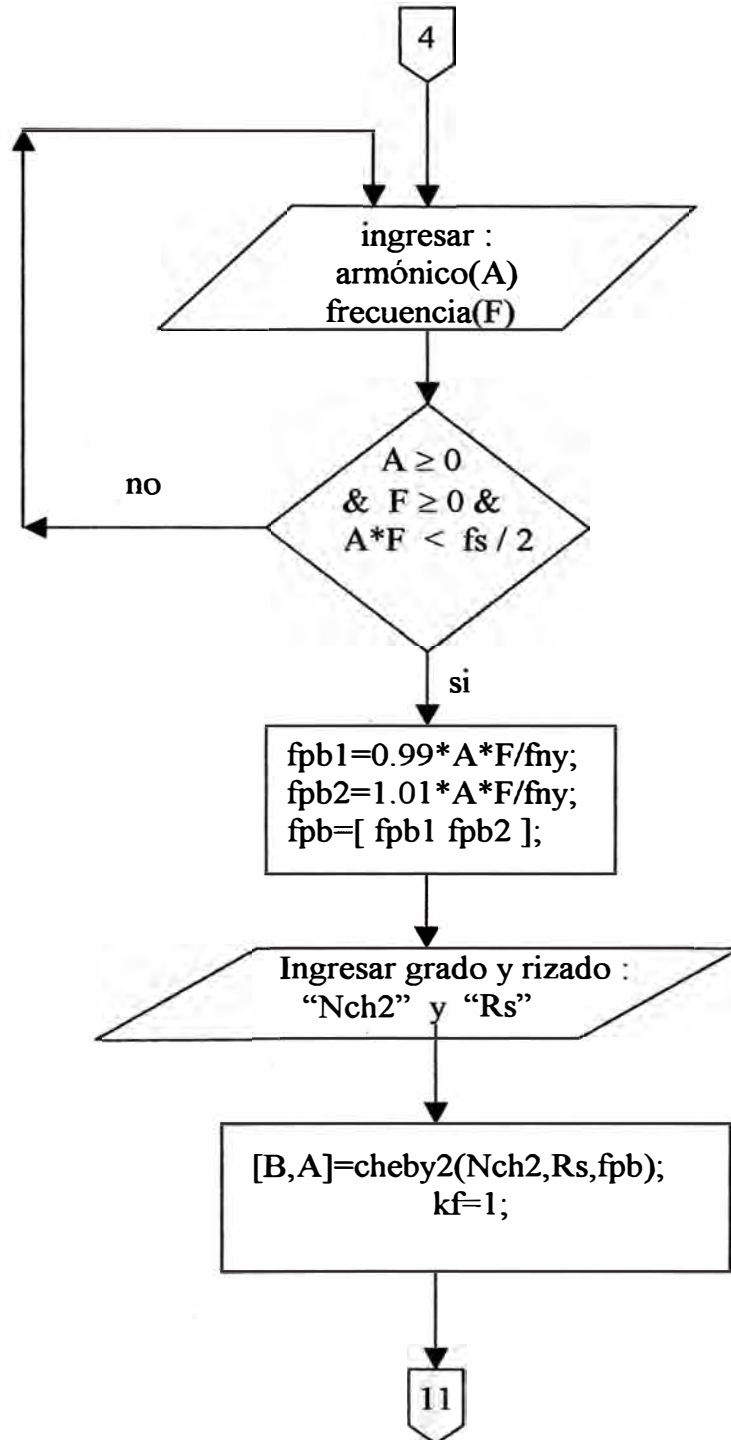
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



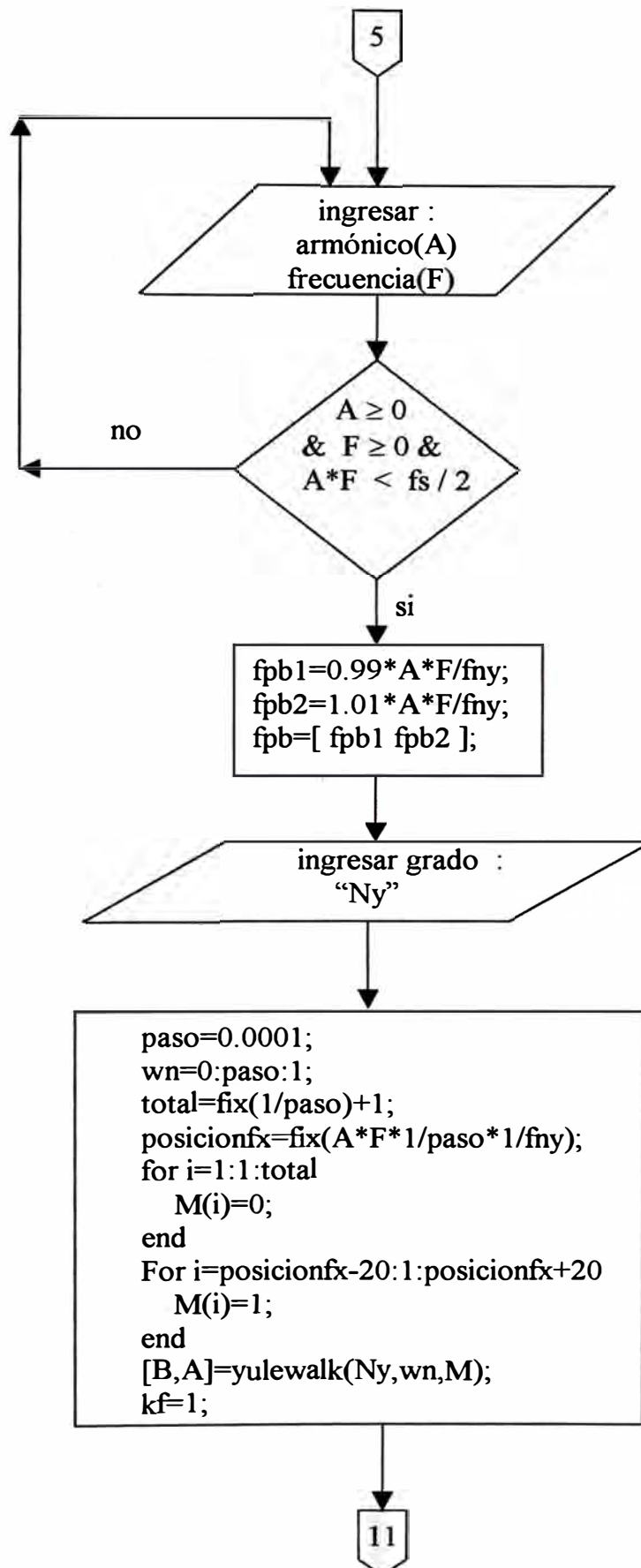
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



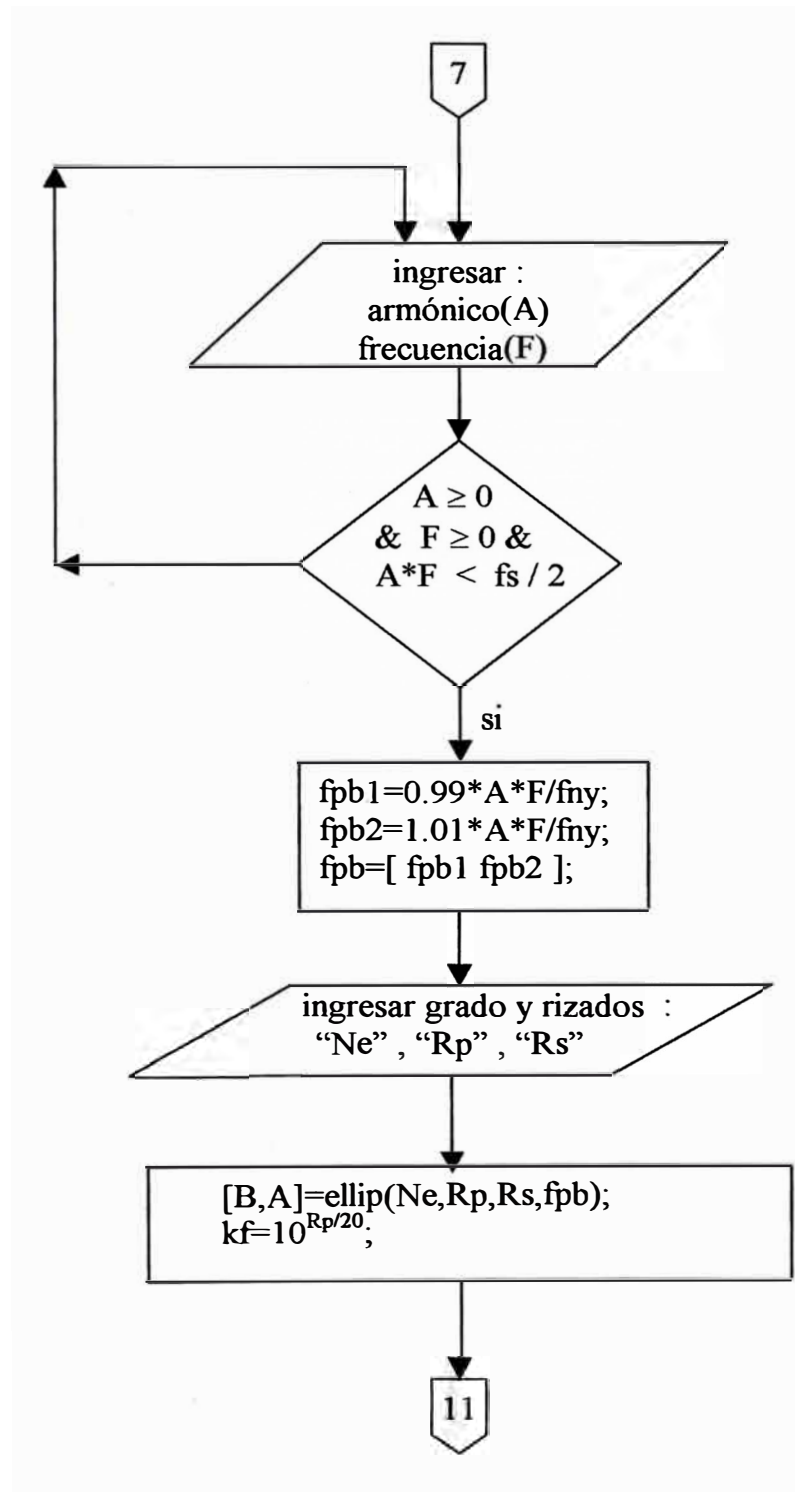
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



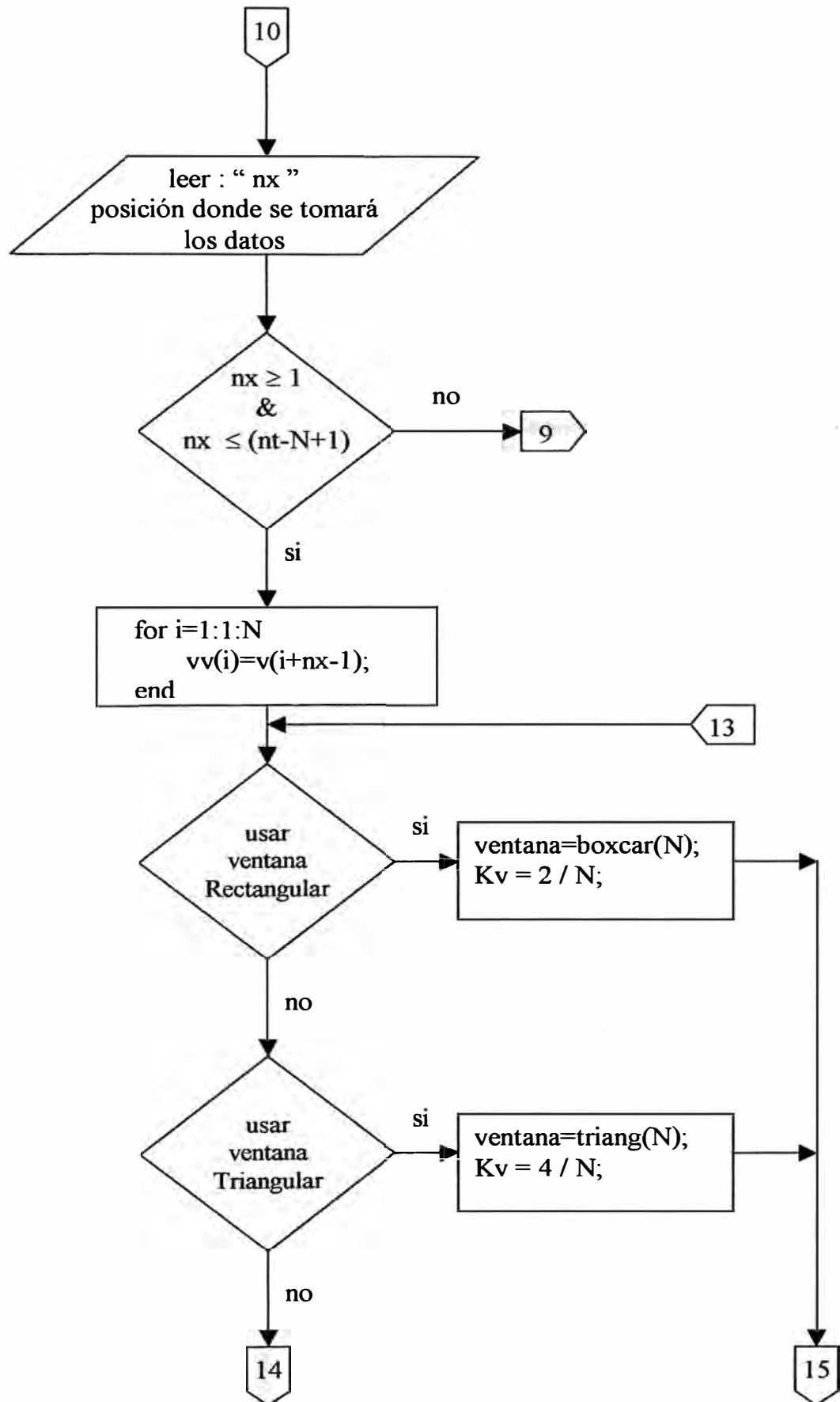
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



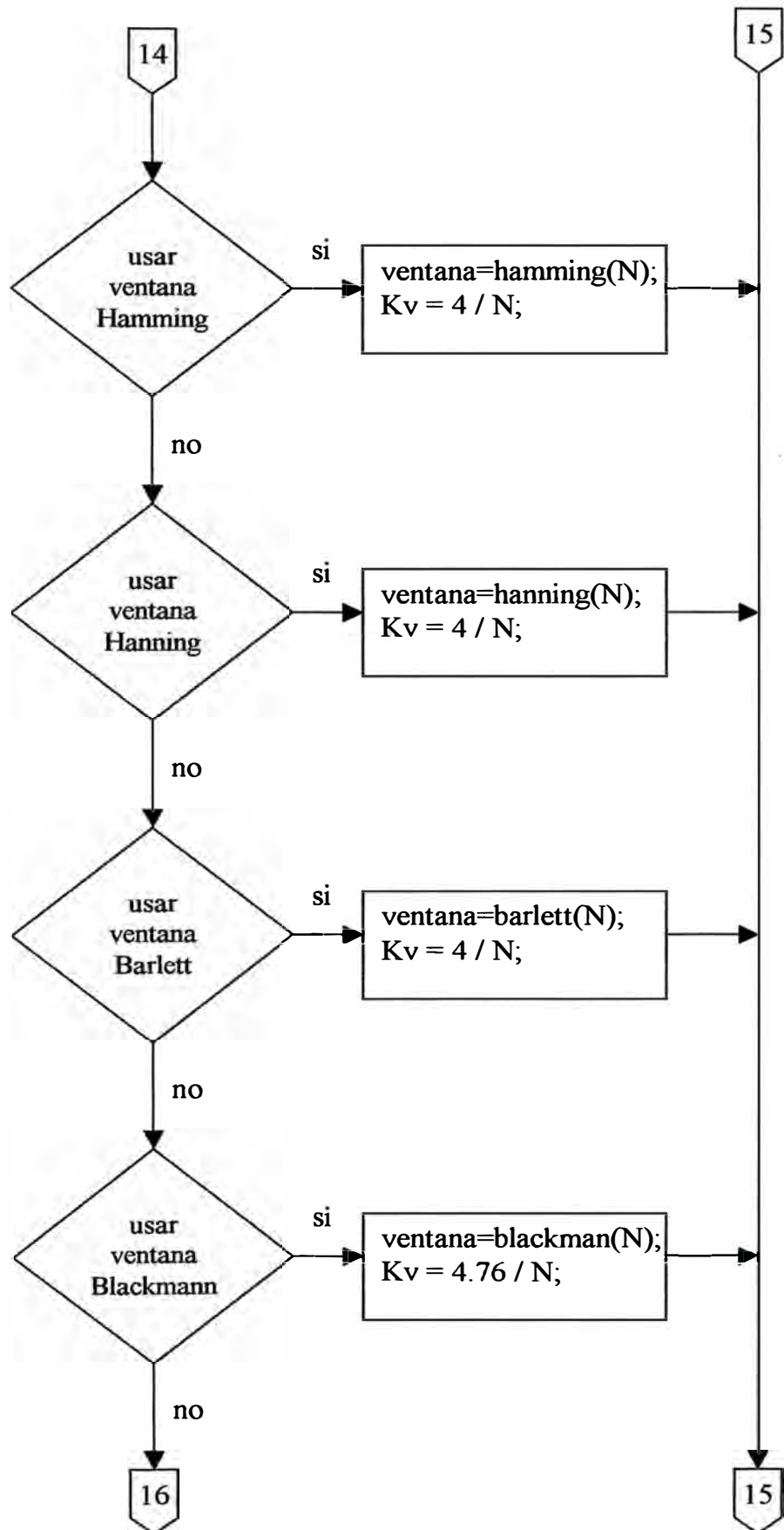
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



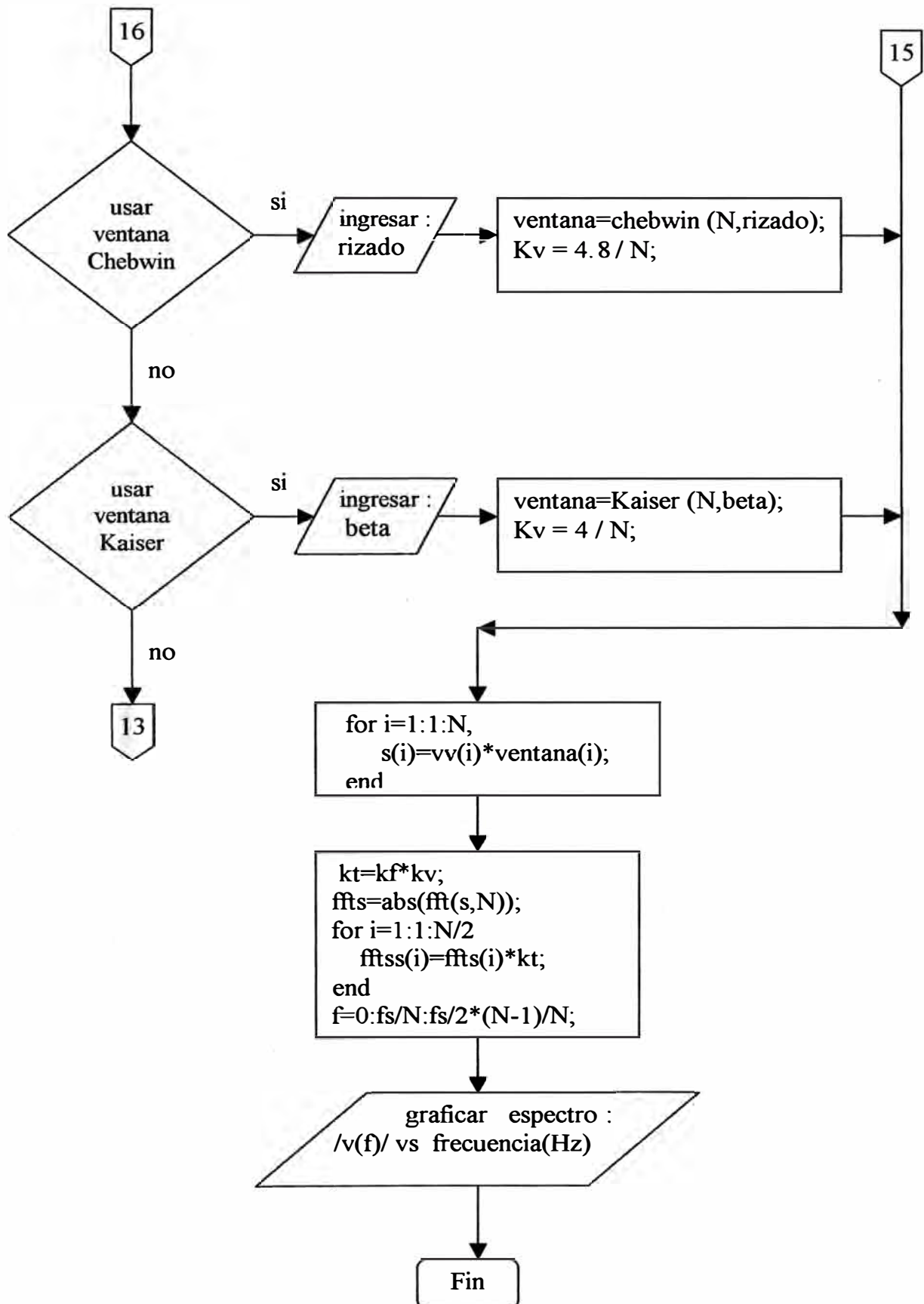
**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



**Fig. 3.32 Diagrama de flujo de programa “turbina.m”
(continuación)**



3.3 Costos de equipos analizadores de vibración

Los costos se muestran en la Tabla 3.6.

PROVEEDOR	EQUIPO	CARACTERÍSTICAS	COSTO (US\$)
CSI ELECTRONIC SYSTEMS INTERNATIONAL	Analizador y Software CSI Modelo 2120A-CU	Colector / analizador portátil de maquinaria de 1 canal.	14,999
	Vib View Silver Software CSI Modelo A472001	Software de mantenimiento predictivo.	13,530
	Balancing Option For 2120A	Accesorio de balanceo.	10,330
	UL Traspec ADV Laser Toolkit CSI Modelo A890230-IN	Sistema de alineamiento laser.	17,499
SKF	Microlog CMVA55 SP-K	Colector / analizador de datos / balanceo dinámico.	17,668
	Prism 4 for Windows CMS 100-SP	Software de análisis Vibracional.	14,990
ENTEK-IRD INSTRUMENTOS INDUSTRIALES	Data Pac 1500 ENTEK-IRD	Colector de datos / analizador / balanceador.	13,995
	Accelerometer Kit	Paquete acelerómetro.	1,135
	Lasetach Balancing Kit.	Kit de balanceo.	1,995
	Emonitor Odisea.	Software de mantenimiento predictivo.	12,500

Tabla 3.6 Costos de equipos analizadores de vibración

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1.- La Transformada Rápida de Fourier FFT, es una herramienta sumamente valiosa para analizar y detectar problemas existentes en maquinaria en general, con tan solo procesar sus señales de vibración.

Muchos defectos mecánicos generan vibraciones y un espectro característico propio que permite identificar el tipo de problema (frecuencia) y la magnitud del problema (amplitud) lo que permitiría corregirlo ó de lo contrario predecir un problema crítico que se presentaría a futuro de alguno de los componentes de la máquina que originaría una parada de maquinaria y por consiguiente pérdida de dinero debido a que la planta no produciría.

2.- Es importante resaltar la importancia de la Tabla 2.3 , la cual nos permite identificar fallas y causas más comunes con el tipo de espectro esperado para el caso de Turbinas de Gas.

3.- Los niveles de vibración máximos permisibles son una función del diseño de la Turbina de Gas y de la frecuencia de vibración y se fijan de acuerdo a normas existentes.

Cabe señalar que la protección de la Turbina de Gas Siemens modelo V84.3A de 150 MW y de velocidad nominal 60Hz en ETEVENSA para el caso de vibraciones en los cojinetes está fijado en el sistema de control de la turbina en :

alarma ó advertencia en 9.3 mm/seg y

disparo ó parada en 14.7 mm/seg

Se observa que estos valores de alarma y disparo según la Norma ISO 2372 están dentro del rango tolerable de 7.1 a 18 mm/seg para el caso de Turbo-máquinas.

En el caso de la turbina Westinghouse modelo W-501D de 100 MW (velocidad nominal 60Hz), los seteos en el sistema de control de la turbina para protección de vibraciones en los cojinetes es

alarma ó advertencia en 5.75 mils (0.143mm) y

disparo ó parada en 8.6 mils (0.215mm)

Para la turbina Westinghouse los valores según la Norma VDI 2059 deberían ser :

aceptable en 0.060 mm

alarma ó advertencia en 0.1125 mm y

disparo ó parada en 0.165 mm

4.- La mejor indicación de una falla inminente es el cambio de la tendencia (Trend) del espectro de vibración. El cambio es detectado por comparación de datos actuales con datos almacenados anteriormente y especialmente aquellos recogidos como base ó patrón normal de vibración.

Cuando un cambio es detectado, debería de comprenderse el diseño básico de la turbina de combustión. Conocer el proceso y las velocidades de operación de la turbina, el número de álabes por etapa, velocidades rotacionales principales para poder así determinar la causa del problema.

RECOMENDACIONES

1.- El sistema para obtener el análisis espectral de las señales de vibración provenientes de los cojinetes de la Turbina de Gas Siemens modelo V84.3A de 150MW no está implementado en “ETEVENSA”, por lo que se recomienda implementarlo para lo cual sería necesario una Tarjeta de adquisición de datos y su procesamiento y presentación de resultados en un programa como por ejemplo Matlab. La inversión que se requeriría no sería muy elevada con los beneficios que se tendrían de monitorear permanentemente el estado de la Turbina de Gas.

ANEXO A : Acrónimos

AC	corriente alterna
BP	filtro pasa-banda
DC	corriente continua
DFT	Transformada Discreta de Fourier
ciclos/seg	ciclos por segundo
cm	centimetro
dB	decibeles
Eddy current probe	sensor de corriente parásita
FFT	Fast Fourier Transformation
FPPI	Fiber Fabry-Perotinterferometer
g	aceleración de la gravedad 32.2 pies/seg ²
Gap	espacio
HP	filtro pasa-alto
Hz	Hertz
MAS	Movimiento Armónico Simple
micrones	micro metro
midspan	espacio medio
mils	milésima de pulgada
mm	milímetro
mt	metro
mA	miliamperio
mV	milivoltio
mV/pulg/seg	milivoltio por pulgada por segundo
kV	kilovoltio
kHz	kiloHertz
LP	filtro pasa-bajo

MW	MegaWatio
Mpa	MegaPascal
Ohm	Ohmios
PDS	Procesamiento Digital de Señales
PPS	Polyphenylene Sulfide
pies/seg	pies por segundo
pies/seg ²	pies por segundo al cuadrado
pulg	pulgada
pulg/seg	pulgada por segundo
pulg/seg ²	pulgada por segundo al cuadrado
rad/seg	radianes por segundo
rms	valor eficaz cuadrático
RPM	revoluciones por minuto
RF	radio frecuencia
SCU	unidad acondicionadora de señal
TiO ₂	Dióxido de Titanio
V	voltios

ANEXO B : Programa simula.m

```
%*****
%      Generación de datos de vibraciones      *
%      Archivo : simula.m                      *
%*****

clear all;      % Limpiar la memoria de variables y funciones
clc;           % Limpiar la ventana de comandos
close all;     % Cerrar todas las ventanas de gráficas abiertas
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'      Programa para calcular una señal de la forma \r');
fprintf(1,'      _____');
fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'
V(t)=A(1)*sen[2*pi*F(1)*t+P(1)]+A(2)*sen[2*pi*F(2)*t+P(2)]+...+A(n)*sen[2*pi*
F(n)*t+P(n)] \r');

fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'      para 0<t<tf y evaluada cada "ts" \r');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'      Donde : \r');
fprintf(1,'      _____');
fprintf(2,' \n');
```



```

fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'          A(1),A(2),...,A(n) ----> Amplitudes  \r');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'          F(1),F(2),...,F(n) ----> Frecuencias  \r');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'          P(1),P(2),...,P(n) ----> Fases      \r');
fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
espera=input('          Presione una tecla para continuar');
fprintf(2,' \n');
%*****

%      Lectura del tiempo de muestreo : " ts "      *
%*****

clc;          % Limpiar la ventana de comandos
fprintf(2,' \n');
ts=input('  Ingrese el tiempo de muestreo          ts = ');
fprintf(2,' \n');
while (ts<=0),
    espera=input('  Error : "ts" debe ser > que "0" ');
    fprintf(2,' \n');
    fprintf(1,'  Ingrese nuevamente "ts",...\r');
    fprintf(2,' \n');
    ts=input('  Ingrese el tiempo de muestreo          ts = ');
    fprintf(2,' \n');
end
%*****

%  Lectura del tiempo hasta donde se evaluará la función  *
%*****

fprintf(2,' \n');
tf=input('  Ingrese hasta que tiempo se evaluará la función  tf = ');
fprintf(2,' \n');
while (tf<=0),

```

```

espera=input(' Error : "tf" debe ser > que "0" ');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,' Ingrese nuevamente "tf"....\r');
fprintf(2,' \n');
tf=input(' Ingrese hasta que tiempo se evaluará la función   tf = ');
fprintf(2,' \n');
end
%*****
%   Verificación : ts <= tf   *
%*****

while (ts>tf),
    espera=input('          Error : "ts" debe ser <= que "tf" ');
    fprintf(2,' \n');
    clc;
    fprintf(1,' Ingrese nuevamente los valores....\r');
    fprintf(2,' \n');

%*****
%   Pedir nuevamente el tiempo de muestreo   *
%*****

clc;          % Limpiar la ventana de comandos
ts=input(' Ingrese el tiempo de muestreo          : ts = ');
fprintf(2,' \n');
while (ts<=0),
    espera=input(' Error : "ts" debe ser > que "0" ');
    fprintf(2,' \n');
    fprintf(1,' Ingrese nuevamente "ts"....\r');
    fprintf(2,' \n');
    ts=input(' Ingrese el tiempo de muestreo          ts = ');
    fprintf(2,' \n');
end
espera=input('          Presione una tecla para continuar...');
fprintf(2,' \n');

```

```

%*****

% Pedir nuevamente lectura del tiempo final *
%*****

clc;          % Limpiar la ventana de comandos
tf=input(' Ingrese hasta que tiempo se evaluará la función   tf=');
fprintf(2,' \n');
while (tf<=0),
espera=input(' Error : "tf" debe ser > que "0" ');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,' Ingrese nuevamente "tf"...\r');
fprintf(2,' \n');
tf=input(' Ingrese hasta que tiempo se evaluará la función   tf=');
fprintf(2,' \n');
end
espera=input('          Presione una tecla para continuar...');
fprintf(2,' \n');
end
fs=1/ts;      % frecuencia de muestreo

%*****

% Ingreso de frecuencias y amplitudes *
%*****

condicion='S'; % Inicializar el ingreso de datos en afirmativo
ns=1;         % Inicializar el contador de señales a ingresarse
while condicion=='S' | condicion=='s',
clc;         % Limpiar la ventana de comandos
fprintf(1,'Ingreso de datos de la señal : %4.0f\r',ns);
fprintf(2,' \n');
F(ns)=input('Ingrese frecuencia (Hz) = ');
fprintf(2,' \n');

%*****

% Pedir nuevamente frecuencia si es <= 0 *
%*****

```

```

while F(ns)<=0 | F(ns)>fs/2 ,
if F(ns)>fs/2,
fprintf(1,'Error : "frecuencia" debe ser <= que la mitad de la frecuencia de muestreo
fs/2 = %5.2f (Hz)',fs/2);
fprintf(2,' \n'); % por el teorema de Nyquist fs >= 2*fmáx
end
if F(ns)<=0,
espera=input(' Error : "frecuencia" debe ser > que "0" ');
end
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,' Ingrese nuevamente "frecuencia"...\r');
fprintf(2,' \n');
F(ns)=input('Ingrese frecuencia (Hz) = ');
fprintf(2,' \n');
end
A(ns)=input('Ingrese amplitud = ');
fprintf(2,' \n');
%*****
% Pedir nuevamente amplitud si es <0 *
%*****
while A(ns)<0,
espera=input(' Error : "amplitud" debe ser >= que "0" ');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,' Ingrese nuevamente "amplitud"...\r');
fprintf(2,' \n');
A(ns)=input('Ingrese amplitud = ');
fprintf(2,' \n');
end
P(ns)=input('Ingrese fase(radianes) = ');
fprintf(2,' \n');
condicion=input(' ¿ Desea ingresar otra onda sinusoidal(S/N) ? ','s');
fprintf(2,' \n');
if condicion=='S' | condicion=='s',
ns=ns+1; % "ns" es el número de señales ingresadas

```

```

end
end

%*****
%    Calculo de la señal resultante    *
%*****

nt=fix(tf/ts)+1;      % "nt" es el número de puntos en el tiempo
                    %    a evaluarse las señales
s=zeros(nt,ns+1);    % Matriz que contiene toda la información
for i=1:1:nt,
    for j=1:1:ns,
        s(i,j)=A(j)*sin(2*pi*F(j)*(i-1)*ts+P(j));
    end
end
end
for i=1:1:nt,
    for j=1:1:ns,
        s(i,ns+1)= s(i,ns+1)+s(i,j);
    end
end
end
t=0:ts:(nt-1)*ts;    % Rango de tiempo a evaluar las señales
for i=1:1:nt,
    v(i)= s(i,ns+1);  % Vector que contiene la señal resultante
end
figure(1);
subplot(211);
plot(t,v,'r');      % Graficar La señal resultante
xlabel('Tiempo (seg)');
ylabel(' Amplitud [mm/seg]');
abcd = sprintf('Señal Resultante en el tiempo');
set(get(gca,'title'),'String',abcd);
zoom on;
grid;
subplot(212);
stem(F,A);

```

```

xlim ([0 fix(max(F))+1]);
ylim ([0 fix(max(A))+1]);
xlabel(' Frecuencia (Hz)');
ylabel(' Amplitud [mm/seg]');
abcd = sprintf('Composición en Frecuencia de la Señal Resultante');
set(get(gca,'title'),'String',abcd);
zoom on;
grid;
%*****
%  Guardar los datos en disco de la señal resultante  *
%*****
save vibracion.m v -ASCII    % Graba en el disco duro el archivo "vibracion.m"
                             % la variable de memoria "s"
fprintf(1,' | Se han guardado %7.0f datos muestreados a %2.6f (seg) en el archivo
                                                : vibracion.m | \r',nt,ts);

fprintf(2,' \n');
reporte='n';
fprintf(2,' \n');
reporte=input(' Desea un reporte final (s/n)? : ... ', 's');
fprintf(2,' \n');
if reporte == 's' | reporte == 'S'
clc;
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'          Reporte final de generación de señal \r');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,'          _____ \r');
fprintf(2,' \n');
fprintf(2,' \n');
fprintf(1,' Archivo guardado          : vibracion.m \r');
fprintf(1,' Tiempo de muestreo          : ts = %3.6f (seg) \r',ts);
fprintf(1,' Tiempo final de evaluación   : tf = %3.3f (seg) \r',tf);
fprintf(1,' Número de muestras guardadas : nt = %3.0f \r',nt);
fprintf(1,' Número de señales ingresadas ns = %3.0f \r',ns);
fprintf(2,' \n');

```

```

fprintf(2, '\n');
fprintf(1, '      Señales ingresadas con frecuencia "F[i]" en Hz , amplitud "A[i]"
                                     en mm/seg \r', nt);
fprintf(1, '      fase "P[i]" en radianes para "i" en el rango [1,%3.0f] \r', ns);
fprintf(2, '\n');
for i=1:1:ns,
    fprintf(1, ' señal[%3.0f] : F(%3.0f) = %5.3f , A(%3.0f)=%4.3f ,
              P(%3.0f)=%2.2f\r', i, F(i), A(i), P(i));
end
else
fprintf(2, '\n');
fprintf(1, ' Reporte no solicitado ... ');
fprintf(2, '\n');
end
fprintf(2, '\n');

```

ANEXO C : Programa turbina.m

```
%*****
%*****
% Informe de Suficiencia : " Procesamiento de Señales
%                               de vibración en Turbinas de Gas"
% Archivo : turbina.m
%*****
%*****
clear all;    % Limpiar la memoria de variables y funciones
clc;         % Limpiar la ventana de comandos
close all;   % Cerrar todas las ventanas de gráficas abiertas
%*****
% Carga de datos de vibración muestreado cada "ts"
% en [mm/seg] desde un archivo de disco duro
%*****
load vibracion.m; % Carga del archivo "vibracion.m"
m=size(vibracion); % Matriz "m", contiene el número de filas y columnas de
                    % "vibracion"
f=m(1,1);         % "f" es el número de filas de "vibracion"
c=m(1,2);         % "c" es el número de columnas de "vibracion"
n=f*c;           % "n" es el número total de datos de "vibracion"
fprintf(2, '\n'); % Salta una línea el cursor
fprintf(1, 'El número de puntos de la señal de vibración es : %6.0f \r',n);
                % visualizar en pantalla la cantidad de datos disponibles
fprintf(2, '\n'); % Salta una línea el cursor
```



```

espera=input(' Presione una tecla para continuar...'); % Pausa
fprintf(2,' \n'); % Salta una línea el cursor
%*****

% Lectura del tiempo de muestreo : "ts"
%*****

ts=input(' Ingrese el tiempo de muestreo ts = ');
fprintf(2,' \n'); % Salta una línea el cursor
while (ts<=0),
    espera=input(' Error : "ts" debe ser > que "0" ');
    fprintf(2,' \n');
    fprintf(1,' Ingrese nuevamente "ts"...\r');
    fprintf(2,' \n');
    ts=input(' Ingrese el tiempo de muestreo ts = ');
    fprintf(2,' \n');
end
fs=1/ts; % Frecuencia de muestreo...
fny=fs/2; % Frecuencia de Nyquist (fny=fmax <= fs/2)
%*****

% Convirtiendo la data del archivo "vibracion" a vector
%*****

nt=0; % Inicializando contador de muestras ó datos en el archivo "vibracion"
for i=1:1:f,
    for j=1:1:c,
        nt=nt+1;
        v(nt)=vibracion(i,j);
    end
end
%*****

% Filtros pasa-bajos disponibles a usarse
%*****

terminar='n'; % Inicializar el lazo para pedir que la ventana sea elegida
% correctamente

usarfiltro='s';

```

```

while (terminar == 'n'),
    clc;
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(1, '
    ----- \n');
    fprintf(1, '
    Filtro pasa-banda para capturar la fundamental \n');
    fprintf(1, '
    ó armónica de una frecuencia \n');
    fprintf(1, '
    ----- \n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(1, '
    Butterworth <1> \n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(1, '
    Chebyshev I <2> \n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(1, '
    Chebyshev II <3> \n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(1, '
    Yulewalk <4> \n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(1, '
    Elíptico <5> \n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(1, '
    No usar filtro <6> \n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(2, '\n');
    fprintf(2, '\n');
    seleccion=input('
    Opción : ');
    %*****
    % Creando Ventanas
    %*****
    if seleccion==1|seleccion==2|seleccion==3|seleccion==4|seleccion==5,
        terminar='n';
        while terminar=='n',
            clc;

```

```

fprintf(2, '\n');    % Salta una línea el cursor
Armónico=input(' Ingrese número entero(1:fundamental):armónico=');
fprintf(2, '\n');    % Salta una línea el cursor
Frecuencia= input(' Ingrese frecuencia fundamental(Hz):frecuencia= ');
if (armónico* frecuencia<fs/2)&(armónico>0)* (frecuencia>0),
    fprintf(2, '\n');    % Salta una línea el cursor
    fpb1=0.99*armónico*frecuencia/fny; % frecuencia inferior del pasa-
                                     % banda (normalizada)
    fpb2=1.01*armónico*frecuencia/fny; % frecuencia superior del
                                     % pasa-banda (normalizada)
    fpb=[fpb1 fpb2];           % frecuencias del pasa-banda
                                % (normalizada)

    terminar='s';
else
    fprintf(2, '\n'); % Salta una línea el cursor
    fprintf(1, ' ¡ Error la frecuencia a capturar debe ser <= a "fs/2=%6.2f
                (Hz)" y mayor que CERO ¡ \n',fny);
    fprintf(2, '\n'); % Salta una línea el cursor
    espera=input(' Presione una tecla para continuar...'); % Pausa
    fprintf(2, '\n'); % Salta una línea el cursor
    terminar='n';
end
end
end
if seleccion==1,    % Filtro Butterworth
    clc;
    fprintf(2, '\n');    % Salta una línea el cursor
    fprintf (1,' Ingreso de datos del filtro Butterworth
                [B,A]=butter(Nb,wn)\n');
    fprintf(2, '\n');    % Salta una línea el cursor
    Nb=input(' Ingrese el grado del filtro (típico 3)    Nb = ');
    fprintf(2, '\n');    % Salta una línea el cursor
    % 0 < wn < 1 , wn=1 implica que la frecuencia de corte=fs/2=fny
    [B,A]=butter(Nb,fpb);

```

```

cadena= sprintf('Respuesta frecuencia de filtro pasa-banda
"Butterworth" de Orden %3.0f para filtrar %6.2f Hz',Nb,armónico*
                                frecuencia);

orden=Nb;
kf=1;          % constante al aplicar el filtro
terminar='s';
elseif seleccion==2,      % filtro Chebyshev I
    clc;
    fprintf(2,'\n');      % salta una línea el cursor
    fprintf(1,' Ingrese datos de filtro Chebyshev I
                                [B,A]=(Nch1,Rp,wn)\n');
    fprintf(2,'\n');      % salta una línea el cursor
    Nch1=input(' Ingrese el grado del filtro (típico 4)   Nch1 = ');
    fprintf(2,'\n');      % salta una línea el cursor
    Rp=input(' Ingrese el rizado de la banda de paso (típico 0.1dB):Rp= ');
    fprintf(2,'\n');      % salta una línea el cursor
    % 0 < wn < 1 , wn=1 implica que la frecuencia de corte=fs/2=fny
    [B,A]=cheby1(Nch1,Rp,fpb);
    cadena= sprintf('Respuesta frecuencia de filtro pasa-banda "Chebyshev
                                I" de orden %3.0f y Rp=%3.1f para filtrar %6.2f Hz
                                ',Nch1,Rp,armónico* frecuencia);

    orden=Nch1;
    kf=10^(Rp/20);        % constante al aplicar el filtro
    terminar='s';
elseif seleccion==3,      % filtro Chebyshev II
    clc;
    fprintf(2,'\n');      % salta una línea el cursor
    fprintf(1,' Ingrese datos de filtro Chebyshev II :
                                [B,A]=(Nch2,Rs,wn)\n');
    fprintf(2,'\n');      % salta una línea el cursor
    Nch2=input(' Ingrese el grado del filtro (típico 3)   Nch2 = ');
    fprintf(2,'\n');      % salta una línea el cursor
    Rs=input('Ingrese el rizado de la banda de parada (típico 20dB):
                                Rs = ');

```

```

fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
%  $0 < \omega_n < 1$  ,  $\omega_n=1$  implica que la frecuencia de corte= $f_s/2=f_{ny}$ 
[B,A]=cheby2(Nch2, Rs, fpb);
cadena= sprintf('Respuesta frecuencia de filtro pasa-banda "Chebyshev
                II" de orden %3.0f y  $R_s$ =%3.1f para filtrar %6.2f Hz '
                ,Nch2, Rs, armónico*frecuencia);

orden=Nch2;
kf=1;              % constante al aplicar el filtro
terminar='s';
elseif seleccion==4,    % filtro Yulewalk
    clc;
    fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
    fprintf(1, 'Ingrese datos de filtro Yulewalk : [B,A]=(Ny,F,M)\n');
    fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
    Ny=input('Ingrese el grado del filtro (típico 15)    Ny = ');
    paso=0.0001;
    fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
    total=fix(1/paso)+1;
    wn=0:paso:1;
    posicionfx=fix(armónico* frecuencia*(1/paso)*(1/fny));
    %  $0 < \omega_n < 1$  ,  $\omega_n=1$  implica que la frecuencia de corte= $f_s/2=f_{ny}$ 
    for i=1:1:total,
        M(i)=0;
    end
    for i=posicionfx-20:1:posicionfx+20,
        M(i)=1;
    end
    [B,A]=yulewalk(Ny, wn, M);
    cadena= sprintf('Respuesta frecuencia de filtro pasa-banda "Yulewalk"
                    de orden %3.0f para filtrar %6.2f Hz', Ny, armónico* frecuencia);
    orden=Ny;
    kf=1;          % constante al aplicar el filtro
    terminar='s';
elseif seleccion==5,    % filtro Elíptico

```

```

clc;
fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
fprintf(1, 'Ingrese datos de filtro Elíptico :[B,A]=ellip(Ne,Rp,Rs,wn)\n');
fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
Ne=input(' Ingrese el grado del filtro (típico 3) : Ne = ');
fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
Rp=input('Ingrese el rizado de banda de paso(típico 0.5dB): Rp = ');
fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
Rs=input('Ingrese el rizado de la banda de parada(típico 20dB):Rs = ');
fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
% 0 < wn < 1 , wn=1 implica que la frecuencia de corte=fs/2=fny
[B,A]=ellip(Ne,Rp,Rs,fpb);
cadena= sprintf('Respuesta frecuencia de filtro pasa-banda "Elíptico"
                de orden %3.0f y Rp=%3.1f,Rs=%3.1f para filtrar %6.2f Hz
                ',Ne,Rp,Rs,armónico* frecuencia);
orden=Ne;
kf=10^(Rp/20);    % constante al aplicar el filtro
terminar='s';
elseif seleccion==6,    % no usar filtro
    clc;
    fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
    fprintf(1, 'No se usará filtro ... \n');
    fprintf(2, '\n');    % salta una línea el cursor
    terminar='s';
    kf=1;    % constante al aplicar el filtro
    usarfiltro='n';    % guarda si no se uso filtro alguno
else
    fprintf(2, '\n');
    pausa=input(';Opción no valida, presione una tecla para continuar ; \n');
    terminar='n';
end;
end

```

```

%*****
% Graficando la respuesta en frecuencia del filtro conociendo A,B
% y la señal a la salida del filtro
%*****
if usarfiltro=='s',
    fny=fs/2; % frecuencia de Nyquist
    [H,f]=freqz(B,A,1024,fs);
    if (max(abs(H))<1) & (max(abs(H))>0.1),
        ymax=1.25;
    else
        ymax=1.25*max(abs(H));
    end
    figure(1);
    subplot(211);
    plot( f , abs(H),'b' ); % Graficar respuesta en frecuencia del filtro
    xlim ([0 1.1*max(f)]);
    ylim ([0 ymax]);
    xlabel(' Frecuencia (Hz)');
    ylabel(' | H ( f ) | ');
    set(get(gca,'title'),'String',cadena);
    zoom on;
    grid;
    vs=filter(B,A,v); % salida "vs" del filtro al aplicar "v"
    for i=1:1:nt,
        v(i)=vs(i); % reasignando nuevamente los valores filtrados de "vs" hacia "v"
    end
end
%*****
% Ingreso de la cantidad de muestras a tomarse para evaluar la FFT
%*****
ok=0;
while(ok==0), % solicitar hasta que el valor "N" sea correcto

    N=input(' Elija a cuantos puntos se aplicarán la FFT (potencia de 2) : N = ');

```

```

fprintf(2,' \n');      % salta una línea el cursor
%*****
% Lazo para verificar si "N" es potencia de 2
%*****
terminar='n';
n=N;
N2=0;      % Inicializando N2=0 que N no es potencia de 2
while(terminar=='n')& (N>=2),
q=n/2 ;      % cociente de la división
r=rem(n,2);  % residuo de la división

if (r==1)& (q>=1),
    fprintf(1,' Error N=%4.0f no es potencia de 2 : \r',N);
    fprintf(2,' \n');
    terminar='s';
elseif (r==0)& (q>1),
    n=q; % continuar el proceso para ver si "N" es potencia de 2
else (r==0)& (q==1),
    terminar='s';
    N2=1; % N2=1 indica que N es potencia de 2
end
end
if ( N>1)&(N<=nt)&(N2==1),
    ok=1;
end
if (N>nt),
    fprintf(1,' Error N=%4.0f no está dentro del rango : [1,%4.0f] \r',N,nt);
    fprintf(2,' \n');
end
if (N==1),
    fprintf(1,' Error "N" debe ser >=2');
    fprintf(2,' \n');
end
if (N<0),

```



```

    fprintf(1,' Error "N" no puede ser negativo');
    fprintf(2,' \n');
end
if (N==0),
    fprintf(1,' Error "N" no puede ser cero');
    fprintf(2,' \n');
end
end
%*****
% Verificar "nx" correcto , toma de valores
%*****
terminar='n';
while(terminar=='n'), % solicitar hasta que el valor "nx" sea correcto
    fprintf(1,' Los datos se pueden tomar en el rango siguiente : [1,%4.0f]',nt-N+1);
    fprintf(2,' \n'); % salta una línea el cursor
    fprintf(2,' \n'); % salta una línea el cursor
    nx=input(' Ingrese el punto de inicio "nx" : nx = ');
    fprintf(2,' \n'); % salta una línea el cursor
    if (nx>=1)&(nx<=nt-N+1),
        terminar='s';
    elseif (nx<0),
        fprintf(1,' ! Error nx=%4.0f no puede ser negativo ! \r',nx);
        fprintf(2,' \n');
    else,
        fprintf(2,' \n');
        fprintf(1,' ! Error nx=%4.0f no está dentro del rango : [1,%4.0f] ! \r',nx,nt-
                                                    N+1);
        fprintf(2,' \n');
    end
end
end
for i=1:1:N,
    vv(i)=v(i+nx-1); % "vv" contiene solo las "N" primeras muestras del archivo
                    % "vibracion"
end; % a partir de la posición "nx"

```

```

%*****
%      Menú para solicitar la ventana que se aplicará :
%      rectangular,triangular,hamming,hanning,...,etc
%*****
terminar='n';      % Inicializar el lazo para pedir que la ventana sea elegida
                  % corectamente

while (terminar=='n'),
    clc;
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Tipos de ventanas disponibles para usar \n');
    fprintf(1,'          _____ \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Rectangular <1> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Triangular <2> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Hamming <3> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Hannig <4> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Barlett <5> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Blackman <6> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Chebwin <7> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(1,'          Kaiser <8> \n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(2,'\n');
    fprintf(2,'\n');

    seleccion=input('          Elija el tipo de ventana : ');

```

```

%*****
% · Creando ventanas
%*****
if  seleccion==1,
    ventana=boxcar(N);
    eleccion='Rectangular';
    kv=2/N;           % "kv" constante al aplicar la ventana
    terminar='s';
elseif seleccion==2,
    ventana=triang(N);
    eleccion='Triangular';
    kv=4/N;           % "kv" constante al aplicar la ventana
    terminar='s';
elseif seleccion==3,
    ventana=hamming(N);
    eleccion='Hamming';
    kv=4/N;           % "kv" constante al aplicar la ventana
    terminar='s';
elseif seleccion==4,
    ventana=hanning(N);
    eleccion='Hanning';
    kv=4/N;           % "kv" constante al aplicar la ventana
    terminar='s';
elseif seleccion==5,
    ventana=bartlett(N);
    eleccion='Barlett';
    kv=4/N;           % "kv" constante al aplicar la ventana
    terminar='s';
elseif seleccion==6,
    ventana=blackman(N);
    eleccion='Blackman';
    kv=4.76/N;        % "kv" constante al aplicar la ventana
    terminar='s';
elseif seleccion==7,

```

```

fprintf(2,' \n');          % salta una línea el cursor
rizado=input('Ingrese el rizado de la ventana Chebwin ( típico 80dB)
              rizado = ');
fprintf(2,' \n');          % salta una línea el cursor
ventana=chebwin(N,rizado);
eleccion='Chebwin';
kv=4.8/N;                  % "kv" constante al aplicar la ventana
terminar='s';
elseif seleccion==8,
    fprintf(2,' \n');          % salta una línea el cursor
    beta=input('      Ingrese el valor de "beta" a usarse en la ventana Kaiser
              (típico 6 ): beta = ');
    fprintf(2,' \n');          % salta una línea el cursor
    ventana=kaiser(N,beta);
    eleccion='Kaiser';
    kv=4/N;                  % "kv" constante al aplicar la ventana
    terminar='s';
else
    fprintf(2,' \n');
    pausa=input('¡Opción no valida, presione una tecla para continuar ¡ \n');
    terminar='n';
end;
end

%*****
% Convolución de la ventana elegida con la señal de "N" muestras
%*****

for i=1:1:N,
    s(i)=vv(i)*ventana(i); % "s" es la convolución resultante de ambas señales
end;

```

```

%*****
% Aplicando la FFT a las "N" muestras extraídas al archivo "vibración"
% el cual tiene "N" muestras en total, a partir de la posición "nx"
%*****
kt=kf*kv; % factor de calibración total(kt) = factor filtro(kf)*factor Ventana(Kv)
ffts=abs(fft(s,N)); % "ffts" es la Transformada de Fourier de "s", evaluado en "N"
                % puntos
for i=1:1:N/2,
    ffts(i)=ffts(i)*kt; % "ffts" contiene solo las "N/2" primeras muestras
end;
f=0:fs/N:fs/2*(N-1)/N; % frecuencia de análisis
if usarfiltro=='s',
    figure(1);
    subplot(212);
else
    figure(1);
end
plot(f,ffts,'r');
xlabel(' Frecuencia (Hz)');
ylabel(' / V(f) / [mm/seg]');
abcd = sprintf('Espectro frecuencia : ventana "%s", fs=%6.2f Hz , N=%5.0f muestras'
,eleccion,fs,N);
set(get(gca,'title'),'String',abcd);
zoom on;
grid;

```

ANEXO D : Archivo vibracion1.m

0.000000e+000	1.4075313e+000	2.5453404e+000	3.3279015e+000	3.8677812e+000	
4.3241343e+000	4.7507197e+000	5.0852310e+000	5.2543076e+000	5.2513080e+000	
5.1024411e+000	4.7886942e+000	4.2486178e+000	3.4803841e+000	2.6206188e+000	
1.8789792e+000	1.3636754e+000	9.7028166e-001	4.6078838e-001	-3.3034473e-001	-
1.3579748e+000	-2.4202409e+000	-3.3334723e+000	-4.0474118e+000	-4.6069627e+000	-
5.0405995e+000	-5.3186264e+000	-5.4161511e+000	-5.3759116e+000	-5.2660939e+000	-
5.0680233e+000	-4.6369377e+000	-3.8160085e+000	-2.6098593e+000	-1.2369946e+000	-
1.0049095e-002	9.7244029e-001	1.7057832e+000	2.3705539e+000	3.0591392e+000	
3.7317810e+000	4.2965786e+000	4.7124874e+000	4.9927843e+000	5.1273941e+000	
5.0491275e+000	4.7112636e+000	4.1920797e+000	3.6834254e+000	3.3377287e+000	
3.1152618e+000	2.7966227e+000	2.1653782e+000	1.1906156e+000	3.9152540e-002	-
1.0776422e+000	-2.0574448e+000	-2.9191443e+000	-3.6991727e+000	-4.3748716e+000	-
4.8992647e+000	-5.2797719e+000	-5.5757816e+000	-5.7966563e+000	-5.8226681e+000	-
5.4698986e+000	-4.6639238e+000	-3.5499588e+000	-2.4125475e+000	-1.4680724e+000	-
7.2497109e-001	-3.6047400e-002	7.2830765e-001	1.5665621e+000	2.3858944e+000	
3.1152618e+000	3.7484570e+000	4.2822414e+000	4.6543877e+000	4.7864635e+000	
4.6964564e+000	4.5380218e+000	4.4861876e+000	4.5632735e+000	4.5856308e+000	
4.3024149e+000	3.6020354e+000	2.5914286e+000	1.4849085e+000	4.2954406e-001	-
5.6058482e-001	-1.5260468e+000	-2.4606454e+000	-3.3094117e+000	-4.0475653e+000	-
4.7153522e+000	-5.3412938e+000	-5.8382196e+000	-6.0149671e+000	-5.7293547e+000	-
5.0405995e+000	-4.1962344e+000	-3.4485958e+000	-2.8711644e+000	-2.3450409e+000	-
1.7106460e+000	-9.1971708e-001	-4.5808374e-002	8.2106773e-001	1.6527276e+000	
2.4496131e+000	3.1635150e+000	3.7012589e+000	4.0277431e+000	4.2457980e+000	
4.5318072e+000	4.9622558e+000	5.4035215e+000	5.5918277e+000	5.3400921e+000	
4.6768055e+000	3.7925813e+000	2.8655935e+000	1.9465244e+000	9.9680306e-001	4.2002909e-015
-9.9680306e-001	-1.9465244e+000	-2.8655935e+000	-3.7925813e+000	-4.6768055e+000	-
5.3400921e+000	-5.5918277e+000	-5.4035215e+000	-4.9622558e+000	-4.5318072e+000	-
4.2457980e+000	-4.0277431e+000	-3.7012589e+000	-3.1635150e+000	-2.4496131e+000	-
1.6527276e+000	-8.2106773e-001	4.5808374e-002	9.1971708e-001	1.7106460e+000	
2.3450409e+000	2.8711644e+000	3.4485958e+000	4.1962344e+000	5.0405995e+000	
5.7293547e+000	6.0149671e+000	5.8382196e+000	5.3412938e+000	4.7153522e+000	
4.0475653e+000	3.3094117e+000	2.4606454e+000	1.5260468e+000	5.6058482e-001	-
4.2954406e-001	-1.4849085e+000	-2.5914286e+000	-3.6020354e+000	-4.3024149e+000	-
4.5856308e+000	-4.5632735e+000	-4.4861876e+000	-4.5380218e+000	-4.6964564e+000	-
4.7864635e+000	-4.6543877e+000	-4.2822414e+000	-3.7484570e+000	-3.1152618e+000	-
2.3858944e+000	-1.5665621e+000	-7.2830765e-001	3.6047400e-002	7.2497109e-001	
1.4680724e+000	2.4125475e+000	3.5499588e+000	4.6639238e+000	5.4698986e+000	
5.8226681e+000	5.7966563e+000	5.5757816e+000	5.2797719e+000	4.8992647e+000	
4.3748716e+000	3.6991727e+000	2.9191443e+000	2.0574448e+000	1.0776422e+000	-
3.9152540e-002	-1.1906156e+000	-2.1653782e+000	-2.7966227e+000	-3.1152618e+000	-
3.3377287e+000	-3.6834254e+000	-4.1920797e+000	-4.7112636e+000	-5.0491275e+000	-
5.1273941e+000	-4.9927843e+000	-4.7124874e+000	-4.2965786e+000	-3.7317810e+000	-
3.0591392e+000	-2.3705539e+000	-1.7057832e+000	-9.7244029e-001	-1.0049095e-002	
1.2369946e+000	2.6098593e+000	3.8160085e+000	4.6369377e+000	5.0680233e+000	
5.2660939e+000	5.3759116e+000	5.4161511e+000	5.3186264e+000	5.0405995e+000	
4.6069627e+000	4.0474118e+000	3.3334723e+000	2.4202409e+000	1.3579748e+000	
3.3034473e-001	-4.6078838e-001	-9.7028166e-001	-1.3636754e+000	-1.8789792e+000	

2.6206188e+000	-3.4803841e+000	-4.2486178e+000	-4.7886942e+000	-5.1024411e+000	-
5.2513080e+000	-5.2543076e+000	-5.0852310e+000	-4.7507197e+000	-4.3241343e+000	-
3.8677812e+000	-3.3279015e+000	-2.5453404e+000	-1.4075313e+000	-2.1335823e-014	-
1.4075313e+000	2.5453404e+000	3.3279015e+000	3.8677812e+000	4.3241343e+000	-
4.7507197e+000	5.0852310e+000	5.2543076e+000	5.2513080e+000	5.1024411e+000	-
4.7886942e+000	4.2486178e+000	3.4803841e+000	2.6206188e+000	1.8789792e+000	-
1.3636754e+000	9.7028166e-001	4.6078838e-001	-3.3034473e-001	-1.3579748e+000	-
2.4202409e+000	-3.3334723e+000	-4.0474118e+000	-4.6069627e+000	-5.0405995e+000	-
5.3186264e+000	-5.4161511e+000	-5.3759116e+000	-5.2660939e+000	-5.0680233e+000	-
4.6369377e+000	-3.8160085e+000	-2.6098593e+000	-1.2369946e+000	1.0049095e-002	-
9.7244029e-001	1.7057832e+000	2.3705539e+000	3.0591392e+000	3.7317810e+000	-
4.2965786e+000	4.7124874e+000	4.9927843e+000	5.1273941e+000	5.0491275e+000	-
4.7112636e+000	4.1920797e+000	3.6834254e+000	3.3377287e+000	3.1152618e+000	-
2.7966227e+000	2.1653782e+000	1.1906156e+000	3.9152540e-002	-1.0776422e+000	-
2.0574448e+000	-2.9191443e+000	-3.6991727e+000	-4.3748716e+000	-4.8992647e+000	-
5.2797719e+000	-5.5757816e+000	-5.7966563e+000	-5.8226681e+000	-5.4698986e+000	-
4.6639238e+000	-3.5499588e+000	-2.4125475e+000	-1.4680724e+000	-7.2497109e-001	-
3.6047400e-002	7.2830765e-001	1.5665621e+000	2.3858944e+000	3.1152618e+000	-
3.7484570e+000	4.2822414e+000	4.6543877e+000	4.7864635e+000	4.6964564e+000	-
4.5380218e+000	4.4861876e+000	4.5632735e+000	4.5856308e+000	4.3024149e+000	-
3.6020354e+000	2.5914286e+000	1.4849085e+000	4.2954406e-001	-5.6058482e-001	-
1.5260468e+000	-2.4606454e+000	-3.3094117e+000	-4.0475653e+000	-4.7153522e+000	-
5.3412938e+000	-5.8382196e+000	-6.0149671e+000	-5.7293547e+000	-5.0405995e+000	-
4.1962344e+000	-3.4485958e+000	-2.8711644e+000	-2.3450409e+000	-1.7106460e+000	-
9.1971708e-001	-4.5808374e-002	8.2106773e-001	1.6527276e+000	2.4496131e+000	-
3.1635150e+000	3.7012589e+000	4.0277431e+000	4.2457980e+000	4.5318072e+000	-
4.9622558e+000	5.4035215e+000	5.5918277e+000	5.3400921e+000	4.6768055e+000	-
3.7925813e+000	2.8655935e+000	1.9465244e+000	9.9680306e-001	-1.0491766e-014	-9.9680306e-001
-1.9465244e+000	-2.8655935e+000	-3.7925813e+000	-4.6768055e+000	-5.3400921e+000	-
5.5918277e+000	-5.4035215e+000	-4.9622558e+000	-4.5318072e+000	-4.2457980e+000	-
4.0277431e+000	-3.7012589e+000	-3.1635150e+000	-2.4496131e+000	-1.6527276e+000	-
8.2106773e-001	4.5808374e-002	9.1971708e-001	1.7106460e+000	2.3450409e+000	-
2.8711644e+000	3.4485958e+000	4.1962344e+000	5.0405995e+000	5.7293547e+000	-
6.0149671e+000	5.8382196e+000	5.3412938e+000	4.7153522e+000	4.0475653e+000	-
3.3094117e+000	2.4606454e+000	1.5260468e+000	5.6058482e-001	-4.2954406e-001	-
1.4849085e+000	-2.5914286e+000	-3.6020354e+000	-4.3024149e+000	-4.5856308e+000	-
4.5632735e+000	-4.4861876e+000	-4.5380218e+000	-4.6964564e+000	-4.7864635e+000	-
4.6543877e+000	-4.2822414e+000	-3.7484570e+000	-3.1152618e+000	-2.3858944e+000	-
1.5665621e+000	-7.2830765e-001	3.6047400e-002	7.2497109e-001	1.4680724e+000	-
2.4125475e+000	3.5499588e+000	4.6639238e+000	5.4698986e+000	5.8226681e+000	-
5.7966563e+000	5.5757816e+000	5.2797719e+000	4.8992647e+000	4.3748716e+000	-
3.6991727e+000	2.9191443e+000	2.0574448e+000	1.0776422e+000	-3.9152540e-002	-
1.1906156e+000	-2.1653782e+000	-2.7966227e+000	-3.1152618e+000	-3.3377287e+000	-
3.6834254e+000	-4.1920797e+000	-4.7112636e+000	-5.0491275e+000	-5.1273941e+000	-
4.9927843e+000	-4.7124874e+000	-4.2965786e+000	-3.7317810e+000	-3.0591392e+000	-
2.3705539e+000	-1.7057832e+000	-9.7244029e-001	-1.0049095e-002	1.2369946e+000	-
2.6098593e+000	3.8160085e+000	4.6369377e+000	5.0680233e+000	5.2660939e+000	-
5.3759116e+000	5.4161511e+000	5.3186264e+000	5.0405995e+000	4.6069627e+000	-
4.0474118e+000	3.3334723e+000	2.4202409e+000	1.3579748e+000	3.3034473e-001	-
4.6078838e-001	-9.7028166e-001	-1.3636754e+000	-1.8789792e+000	-2.6206188e+000	-
3.4803841e+000	-4.2486178e+000	-4.7886942e+000	-5.1024411e+000	-5.2513080e+000	-
5.2543076e+000	-5.0852310e+000	-4.7507197e+000	-4.3241343e+000	-3.8677812e+000	-
3.3279015e+000	-2.5453404e+000	-1.4075313e+000	-4.2671646e-014	1.4075313e+000	-
2.5453404e+000	3.3279015e+000	3.8677812e+000	4.3241343e+000	4.7507197e+000	-
5.0852310e+000	5.2543076e+000	5.2513080e+000	5.1024411e+000	4.7886942e+000	-
4.2486178e+000	3.4803841e+000	2.6206188e+000	1.8789792e+000	1.3636754e+000	-
9.7028166e-001	4.6078838e-001	-3.3034473e-001	-1.3579748e+000	-2.4202409e+000	-
3.3334723e+000	-4.0474118e+000	-4.6069627e+000	-5.0405995e+000	-5.3186264e+000	-
5.4161511e+000	-5.3759116e+000	-5.2660939e+000	-5.0680233e+000	-4.6369377e+000	-
3.8160085e+000	-2.6098593e+000	-1.2369946e+000	1.0049095e-002	9.7244029e-001	-

1.7057832e+000	2.3705539e+000	3.0591392e+000	3.7317810e+000	4.2965786e+000
4.7124874e+000	4.9927843e+000	5.1273941e+000	5.0491275e+000	4.7112636e+000
4.1920797e+000	3.6834254e+000	3.3377287e+000	3.1152618e+000	2.7966227e+000
2.1653782e+000	1.1906156e+000	3.9152540e-002	-1.0776422e+000	-2.0574448e+000 -
2.9191443e+000	-3.6991727e+000	-4.3748716e+000	-4.8992647e+000	-5.2797719e+000 -
5.5757816e+000	-5.7966563e+000	-5.8226681e+000	-5.4698986e+000	-4.6639238e+000 -
3.5499588e+000	-2.4125475e+000	-1.4680724e+000	-7.2497109e-001	-3.6047400e-002
7.2830765e-001	1.5665621e+000	2.3858944e+000	3.1152618e+000	3.7484570e+000
4.2822414e+000	4.6543877e+000	4.7864635e+000	4.6964564e+000	4.5380218e+000
4.4861876e+000	4.5632735e+000	4.5856308e+000	4.3024149e+000	3.6020354e+000
2.5914286e+000	1.4849085e+000	4.2954406e-001	-5.6058482e-001	-1.5260468e+000 -
2.4606454e+000	-3.3094117e+000	-4.0475653e+000	-4.7153522e+000	-5.3412938e+000 -
5.8382196e+000	-6.0149671e+000	-5.7293547e+000	-5.0405995e+000	-4.1962344e+000 -
3.4485958e+000	-2.8711644e+000	-2.3450409e+000	-1.7106460e+000	-9.1971708e-001
4.5808374e-002	8.2106773e-001	1.6527276e+000	2.4496131e+000	3.1635150e+000
3.7012589e+000	4.0277431e+000	4.2457980e+000	4.5318072e+000	4.9622558e+000
5.4035215e+000	5.5918277e+000	5.3400921e+000	4.6768055e+000	3.7925813e+000
2.8655935e+000	1.9465244e+000	9.9680306e-001	4.1251923e-014	-9.9680306e-001 -
1.9465244e+000	-2.8655935e+000	-3.7925813e+000	-4.6768055e+000	-5.3400921e+000 -
5.5918277e+000	-5.4035215e+000	-4.9622558e+000	-4.5318072e+000	-4.2457980e+000 -
4.0277431e+000	-3.7012589e+000	-3.1635150e+000	-2.4496131e+000	-1.6527276e+000 -
8.2106773e-001	4.5808374e-002	9.1971708e-001	1.7106460e+000	2.3450409e+000
2.8711644e+000	3.4485958e+000	4.1962344e+000	5.0405995e+000	5.7293547e+000
6.0149671e+000	5.8382196e+000	5.3412938e+000	4.7153522e+000	4.0475653e+000
3.3094117e+000	2.4606454e+000	1.5260468e+000	5.6058482e-001	-4.2954406e-001 -
1.4849085e+000	-2.5914286e+000	-3.6020354e+000	-4.3024149e+000	-4.5856308e+000 -
4.5632735e+000	-4.4861876e+000	-4.5380218e+000	-4.6964564e+000	-4.7864635e+000 -
4.6543877e+000	-4.2822414e+000	-3.7484570e+000	-3.1152618e+000	-2.3858944e+000 -
1.5665621e+000	-7.2830765e-001	3.6047400e-002	7.2497109e-001	1.4680724e+000
2.4125475e+000	3.5499588e+000	4.6639238e+000	5.4698986e+000	5.8226681e+000
5.7966563e+000	5.5757816e+000	5.2797719e+000	4.8992647e+000	4.3748716e+000
3.6991727e+000	2.9191443e+000	2.0574448e+000	1.0776422e+000	-3.9152540e-002 -
1.1906156e+000	-2.1653782e+000	-2.7966227e+000	-3.1152618e+000	-3.3377287e+000 -
3.6834254e+000	-4.1920797e+000	-4.7112636e+000	-5.0491275e+000	-5.1273941e+000 -
4.9927843e+000	-4.7124874e+000	-4.2965786e+000	-3.7317810e+000	-3.0591392e+000 -
2.3705539e+000	-1.7057832e+000	-9.7244029e-001	-1.0049095e-002	1.2369946e+000
2.6098593e+000	3.8160085e+000	4.6369377e+000	5.0680233e+000	5.2660939e+000
5.3759116e+000	5.4161511e+000	5.3186264e+000	5.0405995e+000	4.6069627e+000
4.0474118e+000	3.3334723e+000	2.4202409e+000	1.3579748e+000	3.3034473e-001 -
4.6078838e-001	-9.7028166e-001	-1.3636754e+000	-1.8789792e+000	-2.6206188e+000
3.4803841e+000	-4.2486178e+000	-4.7886942e+000	-5.1024411e+000	-5.2513080e+000 -
5.2543076e+000	-5.0852310e+000	-4.7507197e+000	-4.3241343e+000	-3.8677812e+000 -
3.3279015e+000	-2.5453404e+000	-1.4075313e+000	-5.1928243e-014	1.4075313e+000
2.5453404e+000	3.3279015e+000	3.8677812e+000	4.3241343e+000	4.7507197e+000
5.0852310e+000	5.2543076e+000	5.2513080e+000	5.1024411e+000	4.7886942e+000
4.2486178e+000	3.4803841e+000	2.6206188e+000	1.8789792e+000	1.3636754e+000
9.7028166e-001	4.6078838e-001	-3.3034473e-001	-1.3579748e+000	-2.4202409e+000 -
3.3334723e+000	-4.0474118e+000	-4.6069627e+000	-5.0405995e+000	-5.3186264e+000 -
5.4161511e+000	-5.3759116e+000	-5.2660939e+000	-5.0680233e+000	-4.6369377e+000 -
3.8160085e+000	-2.6098593e+000	-1.2369946e+000	1.0049095e-002	9.7244029e-001
1.7057832e+000	2.3705539e+000	3.0591392e+000	3.7317810e+000	4.2965786e+000
4.7124874e+000	4.9927843e+000	5.1273941e+000	5.0491275e+000	4.7112636e+000
4.1920797e+000	3.6834254e+000	3.3377287e+000	3.1152618e+000	2.7966227e+000
2.1653782e+000	1.1906156e+000	3.9152540e-002	-1.0776422e+000	-2.0574448e+000 -
2.9191443e+000	-3.6991727e+000	-4.3748716e+000	-4.8992647e+000	-5.2797719e+000 -
5.5757816e+000	-5.7966563e+000	-5.8226681e+000	-5.4698986e+000	-4.6639238e+000 -
3.5499588e+000	-2.4125475e+000	-1.4680724e+000	-7.2497109e-001	-3.6047400e-002
7.2830765e-001	1.5665621e+000	2.3858944e+000	3.1152618e+000	3.7484570e+000
4.2822414e+000	4.6543877e+000	4.7864635e+000	4.6964564e+000	4.5380218e+000
4.4861876e+000	4.5632735e+000	4.5856308e+000	4.3024149e+000	3.6020354e+000

2.5914286e+000	1.4849085e+000	4.2954406e-001	-5.6058482e-001	-1.5260468e+000	-
2.4606454e+000	-3.3094117e+000	-4.0475653e+000	-4.7153522e+000	-5.3412938e+000	-
5.8382196e+000	-6.0149671e+000	-5.7293547e+000	-5.0405995e+000	-4.1962344e+000	-
3.4485958e+000	-2.8711644e+000	-2.3450409e+000	-1.7106460e+000	-9.1971708e-001	-
4.5808374e-002	8.2106773e-001	1.6527276e+000	2.4496131e+000	3.1635150e+000	-
3.7012589e+000	4.0277431e+000	4.2457980e+000	4.5318072e+000	4.9622558e+000	-
5.4035215e+000	5.5918277e+000	5.3400921e+000	4.6768055e+000	3.7925813e+000	-
2.8655935e+000	1.9465244e+000	9.9680306e-001	8.1626928e-014	-9.9680306e-001	-
1.9465244e+000	-2.8655935e+000	-3.7925813e+000	-4.6768055e+000	-5.3400921e+000	-
5.5918277e+000	-5.4035215e+000	-4.9622558e+000	-4.5318072e+000	-4.2457980e+000	-
4.0277431e+000	-3.7012589e+000	-3.1635150e+000	-2.4496131e+000	-1.6527276e+000	-
8.2106773e-001	4.5808374e-002	9.1971708e-001	1.7106460e+000	2.3450409e+000	-
2.8711644e+000	3.4485958e+000	4.1962344e+000	5.0405995e+000	5.7293547e+000	-
6.0149671e+000	5.8382196e+000	5.3412938e+000	4.7153522e+000	4.0475653e+000	-
3.3094117e+000	2.4606454e+000	1.5260468e+000	5.6058482e-001	-4.2954406e-001	-
1.4849085e+000	-2.5914286e+000	-3.6020354e+000	-4.3024149e+000	-4.5856308e+000	-
4.5632735e+000	-4.4861876e+000	-4.5380218e+000	-4.6964564e+000	-4.7864635e+000	-
4.6543877e+000	-4.2822414e+000	-3.7484570e+000	-3.1152618e+000	-2.3858944e+000	-
1.5665621e+000	-7.2830765e-001	3.6047400e-002	7.2497109e-001	1.4680724e+000	-
2.4125475e+000	3.5499588e+000	4.6639238e+000	5.4698986e+000	5.8226681e+000	-
5.7966563e+000	5.5757816e+000	5.2797719e+000	4.8992647e+000	4.3748716e+000	-
3.6991727e+000	2.9191443e+000	2.0574448e+000	1.0776422e+000	-3.9152540e-002	-
1.1906156e+000	-2.1653782e+000	-2.7966227e+000	-3.1152618e+000	-3.3377287e+000	-
3.6834254e+000	-4.1920797e+000	-4.7112636e+000	-5.0491275e+000	-5.1273941e+000	-
4.9927843e+000	-4.7124874e+000	-4.2965786e+000	-3.7317810e+000	-3.0591392e+000	-
2.3705539e+000	-1.7057832e+000	-9.7244029e-001	-1.0049095e-002	1.2369946e+000	-
2.6098593e+000	3.8160085e+000	4.6369377e+000	5.0680233e+000	5.2660939e+000	-
5.3759116e+000	5.4161511e+000	5.3186264e+000	5.0405995e+000	4.6069627e+000	-
4.0474118e+000	3.3334723e+000	2.4202409e+000	1.3579748e+000	3.3034473e-001	-
4.6078838e-001	-9.7028166e-001	-1.3636754e+000	-1.8789792e+000	-2.6206188e+000	-
3.4803841e+000	-4.2486178e+000	-4.7886942e+000	-5.1024411e+000	-5.2513080e+000	-
5.2543076e+000	-5.0852310e+000	-4.7507197e+000	-4.3241343e+000	-3.8677812e+000	-
3.3279015e+000	-2.5453404e+000	-1.4075313e+000	-8.5343293e-014		-

ANEXO E : Archivo vibracion2.m

0.0000000e+000	2.8469004e+000	4.5952983e+000	5.6291374e+000	6.1767910e+000	
5.7271527e+000	4.4679341e+000	2.8692078e+000	7.8591448e-001	-1.5392378e+000	-
3.4428316e+000	-4.9355990e+000	-5.9979612e+000	-6.0819265e+000	-5.3243926e+000	-
4.1310225e+000	-1.9971556e+000	1.0314791e+000	3.5567700e+000	4.9836815e+000	
5.8896125e+000	6.1513290e+000	5.3632869e+000	3.9714156e+000	2.2365668e+000	
1.3198226e-015	-2.2365668e+000	-3.9714156e+000	-5.3632869e+000	-6.1513290e+000	-
5.8896125e+000	-4.9836815e+000	-3.5567700e+000	-1.0314791e+000	1.9971556e+000	
4.1310225e+000	5.3243926e+000	6.0819265e+000	5.9979612e+000	4.9355990e+000	
3.4428316e+000	1.5392378e+000	-7.8591448e-001	-2.8692078e+000	-4.4679341e+000	-
5.7271527e+000	-6.1767910e+000	-5.6291374e+000	-4.5952983e+000	-2.8469004e+000	-
4.1092214e-015	2.8469004e+000	4.5952983e+000	5.6291374e+000	6.1767910e+000	
5.7271527e+000	4.4679341e+000	2.8692078e+000	7.8591448e-001	-1.5392378e+000	-
3.4428316e+000	-4.9355990e+000	-5.9979612e+000	-6.0819265e+000	-5.3243926e+000	-
4.1310225e+000	-1.9971556e+000	1.0314791e+000	3.5567700e+000	4.9836815e+000	
5.8896125e+000	6.1513290e+000	5.3632869e+000	3.9714156e+000	2.2365668e+000	
7.0148016e-015	-2.2365668e+000	-3.9714156e+000	-5.3632869e+000	-6.1513290e+000	-
5.8896125e+000	-4.9836815e+000	-3.5567700e+000	-1.0314791e+000	1.9971556e+000	
4.1310225e+000	5.3243926e+000	6.0819265e+000	5.9979612e+000	4.9355990e+000	
3.4428316e+000	1.5392378e+000	-7.8591448e-001	-2.8692078e+000	-4.4679341e+000	-
5.7271527e+000	-6.1767910e+000	-5.6291374e+000	-4.5952983e+000	-2.8469004e+000	-
8.2184428e-015	2.8469004e+000	4.5952983e+000	5.6291374e+000	6.1767910e+000	
5.7271527e+000	4.4679341e+000	2.8692078e+000	7.8591448e-001	-1.5392378e+000	-
3.4428316e+000	-4.9355990e+000	-5.9979612e+000	-6.0819265e+000	-5.3243926e+000	-
4.1310225e+000	-1.9971556e+000	1.0314791e+000	3.5567700e+000	4.9836815e+000	
5.8896125e+000	6.1513290e+000	5.3632869e+000	3.9714156e+000	2.2365668e+000	
2.9975969e-014	-2.2365668e+000	-3.9714156e+000	-5.3632869e+000	-6.1513290e+000	-
5.8896125e+000	-4.9836815e+000	-3.5567700e+000	-1.0314791e+000	1.9971556e+000	
4.1310225e+000	5.3243926e+000	6.0819265e+000	5.9979612e+000	4.9355990e+000	
3.4428316e+000	1.5392378e+000	-7.8591448e-001	-2.8692078e+000	-4.4679341e+000	-
5.7271527e+000	-6.1767910e+000	-5.6291374e+000	-4.5952983e+000	-2.8469004e+000	-
1.8438332e-014	2.8469004e+000	4.5952983e+000	5.6291374e+000	6.1767910e+000	
5.7271527e+000	4.4679341e+000	2.8692078e+000	7.8591448e-001	-1.5392378e+000	-
3.4428316e+000	-4.9355990e+000	-5.9979612e+000	-6.0819265e+000	-5.3243926e+000	-
4.1310225e+000	-1.9971556e+000	1.0314791e+000	3.5567700e+000	4.9836815e+000	
5.8896125e+000	6.1513290e+000	5.3632869e+000	3.9714156e+000	2.2365668e+000	-
1.9167626e-015	-2.2365668e+000	-3.9714156e+000	-5.3632869e+000	-6.1513290e+000	-
5.8896125e+000	-4.9836815e+000	-3.5567700e+000	-1.0314791e+000	1.9971556e+000	
4.1310225e+000	5.3243926e+000	6.0819265e+000	5.9979612e+000	4.9355990e+000	
3.4428316e+000	1.5392378e+000	-7.8591448e-001	-2.8692078e+000	-4.4679341e+000	-
5.7271527e+000	-6.1767910e+000	-5.6291374e+000	-4.5952983e+000	-2.8469004e+000	-
1.6436886e-014	2.8469004e+000	4.5952983e+000	5.6291374e+000	6.1767910e+000	
5.7271527e+000	4.4679341e+000	2.8692078e+000	7.8591448e-001	-1.5392378e+000	-
3.4428316e+000	-4.9355990e+000	-5.9979612e+000	-6.0819265e+000	-5.3243926e+000	-
4.1310225e+000	-1.9971556e+000	1.0314791e+000	3.5567700e+000	4.9836815e+000	
5.8896125e+000	6.1513290e+000	5.3632869e+000	3.9714156e+000	2.2365668e+000	
3.1560437e-014	-2.2365668e+000	-3.9714156e+000	-5.3632869e+000	-6.1513290e+000	-

5.8896125e+000	-4.9836815e+000	-3.5567700e+000	-1.0314791e+000	1.9971556e+000	
4.1310225e+000	5.3243926e+000	6.0819265e+000	5.9979612e+000	4.9355990e+000	
3.4428316e+000	1.5392378e+000	-7.8591448e-001	-2.8692078e+000	-4.4679341e+000	-
5.7271527e+000	-6.1767910e+000	-5.6291374e+000	-4.5952983e+000	-2.8469004e+000	-
4.0807410e-013	2.8469004e+000	4.5952983e+000	5.6291374e+000	6.1767910e+000	
5.7271527e+000	4.4679341e+000	2.8692078e+000	7.8591448e-001	-1.5392378e+000	-
3.4428316e+000	-4.9355990e+000	-5.9979612e+000	-6.0819265e+000	-5.3243926e+000	-
4.1310225e+000	-1.9971556e+000	1.0314791e+000	3.5567700e+000	4.9836815e+000	
5.8896125e+000	6.1513290e+000	5.3632869e+000	3.9714156e+000	2.2365668e+000	
4.6632325e-013	-2.2365668e+000	-3.9714156e+000	-5.3632869e+000	-6.1513290e+000	-
5.8896125e+000	-4.9836815e+000	-3.5567700e+000	-1.0314791e+000	1.9971556e+000	
4.1310225e+000	5.3243926e+000	6.0819265e+000	5.9979612e+000	4.9355990e+000	
3.4428316e+000	1.5392378e+000	-7.8591448e-001	-2.8692078e+000	-4.4679341e+000	-
5.7271527e+000	-6.1767910e+000	-5.6291374e+000	-4.5952983e+000	-2.8469004e+000	-
8.8128363e-013					

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Sawyer's Turbomachinery Maintenance Handbook - First Edition
Volume I : Gas Turbines / Turbocompressors
Turbomachinery International - 1980
- 2.- Sawyer's Turbomachinery Maintenance Handbook –First Edition
Volume II : Steam Turbines / Power Recovery Turbines
Turbomachinery International – 1980
- 3.- Sawyer's Turbomachinery Maintenance Handbook - First Edition
Volume III : Support Services & Equipment
Turbomachinery International – 1980
- 4.- Sawyer's Turbomachinery Maintenance Handbook –Third Edition
Volume II : Selection & Application
Turbomachinery International – 1985
- 5.- Manual de Instrucción Vibrometer SA - 1996
Sensor y Módulos usados para adquisición de Vibraciones en Turbina Siemens
Modelo V84.3A de 150 MW
- 6.- Operation Manual - Bently Nevada 1993
Transducer System Proximity 3300 8mm
Sensor usado para adquisición de Vibraciones en Turbina Westinghouse Modelo
W-501D de 100 MW.
- 7.- Revista Turbomachinery International 2002
The Global Journal of Energy Equipment
- 8.- Manual de Características de Diseño
Turbina de Gas Siemens V84.3A de 150 MW
TD No. 8207
- 9.- Teoría de Vibraciones – Aplicaciones
William T. Thomson – 1982
- 10.- Problemas de Vibración en Ingeniería
S. Timoshenko Y D. H. Young
- 11.- Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto – 2da Edición
Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaf - 2,000