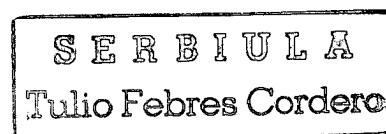


Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Post-Grado de Ingeniería de Mantenimiento

**Sistema para Monitorear Cavitación en Turbinas Hidráulicas
Tipo Francis**



Tutor: Dr. Rafael Santos

Autor: Ing. Oswaldo A. Bastidas P.

Mérida, mayo de 2004.

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Lista de Contenido

Resumen.	3
Introducción.	4
Capítulo I: El Problema.	6
1. Planteamiento del Problema.	7
2. Objetivos.	7
2.1 Objetivo General.	7
2.2 Objetivos Específicos.	7
3. Antecedentes.	7
Capítulo II: Marco Teórico.	9
1. La Cavitación.	9
1.1 Erosión por Cavitación.	11
1.2 Tipos de Cavitación	13
2. Cavitación en Turbinas Hidráulicas.	17
2.1 Zonas de Cavitación en Turbinas Francis.	18
3. Métodos de Detección de Cavitación en Turbinas Hidráulicas	22
3.1 Técnica de Conteo de Picaduras.	22
3.2 Probetas Electroquímicas DECER.	24
4. Método Vibratorio de Detección de Cavitación.	25
4.1 Recolección de Señales	26
4.2 Tratamiento de las Señales	28
Capítulo III: Diseño del Sistema de Detección de Cavitación.	41
1. Selección del Método de Detección de Cavitación	41
2. Mejora del Método de detección Vibratoria de Cavitación.	42
3. DEVICA2003.	46
Capítulo IV: Validación del Sistema.	62
1. Pruebas de Cavitación.	62
2. Prueba en Unidad 10 de Casa de Maquinas I de Planta Guri.	65
3. Prueba en Unidad 16 de Casa de Maquinas II de Planta Guri.	67
4. Validación de Resultados.	71
Conclusiones.	77
Bibliografía	79
Apéndice I: Manual de Usuario de DEVICA2003.	82
Apéndice II: Códigos de Programación de DEVICA2003.	100

Resumen

El fenómeno de cavitación es el causante de algunos de los principales problemas en la industria de generación hidroeléctrica. Estas fallas tienen que ver principalmente con un aumento en las vibraciones y ruidos de la máquina, desgaste en el rodete, reducción de la eficiencia hidráulica, aumento de los costos de mantenimiento y la disminución en la disponibilidad, confiabilidad, y mantenibilidad de la planta. Es por ello que se hace necesario el diseño y validación de un sistema que permita detectar los niveles de cavitación y el comportamiento del fenómeno dentro de la máquina, con la finalidad de determinar intervalos de funcionamiento y valores máximos y mínimos del fenómeno dentro de la máquina. El diseño del sistema se apoya en la mejora del método de detección vibratoria de cavitación, desarrollado y comercializado por Hydro-Québec, el cual contempla el análisis y procesamiento de señales de vibraciones en la estructura del cojinete guía y obtiene los niveles de energía debidos a cavitación dentro de la máquina, este método ha sido validado ampliamente en numerosas campañas de medición a nivel mundial y dentro de las fronteras venezolanas en las unidades de Planta Guri I y II y Planta Macagua I, II y III de EDELCA. Para la validación del sistema diseñado se realizan pruebas de cavitación en las unidades de Planta Guri I y II, tomando como referencia los resultados obtenidos por Hydro-Quebec en la campaña de medición de 2000. Las gráficas de cavitación que se obtienen del sistema diseñado reproducen el comportamiento que muestran los resultados de Hydro-Québec, validando de esta manera la optimización lograda, y el sistema diseñado. Posteriormente se realizarán nuevas validaciones en conjunto con la empresa canadiense a fin de aumentar la base de datos de la investigación de cavitación y desarrollar nuevas versiones del sistema que incluyan estudios de cavitación absoluta, de manera tal que se pueda estimar la velocidad de desgaste que sufre el rodete y diseñar planes de mantenimiento predictivo.

Introducción

Los diversos problemas que presenta la operación de las turbinas de una planta hidroeléctrica, se asocian principalmente con el diseño, condiciones de operación, dimensiones de las máquinas y niveles del embalse. La suma de estos factores, es la causa de uno de los fenómenos de desgaste que acarrear mayores consecuencias económicas, conocido como cavitación. Este proceso es la causa de erosiones devastadoras en los rodets y otras piezas sometidas a los embates de este mecanismo destructivo, causando así una disminución en la potencia, eficiencia total, vida útil del sistema, confiabilidad y mantenibilidad de la planta. En este sentido, muchas empresas relacionadas con el sector (fabricantes, hidroeléctricas y plantas generadoras) se han dado a la tarea de investigar los procesos que propician y gobiernan la formación y colapso de cavidades de vapor en el recorrido del agua a través de la máquina.

En este sentido, los mecanismos que determinan los niveles de cavitación en la turbina van a depender de variables de diseño (conformación, material y geometría de los álabes del rodet, etc.) y algunas condiciones operativas (potencia requerida, eficiencia, niveles aguas arriba y aguas abajo, etc.), sin embargo, en el transcurrir del tiempo los investigadores se han tropezado con un sin número de contratiempos, principalmente relacionados con las altas frecuencias de ruido y vibración que se alcanzan en el momento en que las burbujas, producidas en el lado de baja presión, implotan al sufrir un nuevo cambio de presión alcanzando valores superiores a 1000 atmósferas (Farhat, 1994), lo cual es suficiente para causar deformaciones plásticas y elásticas en el material de las piezas expuestas, sin importar la aleación de la cual están formadas.

Más allá de las consecuencias anteriormente comentadas, se encuentran los problemas referentes a la disponibilidad y la confiabilidad de la planta, las cuales se van a ver afectadas al disminuir el desempeño de las máquinas y el tiempo medio entre fallas; lo que puede traducirse como un aumento en los costos de mantenimiento y producción. Sin embargo, a la vez se presentan otras repercusiones, quizás más graves ya que el rediseño y la rehabilitación de las unidades requiere de inversiones muy grandes en infraestructura, materiales equipos, recurso humano, investigación y tiempo.

Licencia Creative Commons:

Sistema para monitorear cavitación en turbinas hidráulicas tipo Francis

Este cúmulo de situaciones hace necesario el desarrollo de un sistema capaz de monitorizar los niveles de cavitación presentes en una turbina hidráulica, que permitan establecer patrones de comportamiento, con el fin de realizar las comparaciones para el futuro diseño de planes de mantenimiento predictivo, diseño y ejecución planes de rehabilitación y la verificación de sus beneficios. Adicionalmente, es imperante el estudio y el conocimiento profundo de éste fenómeno, lo cual permitiría a la industria de generación eléctrica nacional, alcanzar un desarrollo suficiente para mantenerse dentro de la élite tecnológica mundial en el ramo hidroeléctrico, con la capacidad de llevar a cabo adelantos e innovaciones en el campo de la ingeniería de fluidos y el mantenimiento predictivo.

Para el sistema de monitoreo de cavitación diseñado se programó un software en MALAB 6.5 (licencia de EDELCA) denominado DEVICA2003, el cual se desarrolló a partir de la mejora del método vibratorio de detección de cavitación desarrollado por Bourdon (Bourdon P, 2000) y programado para Hydro-Québec en el software CAVIMAX®. El método se basa en análisis de las vibraciones de alta frecuencia medidas en la estructura de la turbina, para obtener los niveles de energía debidos a cavitación que se suscitan en el rodete de la turbina. De tal forma, que se va a obtener una curva característica de cavitación para cada máquina donde se puede establecer el comportamiento del fenómeno. El uso de MATLAB para la programación del sistema, permitió contar con subrutinas previamente establecidas en el programa matriz que hacen del análisis de vibraciones, una herramienta muy poderosa.

Para la validación se ejecutaron 2 pruebas en las unidades 10 y 16 de la Central Hidroeléctrica Raúl Leoni de Guri, tomando como patrón de referencia las curvas obtenidas por Hydro-Québec en pruebas similares realizadas en 2000 (Bourdon P y Lavigne P, 2000). Los resultados del sistema diseñado reprodujeron el comportamiento mostrado en los reportes de 2000 validando el sistema y la mejora realizada.

Capítulo I: El Problema

1. Planteamiento del Problema

Dentro de los problemas más importantes que se presentan en la operación de plantas de generación hidroeléctrica, se encuentran los causados por la cavitación en las turbinas hidráulicas. Este fenómeno es responsable de altos niveles de vibración, ruido y desgastes en zonas del rodete, además de reducir la eficiencia de la máquina, lo que se traduce en una disminución de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad, y cuya reparación es bastante costosa en términos económicos, horas hombre y recursos utilizados (Li, 2000). Aunque las condiciones de operación (potencia de salida, porcentaje de apertura de paletas, caudal) y los niveles del embalse (aguas arriba, aguas abajo y sumergencia) afectan en cierta medida los niveles de cavitación, las causas principales de este fenómeno destructivo están relacionadas con condiciones de diseño (longitud y espesor del álabe, ángulo de distribución desde la entrada a la salida, borde de entrada y de salida, el centro del perfil, perfil de la banda del rodete) (Li, 2000), por lo que el comportamiento del fenómeno es una característica propia de cada máquina. Es por ello que un sistema que permita detectar los niveles de cavitación que se presentan dentro de las turbinas, está en la capacidad de obtener una curva característica para cada máquina donde se puede observar la tendencia de comportamiento del fenómeno (Bajic B., 2003) siendo estos parámetros importantes para la toma de decisiones tanto de operaciones como de mantenimiento ya que para aumentar el tiempo entre reparaciones (Farhat M y Bourdon P, 1998), y mejorar los indicadores de mantenimiento (mantenibilidad, disponibilidad y confiabilidad) de la planta; deben evitarse las condiciones de operación donde se presenta el máximo nivel de cavitación (Escaler y col., 2002) y tratar de mantener las máquinas en un intervalo de operación seguro. Por otro lado esta curva característica permite determinar el efecto que causan las modificaciones del diseño de la unidad en el comportamiento del fenómeno, siendo esta una herramienta imprescindible para comprobar los beneficios de los planes de rehabilitación que buscan aumentar la rentabilidad de la planta (Farhat y col., 1999), así como la verificación del desempeño de las unidades instaladas por primera vez.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Diseñar un sistema que permita monitorear los niveles de cavitación en turbinas hidráulicas tipo Francis.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar y seleccionar los métodos de detección de cavitación en turbinas hidráulicas.
- Diseñar un sistema que permita detectar niveles de cavitación presentes en la operación de turbinas hidráulicas tipo Francis.
- Validar el sistema de detección de cavitación.

3. Antecedentes

En el marco del convenio de transferencia de tecnología suscrito entre EDELCA e Hydro-Québec (la principal empresa hidroeléctrica de Canadá y una de las primeras del mundo), uno de los puntos más importantes es la consolidación del conocimiento del fenómeno de cavitación. Para ello la empresa venezolana tiene como política impulsar trabajos de investigación relacionados con dicho fenómeno, siendo el presente el cuarto trabajo desarrollado para tal fin y con el cual se pretende consolidar esta línea de investigación. A continuación se nombran los trabajos previos realizados en EDELCA y que sirven como referencia para este proyecto.

- Colmenares C., 2000, Estudio del fenómeno de la cavitación y su influencia sobre las turbinas hidráulicas tipo Francis de Guri en C.V.G. EDELCA. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Ciudad Guayana.
- Figueroa F, 2000, Evaluación de los niveles de cavitación en las turbinas Francis de las casas de máquinas de Guri mediante el método de detección vibratorio con la finalidad de determinar parámetros aceptables de operación, Universidad Simón Bolívar, Puerto Ordaz.
- Carone A, 2002, Desarrollo de un programa en MATLAB para procesamiento de vibraciones de alta frecuencia propias de cavitación en turbinas hidráulicas, Universidad de los Andes, Mérida.

Por otro lado, son numerosos los institutos de investigación que se han dedicado al estudio de la cavitación y sus consecuencias. Cabe destacar el esfuerzo realizado por IREQ (Instituto de Investigación de Hydro-Québec por sus siglas en francés) en Canadá y del EPFL (Instituto Politécnico de Lausanne por sus siglas en francés) en Suiza, para desarrollar técnicas de detección de cavitación. Entre los trabajos que han realizado en colaboración ambas instituciones y que han servido como marco referencial para esta investigación se encuentran:

- Bourdon P, 2000, La détection vibratoire de l' érosion de cavitation des turbines Francis, Ph.D. thesis No 2295, EPFL, Lausanne, Suiza.
- Kaye M, 2000, 2000, Cavitation Monitoring of Hydraulic Machines by Vibration Analysis, Ph.D. thesis No 2112, EPFL, Suiza.
- Farhat M, 1994, Contribution à l' étude de l' érosion de cavitation: Mécanismes Hydrodynamiques et prediction, Ph.D. thesis No 1273, EPFL, Suiza.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
Sistema para monitorear cavitación en turbinas hidráulicas tipo Francis
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Capítulo II. Marco teórico

1. La Cavitación

La cavitación es un fenómeno que se presenta en el flujo de un líquido en el momento en que su presión local disminuye hasta alcanzar niveles inferiores a su presión de vaporización (P_v), produciendo así burbujas de vapor (cavidades), de esta forma el fluido pasa a estar en dos fases que no alcanzan un estado de equilibrio. Una vez que el fluido ha alcanzado otras zonas aguas abajo, donde la presión es superior a P_v , las burbujas de vapor colapsan generando vibraciones, sonido y ondas de presión. Si una burbuja colapsa cerca de una pared, entonces conlleva a un colapso asimétrico con la generación de un microchorro, los cuales pueden afectar la superficie de una pequeña área ($1 \mu\text{m}^2$) con presiones superiores a los 1000 Mpa, en el orden de microsegundos. Además, las ondas de choque que emiten las burbujas que implotan mas allá de la superficie, generan sobrepresiones de 0,5 hasta 2,5 GPa. Esta serie de fenómenos someten al material a deformaciones plásticas y elásticas en un gran número de repeticiones, causando la fatiga de la superficie y seguidamente el desgaste erosivo y la pérdida de material (Hofman, 1996).

Tal como se mencionó anteriormente, la aparición y colapso de cavidades de vapor va a depender de la distribución de presiones a las que se somete el fluido en su recorrido. En este sentido, la ecuación de Bernoulli permite relacionar los cambios de presión con los cambios de velocidad que sufre el líquido:

$$P + \frac{1}{2 \cdot \rho \cdot v^2} = P_0 \quad (2.1)$$

Donde:

P = Presión local.

v = Velocidad del fluido.

P_0 = Presión ambiental ($v = 0$).

ρ = Densidad

Cualquier incremento en la velocidad local (tal como en un canal en convergencia o cerrado por un obstáculo) de un elemento líquido es acompañado por caída de la presión. La cavitación puede ser generada por un incremento de la velocidad, suficiente para disminuir la presión local por debajo de P_v . Por ejemplo, la presión de vapor del agua a 20 °C es 2,3 kPa, a esta temperatura y a presión atmosférica de 1 atm el agua puede llegar a 14

m/s antes de alcanzar la presión de vaporización, mientras que a 10 °C se puede alcanzar una velocidad de 20 m/s (Li,2000). Tomando en cuenta este comportamiento, se ha definido un número adimensional llamado parámetro de cavitación o número de Thomas (σ):

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{\rho V_o^2}{2}} \quad (2.2)$$

Donde:

P_o = Presión de referencia.

P_v = Presión de vapor

V_o = velocidad de entrada

La implosión de burbujas de forma casi esférica bajo la forma de pequeñas cavidades o vórtices, es un fenómeno muy complejo y su interacción con una pared sólida deformable lo es aún más. Las simulaciones en computadoras se ven muy limitadas debido a la gran cantidad de factores que hay en juego tales como fuerzas inerciales, viscosidad tensión superficial, compresibilidad del gas y difusión, dinámica de burbujas, efecto de los gases no condensables y un largo etcétera que se alarga mucho más si se toma en cuenta que se está en presencia de un fluido que no presenta un estado de equilibrio entre dos fases (líquido y gaseoso). La forma final de la burbuja puede ser coloidal o vórtice, si la distancia a la que se encuentra de la pared es grande puede rebotar y recrecer varias veces antes del colapso final. Este colapso violento con el rápido desplazamiento de la burbuja, produce también una onda de choque en líquido y en el sólido adyacente. La importancia del volumen inicial de la cavidad y su velocidad es mayor que la velocidad final y la energía de impacto del microchorro. Esta influencia de la velocidad está relacionada al efecto cohete con la condición que el producto de la velocidad por el volumen es constante durante la implosión. La velocidad final del microchorro puede ser mayor a 1000 m/s y la presión pico local puede llegar por encima de 1000 MPa como se deduce por la forma de la picadura sobre materiales fuertes (Franc y col., 1995).

La temperatura del líquido tiene una gran influencia también. En bajas temperaturas que se ajustan al punto de congelamiento, la vaporización requiere mayores velocidades a

Licencia Creative Commons:

Atribución No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

causa de la baja presión de vapor y a su vez se forman menos burbujas que crecen más lentamente. En altas temperaturas la fuerza generada por la implosión es menor y los colapsos son menos violentos. Por estos dos factores contrapuestos la más alta intensidad de cavitación ocurre en una temperatura media entre el punto de ebullición y el punto de congelación. Esto ha sido comprobado en pruebas de laboratorio donde las máximas velocidades de erosión han sido observadas para temperaturas alrededor de 50 °C (Li, 2000).

Pero la cavitación no necesariamente ocurre a estas presiones o temperaturas. Las burbujas de vapor necesitan crecer desde núcleos presentes en el líquido, los cuales son pequeñas burbujas de gas no condensables (aire o vapor) y además son intrínsecas del fluido. Si estos núcleos son artificialmente eliminados, se pueden alcanzar presiones más bajas sin ninguna señal de cavitación, incluso se ha podido aplicar presiones negativas o de succión asemejando agua perfecta. Las aguas industriales siempre contienen no solo gas disuelto sino también pequeñas burbujas de gas no soluble y pequeñas partículas sólidas sobre las cuales pueden crecer pequeñas burbujas de gas. Vapor y líquido están presentes en estas discontinuidades para mantener el equilibrio entre la presión interna de la burbuja, su presión superficial y la presión del líquido. Cuando la presión local del líquido desciende, comienzan a crecer burbujas por vaporización y la tensión de la superficie disminuye hasta que se alcanza un radio crítico, para el cual la burbuja continua creciendo sin ninguna disminución de presión y como consecuencia la presión no se opone al crecimiento de la burbuja ocurriendo así la cavitación. En el agua a 20 °C el radio crítico es de 0,1 mm. Las aguas industriales o de toma normalmente contienen gran densidad de pequeñas burbujas en el orden de 10^2 a 10^6 por litro. Su distribución de tamaño depende del historial de presiones anteriores del líquido (Singhal y col., 2002; Li, 2000).

1.1 Erosión por Cavitación

Como se ha dicho anteriormente la fatiga causada por la cavitación sobre las superficies en contacto, debido a la alta frecuencia en que se produce este fenómeno y a los altos esfuerzos dinámicos, es la causante de la progresiva pérdida de material de la superficie sólida. Este fenómeno es conocido como erosión. Entre los diversos factores que influyen la picadura por cavitación se encuentra (Rodríguez, 1986):

- Efecto de la velocidad.
- Dureza del material.
- Propiedad de elasticidad.
- Intensidad del impacto.
- Efecto de tamaño.
- Corrosión.
- Efecto de rugosidad.
- Efecto de temperatura.
- Efectos termodinámicos.
- Propiedades del fluido.
- Contenido de gas no condensado.

Por consiguiente debido a la gran cantidad de factores que influyen la erosión por cavitación, el Instituto de Investigaciones de Energía Eléctrica (EPRI por sus siglas en ingles) ha desarrollado algunos planes para ayudar a la gerencia a tomar decisiones para reparar este fenómeno. El EPRI da algunas de estas opciones (Rodríguez, 1986):

- Hacer todas las reparaciones durante cada periodo de reparación.
- Reparar solamente áreas cuando el daño por cavitación exceda 1/8 pulg.
- Reparar áreas sobre superficie de acero inoxidable cuando la picadura es un 1/8 de pulg o más profunda. En acero al carbono preparar áreas a un con daño leve usando soldadura de acero inoxidable.
- Permitir que la cavitación llegue hasta una profundidad máxima que pueda ser reparada con dos pases de soldadura de alrededor de 3/8 de pulg.

También han sido definidas erosiones altas, medias y bajas, en términos de la tasa de desgaste por un año de operaciones normales de 8000 mil horas. La baja erosión esta definida como daños de 1/16 a 1/8 pulg de profundidad en acero al carbono, transcurrido dos años; erosión media se define como un daño de mas de 1/16 de pulg en acero inoxidable austenítico en un periodo de un año; y erosión alta se define como un daño mayor a un 1/8 de pulg en acero inoxidable en seis meses o menos (Rodríguez, 1986).

Para aleaciones fuertes con un alto coeficiente de esfuerzo de cedencia del material para esfuerzos de impacto máximos y para materiales elásticos como gomas o algunos materiales polimeros la deformación es puramente elástica y la erosión viene de daños de

fatiga acumulativa. Para metales suaves, los impactos individuales causan deformación plástica o permanente que conducen a roturas por fatiga o fracturas dependiendo de la tenacidad del material (Rodríguez, 1986).

1.2 Tipos de cavitación

La cavitación puede tomar varias formas dependiendo de coeficiente de cavitación y la geometría de los pasajes del agua. El flujo y la distribución de presión alrededor de un perfil NACA simétrico o un perfil de ala de avión es la herramienta ideal para ilustrar el desarrollo del fenómeno y simularlo físicamente tal como lo han demostrado los trabajos de numerosos investigadores (Ait y col., 2003; Escaler y col., 2001; Caron y col., 2002; Leighton y col., 2003; Kjeldsen y col., 2000; Farhat, 1994). El perfil produce sustentación creando una baja presión en la superficie superior, que puede llegar lo suficientemente baja como para producir distintos tipos de cavitación, los cuales van a ser clasificados dependiendo de la forma que adquiera la cavidad. Estas observaciones se hacen a través de cámaras súper-rápidas y a continuación se describen algunas de ellas.

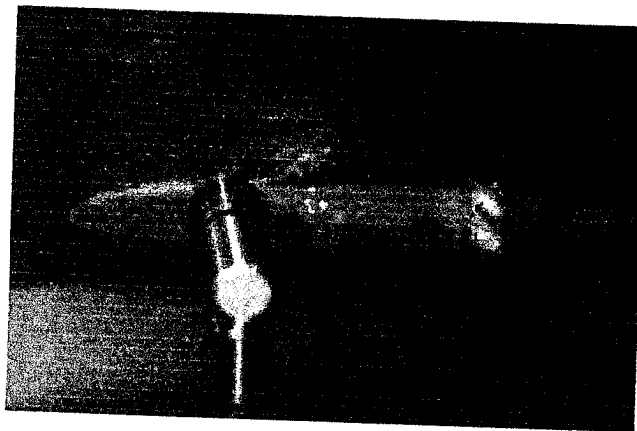


Fig. 2.1. Cavitación incipiente (Fuente Li, 2000).

La Fig. 2.1 muestra un perfil sometido a cavitación incipiente podría decirse que está comenzando a sufrir el fenómeno, este tipo de cavitación no es erosivo.

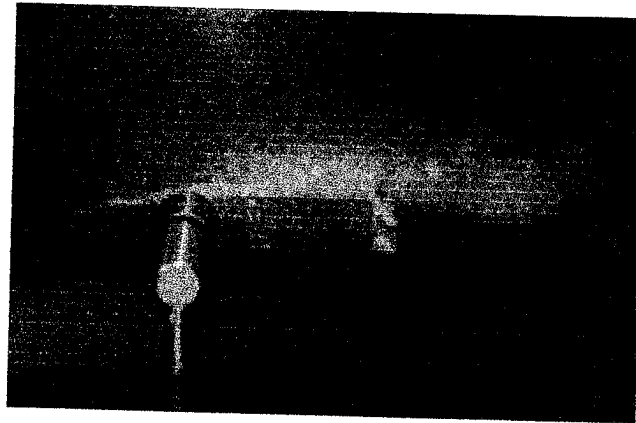


Fig. 2.2. Nube de cavitación (Fuente Li, 2000).

La Fig.2.2 muestra cavitación en forma de nube o mejor conocida como nube de cavitación, llamada así por la forma que adopta encima del perfil. Dentro de sus características se encuentra la inestabilidad del flujo tanto dentro como fuera de la nube, lo cual afecta considerablemente la dinámica de la zona cavitante, mejor conocida como cavidad, además es muy erosiva y sus consecuencias pueden ser devastadoras.

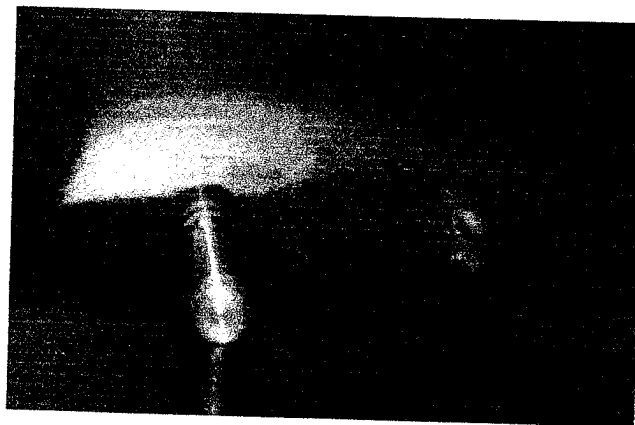


Fig. 2.3. Cavitación laminar (Fuente Li, 2000).

La Fig. 2.3 presenta una cavidad tipo laminar, es el tipo de cavitación más estable y se presenta como una lámina que fluye sobre la superficie del perfil, las condiciones dinámicas del flujo son las que se presentan más constantes.



Fig. 2.4. Cavitación de burbujas (Fuente Li, 2000).

El perfil de la Fig. 2.4 exhibe cavitación laminar, sin embargo cerca del final de la cavidad se puede notar cavitación de burbujas, este tipo de cavitación se denomina así debido a los grupos de grandes burbujas bien definidas que se extienden en la zona cavitante. Este tipo de cavitación, es muy común en las máquinas hidráulicas y aunque no es tan erosivo, afecta considerablemente la eficiencia de los equipos.



Fig. 2.5. Súper cavitación (Fuente Li, 2000).

Una cavidad se transforma en súper cavitación (como la mostrada en la Fig. 2.5) cuando la cavidad se extiende más allá de la cola del perfil, no es muy común en la maquinaria hidráulica, ya que se necesitan valores muy altos del número de cavitación (σ) para lograr alcanzarlo.

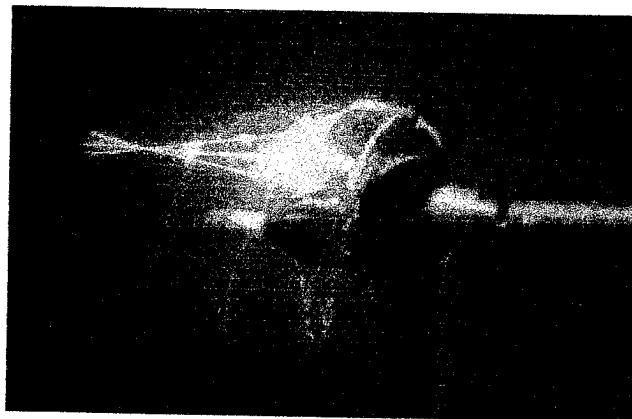


Fig. 2. 6 Cavitación de vórtice (Fuente Li, 2000).

La Fig. 2.6 muestra cavitación tipo vórtice en un propulsor. Este un tipo común de cavidad y su comportamiento está en investigación.

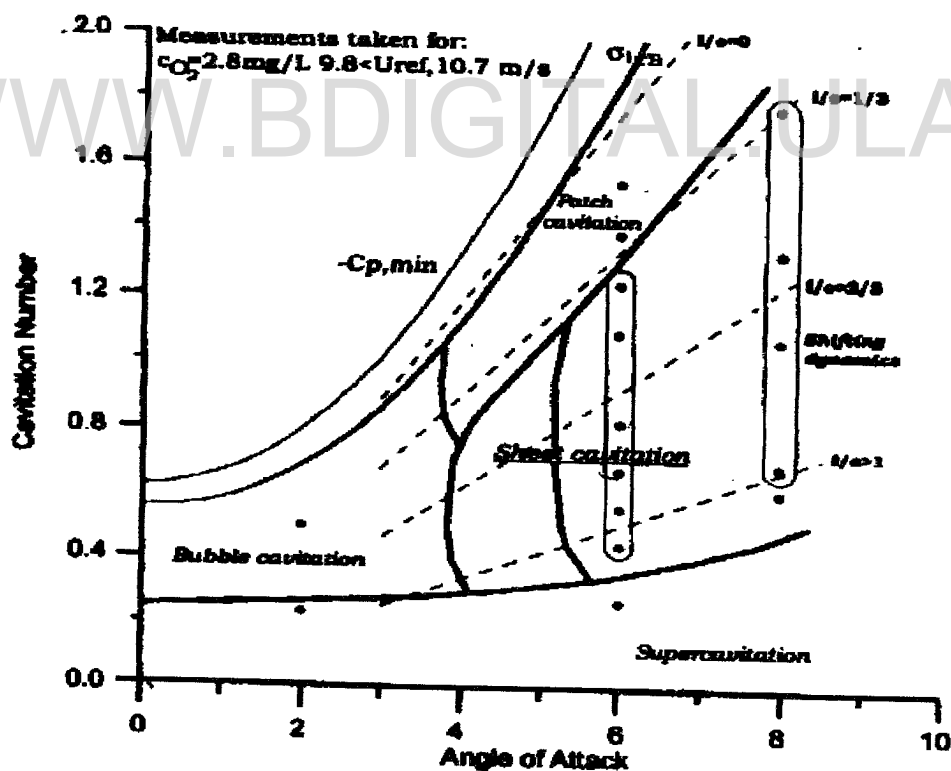


Fig. 2.7 Mapa de cavitación σ vs. α (Fuente Kjeldsen, 2000).

En La Fig.2.7 se muestra la relación existente entre el número de cavitación (σ) y el ángulo de ataque del perfil (α), estos valores fueron obtenidos experimentalmente por Kjeldsen

(2000) para poder establecer un mapa característico de los tipos de cavitación que se presentan en el perfil.

2. Cavitación en Turbinas Hidráulicas

Las turbinas hidráulicas varían en diseño, dependiendo de las condiciones de operaciones deseadas. El funcionamiento de una máquina dada depende en gran parte del rodete, el cual es el principal componente y a su vez el más difícil de diseñar (Li, 2000). El rodete debe estar particularmente diseñado para soportar condiciones de operaciones de la central hidroeléctrica, por ejemplo, alto nivel de potencia, con su mejor eficiencia en o ligeramente por encima de la caída promedio y ser capaz de producir la potencia requerida sin ningún rastro de daño por cavitación. A través de los proyectos de investigación y desarrollo y el uso de sofisticadas herramientas de diseño asistidas por computadora, las formas nuevas de los alabes están continuamente siendo desarrolladas para determinar el impacto de nuevos parámetros de diseño en funcionamiento hidráulico y el comportamiento de la cavitación.

La cavitación ha pasado a ser el foco primario de los diseñadores de turbinas. Los diseños modernos de rodetes son muy robustos y más compactos, dos factores que representan el mayor peligro de de los problemas de cavitación. El uso de herramientas de diseño por computadoras es esencial para tratar con estos problemas complejos. Con estas herramientas, el diseño del rodete puede ser optimizado de manera que el riesgo de daño por cavitación sea minimizado o inclusive eliminado.

El riesgo de daño por cavitación, es en cierto grado independiente del tamaño y posición de la máquina, sin embargo, el parámetro más importante recae en las geometrías de los álabes (la longitud y el espesor del álabe, el ángulo de distribución desde la entrada hasta la salida, el borde de entrada y el de salida, el centro del perfil, perfil de la banda del rodete), el cual debe ser optimizado para eliminar este peligro. Las zonas más sensitivas a la cavitación son diferentes para cada tipo de rodetes. Las formas diferentes de cavitación así como su impacto en el diseño de la máquina serán discutidos en detalle a continuación.

2.1 Zonas de Cavitación en Turbinas Francis

Una de las zonas más susceptibles a la cavitación es encontrada cerca del borde de entrada del álabe, en la parte de atrás cerca de la unión con la banda. Esta forma de cavitación es causada por una diferencia entre el ángulo de flujo y el ángulo del álabe en la entrada del rodete (ver Fig. 2.8). Este tipo de cavitación se conoce como cavitación de borde de entrada, es a menudo ruidosa y puede causar daños significativos a lo largo del lado trasero del álabe cerca de la banda. Este problema puede ser el resultado de elección incorrecta del ángulo del perfil, no bien situado para la condición de operación; de un perfil de banda con un gran vuelo (diámetro de salida $\gg$ diámetro de la garganta); o debido a un borde de entrada que se apoya demasiado sobre la dirección de rotación. La cavitación se intensifica para caídas superiores a la caída promedio y la sumergencia del rodete tiene poco efecto en esta forma de cavitación (ver Fig. 2.9).

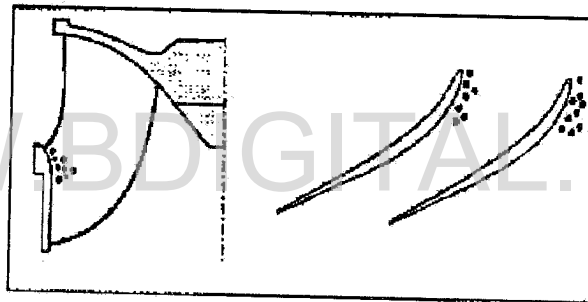


Fig. 2.8. Cavitación a la entrada (borde de entrada) en turbinas Francis (Fuente: Li, 2000).

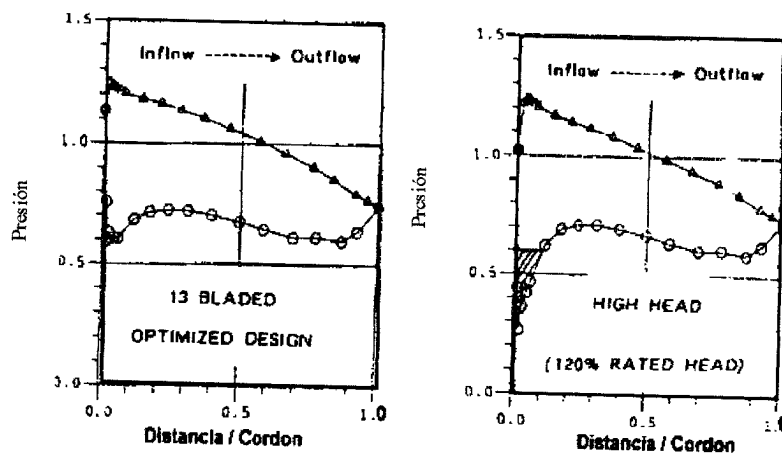


Fig. 2.9. Efectos de las condiciones operativas de la cavitación a la entrada (Fuente: Li, 2000).

En la salida del álabe de la parte trasera se encuentra otra zona sensible. La cavitación en la salida es mucho más silenciosa y, en general, causa menos daño que la cavitación en

la entrada. Si se intensifica el flujo a la salida del rodete se ve afectado y la eficiencia de la máquina decrece y eventualmente se deja caer rápidamente. Esto es conocido como rotura de la cavitación. Esta forma de cavitación es causada por un diseño en el cual el álabe es cargado de forma muy pesada a la salida del flujo, por ejemplo álabes cortos, número de álabes insuficientes, alta curvatura a la salida, operación plena de carga, etc (ver Fig. 2.10). En este caso, la sumergencia de la máquina tiene un efecto significativo en la intensidad de la cavitación y el daño resultante. Para una sumergencia más profunda y un nivel alto del nivel de descarga, hay menos cavitación.

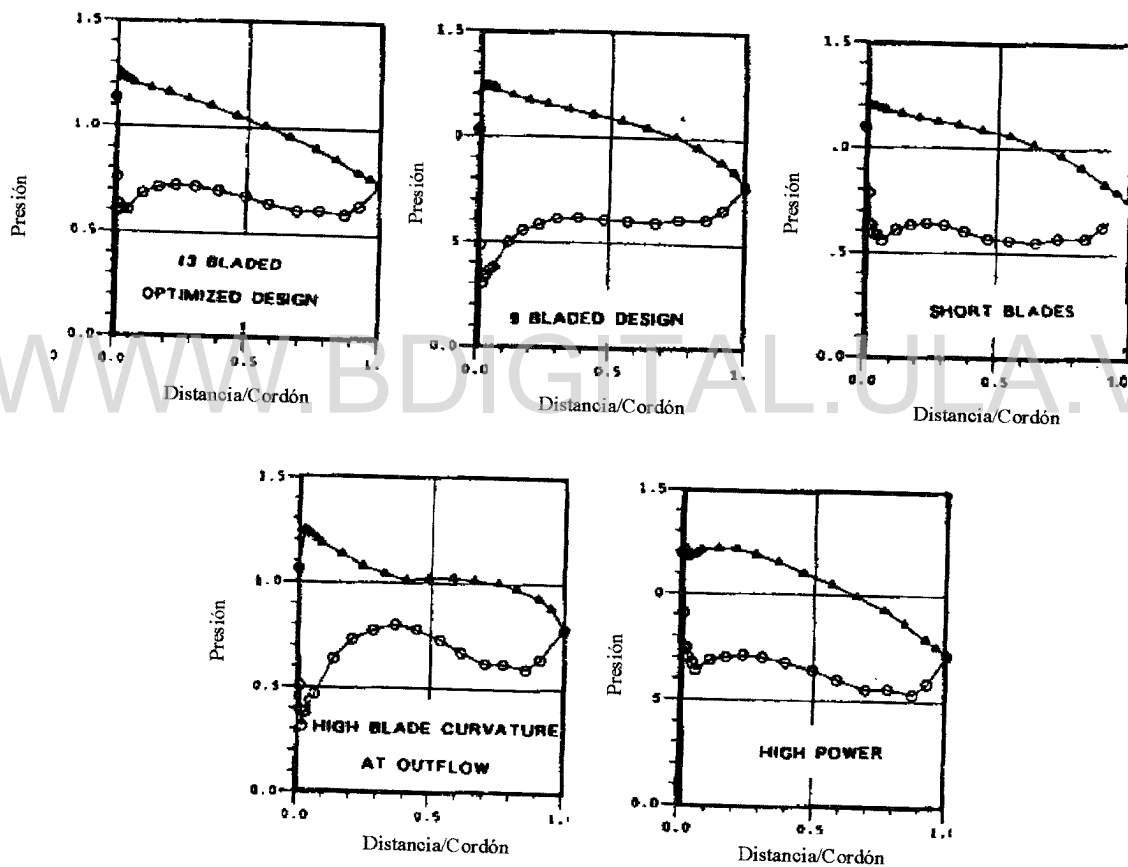


Fig. 2.10. Efectos de los diferentes parámetros de la cavitación a la salida (Fuente: Li, 2000).

La cavitación en el borde de salida y los vórtices de Von Karman (ver Fig. 2.11) son un problema cuando el borde de salida del álabe es muy delgado mientras la cavitación causa daños al borde de salida, los vórtices de Von Karman pueden causar problemas de vibraciones. Estos dos fenómenos son característicos de puntos altos de operación y de flujo alto.

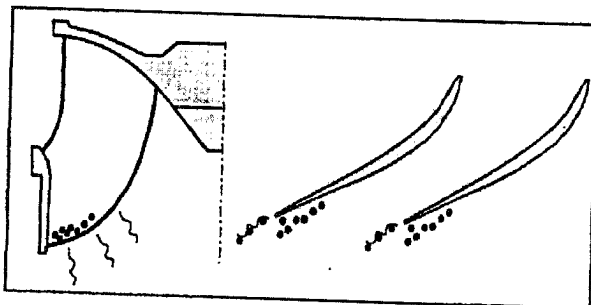


Fig. 2.11. Cavitación a salida y vórtices de Von Karman (Fuente: Li, 2000).

La cavitación de la parte de carga está caracterizada por altos vórtices entre los álabes, comenzando en la corona de entrada y alcanzando abajo la salida de los álabes cerca de la banda (ver Fig. 2.12). Esto es menos intenso que las otras formas de cavitación pero puede aún causar daños entre las paletas en la corona, después de un largo periodo de operación.

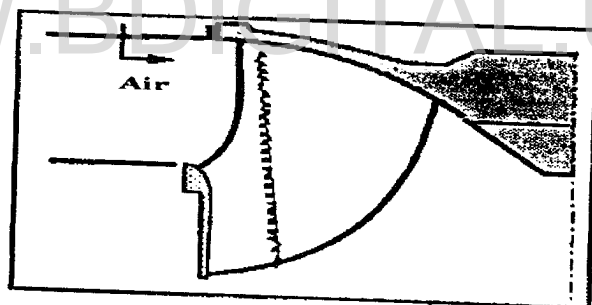


Fig. 12. Cavitación en la parte de carga (Fuente: Li, 2000).

La cavitación a la entrada en el lado de presión es encontrada en máquinas, que operan a una caída muy por debajo de la caída promedio, con las paletas directrices completamente abiertas. Este es el resultado de un ángulo de álabes mayor que el ángulo de entrada del flujo (ver Fig. 2.13). Esta forma de cavitación puede ser muy ruidosa y resultan vibraciones significativas. Esto raramente causa daños a la superficie del álabe ya que las burbujas implotan en el flujo entre los álabes.

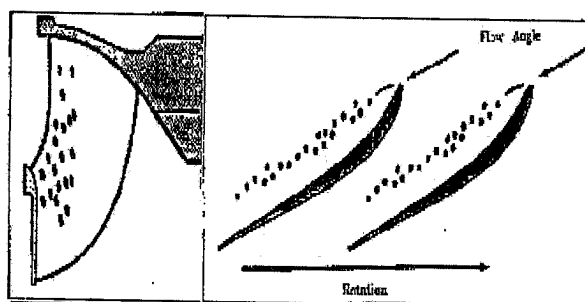


Fig. 2.13. Cavitación a la entrada, en el lado de presión (ángulo de incidencia negativo) (Fuente: Li, 2000).

El estudio de la cavitación en la turbina Francis ha progresado enormemente en los últimos años. Un incremento en el ángulo del álabe cerca de la banda ha ayudado a reducir los daños de cavitación, otros parámetros importantes tales como el radio de borde de entrada, longitud del álabe, espesor, perfil de la banda, ángulo del borde de salida, son mejor estudiados y optimizados para los diseños modernos.

Otra técnica para incrementar la potencia, mientras se minimiza la cavitación a la entrada, consiste en variar la inclinación del álabe (ver Fig. 2.14). El ángulo de inclinación está definido por el ángulo formado entre el borde de entrada y una proyección paralela del eje de rotación del rodete, G.E. Canadá tiene la patente para esta técnica de diseño. La distribución de presión teórica se muestra en la Fig. 2.15, se puede apreciar que la zona sensible a la cavitación desaparece completamente y la eficiencia se mantiene invariable.

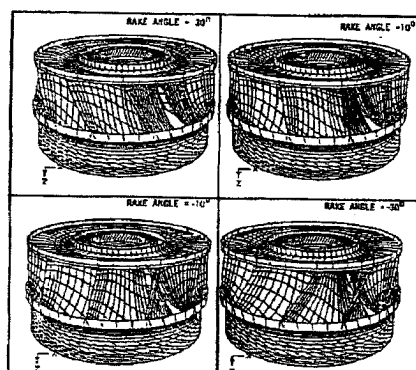


Fig. 2.14. Ángulo de inclinación del álabe en el borde de entrada (Fuente: Li, 2000).

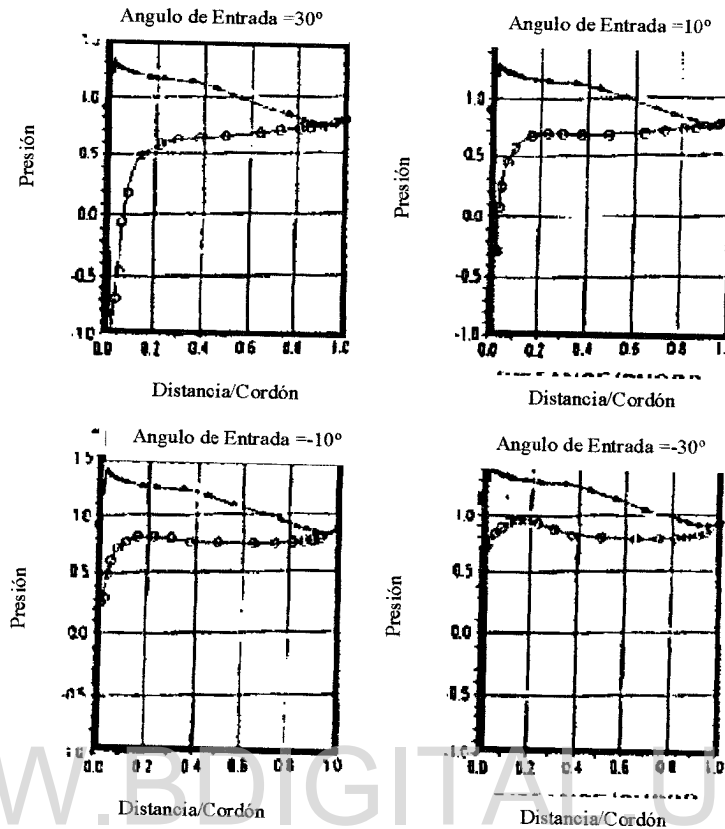


Fig. 2.15. Efecto de distribución de presiones (Fuente: Li, 2000).

3. Métodos de detección de cavitación en turbinas hidráulicas

La cavitación se presenta como un grave problema tanto para operaciones como para el personal de mantenimiento, ya que las erosiones causadas sobre los rodets hacen obligatorias las paradas de la máquina para corregir sus efectos. Es por ello que todas las organizaciones que tienen que ver con el diseño y operación de las turbinas hidráulicas han sumado esfuerzos para desarrollar distintos métodos para detectar y de cierta manera cuantificar el efecto que tiene el fenómeno dentro de la máquina. En los siguientes apartados se van a describir las técnicas más utilizadas en los últimos años por los investigadores del área.

3.1 Técnica de conteo de picaduras

Es un método intrusivo que permite estimar la erosión provocada por la cavitación en una zona del álabe, de igual manera se puede intuir las características de las burbujas que

implotan cerca de la superficie del álabe tales como tamaño, presión de impacto y frecuencia. La técnica se basa en el análisis de las picaduras debidas a cavitación, que se obtienen después de una prueba de corta duración (menos de una hora) en muestras pulidas de metal suave (cobre puro, aluminio puro, plata, etc) fijadas sobre la superficie del álabe (Dorey y col, 1996) (Fig. 2.16).

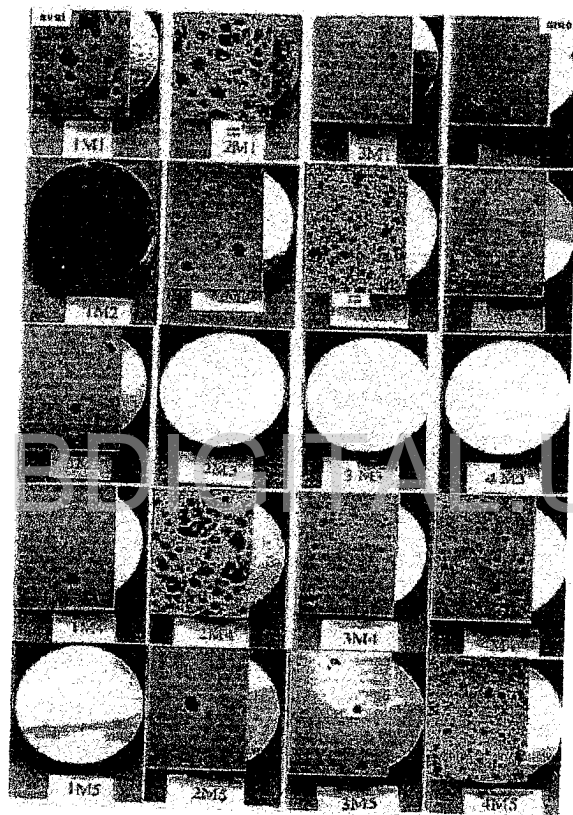


Fig. 2.16. Muestras con picaduras y detalle micrográfico aumentado 10 veces.

El daño causado sobre el material y las características de las picaduras se pueden estimar mediante la observación directa de las picaduras con la ayuda de un microscopio o utilizando interferómetros y perfilómetros láser, bien sea para mediciones en 2D o 3D (Lohrberg y Stoffel, 2001), luego se utilizan algoritmos de procesamiento de imágenes para determinar los distintos parámetros de las picaduras presentes (Dorey y col, 1996; Lohrberg y Stoffel, 2001).

Los resultados permiten establecer relaciones de cavitación absoluta y se pueden utilizar para la validación de modelos y técnicas nuevas, sin embargo el hecho de utilizar

muestras colocadas en el interior de las máquinas no lo hace atractivo para sistemas de monitorización.

3.2 Probetas electroquímicas DECER

Los detectores electroquímicos de erosión de cavitación DECER fueron desarrollados por el IREQ en colaboración con la Universidad de Paris (Bourdon y col., 1988). La técnica consiste en empotrar en la parte de la superficie del álabe que está sometida a la mayor acción de cavitación, probetas aislantes de titanio que tienen la característica de oxidarse rápidamente en el agua (Fig. 2.17). Estas sondas se conectan apropiadamente en un circuito potencio-estático. Cuando esta superficie de metal pasiva, cubierta por una capa de óxido aislante y protectora, se ve sujeta a la cavitación, la superficie de metal fresca y descubierta dejada atrás por las partículas metálicas erosionadas, espontáneamente se repasivan con el comienzo de la corriente electro-química. Mediante calibraciones adecuadas se relaciona la intensidad de estas corrientes de repasivación tanto con la velocidad de erosión como con la velocidad de pérdida de peso del material.

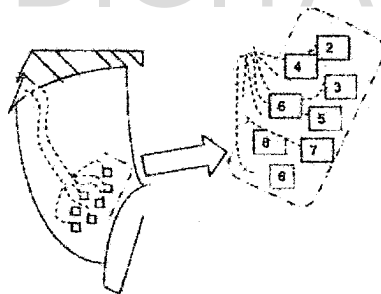


Fig. 2.17. Esquema de montaje de probetas DECER

El método permite realizar mediciones absolutas de cavitación, es decir, se puede deducir la velocidad de desgaste [kg/h] a partir del estudio estadístico de las señales provenientes de las probetas, bien sea en prototipos (Bourdon, 1996) o en modelos (Dupont, 1996), de manera tal que también se puede utilizar como medio de validación para el desarrollo de nuevas técnicas de cavitación (Bourdon, 2000). Sin embargo, no es muy aplicada en mediciones en línea ya que para empotrar las probetas deben abrirse orificios en los álabes y realizar un montaje bastante complicado que no es muy manejable para operaciones industriales.

4. Método vibratorio de detección de cavitación

Es la técnica más utilizada por los investigadores en la actualidad. Fue desarrollada por Bourdon (2000) en colaboración con el IREQ (Instituto de Investigación de Hydro-Québec por sus siglas en francés) y el IMHEF (Instituto de Máquinas Hidráulicas y Mecánica de los Fluidos por sus siglas en francés) del EPFL (Escuela Politécnica Federal de Lausane). Este método ha sido ampliamente validado por numerosos autores y sus resultados han sido muy alentadores (Bourdon y col, 1996; Dupont y col, 1996; Dorey y col, 1996; Farhat y Bourdon, 1998; Farhat y col, 1999; Escaler y col, 2002; Kaye y Farhat, 2002), incluso ha sido utilizado en las instalaciones de las plantas hidrogenadoras de Guri y Macagua con resultados exitosos (Bourdon y Lavigne, 2000).

El método parte de la hipótesis que un impacto de cavitación está asociado con una onda de choque que aparece después del colapso de una burbuja de vapor, con un microchorro que perfora una burbuja asimétrica o una combinación de ambos. Estos fenómenos, cuya duración está en el orden de los microsegundos, tienen la característica de excitar un espectro de frecuencias bastante amplio. En este sentido, para identificar estos impactos recurrentemente periódicos es necesario analizar la envolvente de la respuesta vibratoria de alta frecuencia de la estructura a estos impactos en el cojinete guía, ya que esta parte es la más cercana a las áreas atacadas por los impactos en los álabes y la banda, estas señales son registradas y se hace referencia a ellas como las provenientes de los acelerómetros montados en el cojinete guía. El uso de la envolvente de la vibración de alta frecuencia, permite separar la respuesta vibratoria de la estructura causada por los impactos de cavitación de las vibraciones de baja frecuencia generadas por el flujo, de aquellas que no tienen carácter impulsivo.

Por otro lado, debido a que el crecimiento y el colapso de las cavidades de vapor en los álabes están asociados con pulsaciones de presión de baja frecuencia en el flujo, se instala un acelerómetro en el brazo de control de la última paleta directriz para identificar la frecuencia de los impactos de cavitación que inciden en el rodete. Este acelerómetro es montado de manera tal que responda a las vibraciones rotacionales de la paleta directriz mas susceptible a ser excitada por las pulsaciones de presión generadas por el proceso de creación, crecimiento y colapso de las estructuras de vapor en el flujo, convirtiendo a la

señal en una referencia para decifrar el carácter periódico de la cavitación. A continuación se presenta una descripción del método y sus requerimientos

4.1 Recolección de las señales

A. Instrumentación y equipos

A continuación se enumeran la instrumentación y los materiales necesarios para la recolección de las señales:

- 3 acelerómetros piezoeléctricos de alta frecuencia.
- 3 cables para acelerómetros.
- Registrador – Analizador digital.
- Osciloscopio digital.
- Calibrador de acelerómetros
- 4 Cables coaxiales largos.
- 6 cables coaxiales cortos.
- Puntas BNC.
- Bases para los acelerómetros, fijación con pegamento.
- Amplificador – Acondicionador.
- Cinta eléctrica de PVC.
- Computador portátil.

B. Montaje

Para la obtención de las señales se proceden a instalar dos (2) acelerómetros de alta frecuencia en forma radial sobre la cubierta del cojinete guía, estos sensores se distancian por un ángulo de 90° , el primero en la posición aguas arriba que se denomina a 0° y el otro a 270° en dirección de las agujas del reloj (Fig. x). También se fija un acelerómetro de alta frecuencia en el brazo de control de la paleta directriz que está en línea con el final de la caja espiral (Fig. 2.18).

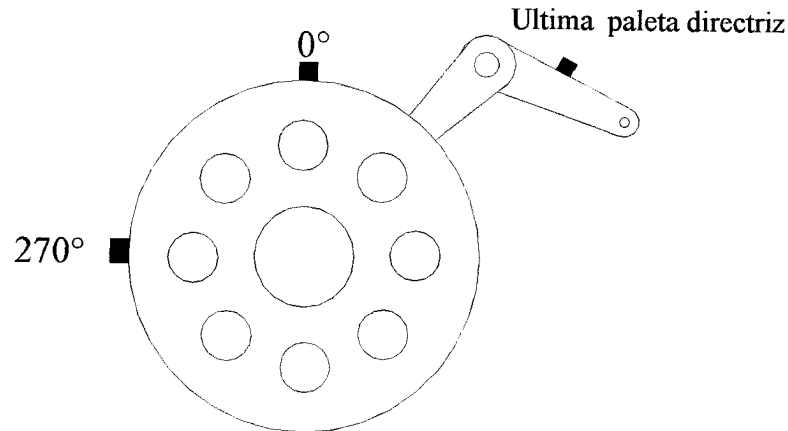


Fig. 2.18. Ubicación de acelerómetros para el método de detección vibratoria

Las señales de los acelerómetros son enviadas a través de cables coaxiales al acondicionador – amplificador y de allí al registrador, el cual se encarga de bajar la información a formato digital y luego se pasa al disco duro de la computadora portátil para luego ser procesadas (Fig. 2.19), además se pasa una señal al osciloscopio para verificar el carácter impulsivo de la misma.

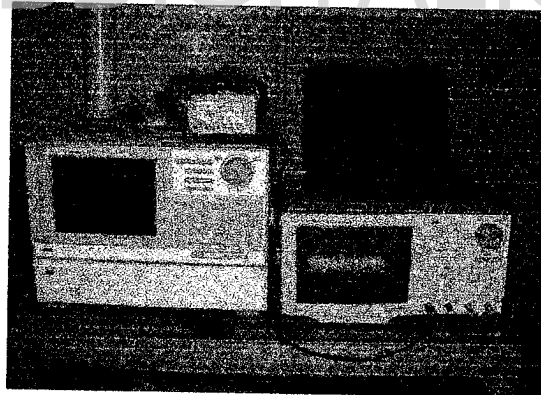


Fig. 2.19. Montaje de equipos para una prueba de cavitación

C. Recolección de datos

- Arrancar la unidad, sincronizarla y llevarla al 100% de apertura de paletas directrices según la regla del servomotor de apertura o a la máxima potencia, según sea el caso. La condición se establece bajo el control manual del gobernador con el limitador de apertura o desde el cuarto de control de la planta.
- Esperar cinco minutos para la estabilización hidráulica de la máquina, se toman treinta (30) registros de 6 segundos con intervalos de 1 segundo a una frecuencia de

muestreo de 100 kHz, ya que el fenómeno se presenta en un rango entre 5 kHz y 25 kHz y se necesita un valor mayor al doble de la frecuencia deseada por lo tanto es necesario tomar un valor de muestreo superior a 50 kHz. El almacenamiento de la data en el computador portátil se realizará antes de seguir a la próxima condición de operación.

- Luego llevar la máquina al 60% de apertura de paletas y seguidamente a 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 95, 85, 75 y 65%. En cada paso se tomaran registros de los sensores instalados. En caso de hacer la prueba bajo el control de potencia se deben calcular los valores aproximados de potencia que asemejen las condiciones anteriormente descritas.

4.2 Tratamiento de las señales

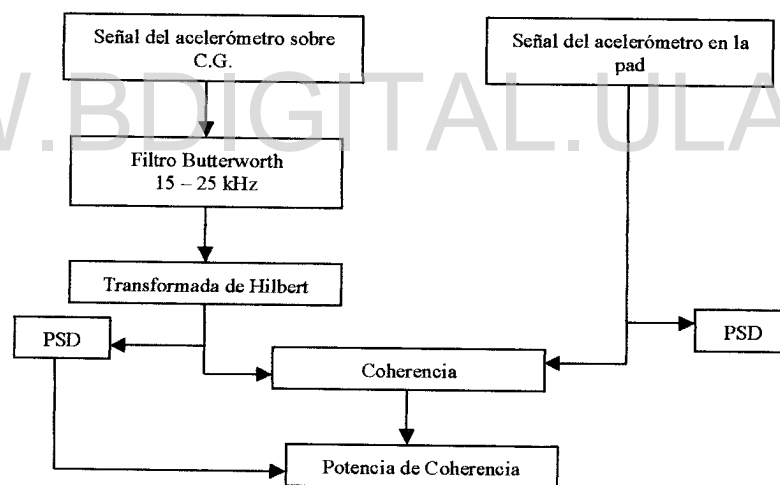


Fig. 2.20. Flujograma del método de detección vibratoria

Una vez recolectados los datos correspondientes a todos los puntos de prueba se procede con el tratamiento de las señales para obtener la curva de cavitación relativa. Para el procesamiento de los datos se utilizan distintas herramientas matemáticas que permiten descifrar el carácter periódico de la cavitación y consecuentemente obtener los niveles de cavitación presentes en la operación de la máquina, este procedimiento se muestra en la Fig. 2.20, y seguidamente se explican cada uno de sus módulos y la interacción de los mismos dentro del método.

A. Filtro Butterworth

Con la finalidad de extraer la banda de alta frecuencia de las señales tomadas por los acelerómetros montados a 0° y a 270°, se utiliza un filtro digital pasa-banda Butterworth, debido a que estos filtros poseen la característica de tener las bandas de paso y de detención más planas (ver Fig. 2.21). El ancho de banda que se utiliza en estudios de cavitación relativa es entre 15 y 25 kHz, ya que estudios previos han demostrado que la frecuencia de implosión de las burbujas se encuentra entre las 5 y 35 mil veces por minuto.

La magnitud de la función de respuesta en frecuencia del filtro Butterworth satisface:

$$|H_{bw}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^{2n}}} \quad (2.3)$$

Donde:

n = Orden del filtro.

ω = Frecuencia variable.

ω_s = Frecuencia de referencia

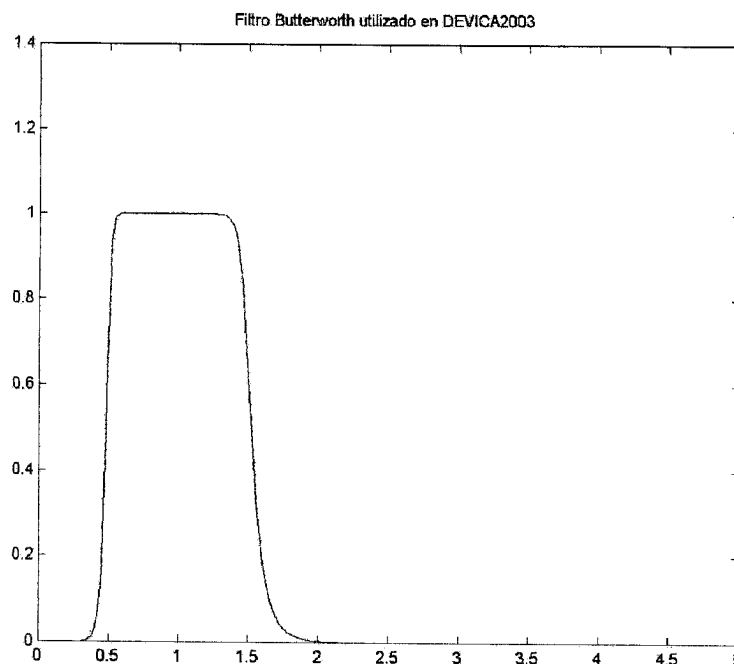


Fig. 2.21. Filtro Butterworth pasabanda 15 kHz – 25 kHz de orden 10

B. Transformada de Hilbert

Una vez obtenida la banda de alta frecuencia entre 15 y 25 KHz, se procede a obtener su envolvente a fin de realizar la demodulación de la señal, considerándola producto de un corrimiento en la frecuencia producto de la portadora que es la señal de cavitación.

La transformada de Hilbert es una convolución en el tiempo entre la señal original $x(t)$ y $\frac{1}{\pi}$, cumple con la ecuación;

$$H(t) = \frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.4)$$

Aunque $H(t)$ se refiere a la transformada de Hilbert, sobre la función $x(t)$, es una serie de datos complejos, la parte real de los resultados debe ser la función a la que se aplica la transformada, por lo tanto, se puede decir:

$$H_{X(t)} = x(t) + H(t)$$

Así se obtiene una solución, donde la parte real es la función original, y la parte imaginaria se corresponde con la transformada de Hilbert.

Una convolución en el tiempo, se corresponde con una multiplicación en la frecuencia, eso es la Transformada de Hilbert, una multiplicación en la frecuencia de la señal a estudiar por un paso escalón unitaria, eliminando la parte negativa del espectro generando así la señal analítica. Al retornar al dominio del tiempo, se tiene lo mencionado anteriormente en $H_{X(t)}$.

En análisis de señales, la Transformada se aplica para determinar la Envolvente Analítica de una señal, calculando el módulo de la solución $H_{X(t)}$:

$$\text{envolvente} = |H_{X(t)}|$$

La envolvente analítica, modula la señal logrando trasladar a bajas frecuencias la información que se encuentra en altas frecuencias (Oppenheim A y Lim J, 1988; Schwartz, 1980)

C. Densidad espectral de potencia

El estudio de la composición frecuencial de las vibraciones se realiza mediante el cálculo de la densidad espectral del proceso o espectro de potencia, aprovechando el resultado del teorema de Fourier.

Aunque en la práctica pueda calcularse directamente a partir de la transformada de Fourier del propio proceso $x(t)$, desde un punto de vista matemático no puede definirse así, puesto que al tratar con muestras limitadas de procesos reales, se debe suponer que se tratan de muestras de procesos aleatorios estacionarios. Y puesto que estos se definen como aquellos cuyas "propiedades estadísticas son invariantes respecto a un desplazamiento del origen de los tiempos" (Papoulis, 1978), resulta que la condición

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (2.5)$$

para poder aplicar la transformada de Fourier, ya no se cumple. Por lo tanto, para la definición matemática de la densidad espectral, es necesario introducir la definición de la función de autocorrelación del proceso estacionario $x(t)$.

a. Función de Autocorrelación.

La función de autocorrelación de un proceso aleatorio $x(t)$ se define como el valor medio del producto $x(t) x(t+\tau)$, y suponiendo que el proceso sea estacionario, el valor de la media será independiente del tiempo absoluto t , y solo dependerá del parámetro temporal τ , quedando entonces como:

$$R_x(\tau) = \langle x(t) \cdot x(t+\tau) \rangle \quad (2.6)$$

Las propiedades más importantes de la función de autocorrelación son:

- si $x(t)$ es estacionaria, el valor medio y la desviación típica serán independientes de t , de forma que:

$$\begin{aligned} \langle x \rangle_t &= \langle x t + \tau \rangle = \langle x \rangle \\ (\Delta x)_t &= (\Delta x)_{t+\tau} = (\Delta)_x \end{aligned} \quad (2.7)$$

con lo que se demuestra fácilmente que el coeficiente de correlación para $x(t)$ y $x(t+\tau)$ será:

$$\rho(\tau) = \frac{R_x(\tau) - \langle x \rangle^2}{(\Delta x)^2} \quad (2.8)$$

y por lo tanto,

$$R_x(\tau) = \rho(\tau) \cdot (\Delta x)^2 + \langle x \rangle^2 \quad (2.9)$$

- de la anterior se sigue que la función de autocorrelación esta acotada por los valores

$$-(\Delta x)^2 + \langle x \rangle^2 \leq R_x(\tau) \leq (\Delta x)^2 + \langle x \rangle^2 \quad (2.10)$$

puesto que $R_x(\tau)$ está acotada por ± 1 .

- cuando $\tau=0$,

$$R_x(\tau) = \langle x \rangle^2 \quad (2.11)$$

- cuando τ tiende a ∞ , el proceso aleatorio tenderá a estar incorrelacionado puesto que no existirá relación entre $x(t)$ y $x(t+\tau)$. Por tanto, el coeficiente de correlación $\rho(\tau)$ tenderá a 0, y según (ec. 2.9)

$$R_x(\tau) \rightarrow \langle x \rangle^2 \quad (2.12)$$

Por lo tanto, la función de autocorrelación de cualquier proceso aleatorio cumple con la condición expresada en (ec. 2.5), si se transforma convenientemente la función $x(t)$ de tal modo que $\langle x \rangle = 0$. Es ésta la razón por la que se hace necesario introducir la función de autocorrelación para la aplicación de la transformada de Fourier en el cálculo de la densidad espectral de los procesos aleatorios.

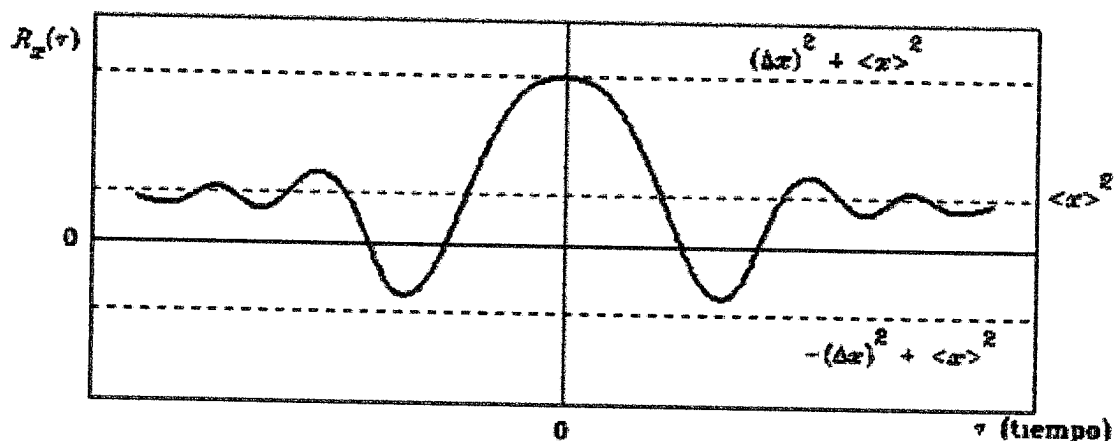


Fig. 2.22. Ejemplo de una función de autocorrelación de un proceso aleatorio estacionario.

b. Densidad Espectral

Se define la densidad espectral $S_x(\omega)$ del proceso $x(t)$, como la transformada de Fourier de su función de autocorrelación $R_x(\tau)$, que vendrá dada por:

$$S_x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2.13)$$

por lo que la función de autocorrelación podrá expresarse como la transformada inversa del espectro:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) \cdot e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.14)$$

$S_x(\omega)$ es una función continua de la frecuencia angular ω , y sus propiedades más importantes son:

- dado que $S_x(\omega)$ puede expresarse en términos de sus partes real e imaginaria

$$S_x(\omega) = A(\omega) - iB(\omega),$$

si el proceso $x(t)$ es real, se puede demostrar que

$$S_x(\omega) = A(\omega) \quad (2.15)$$

Donde

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \cdot \cos(\omega\tau) d\tau \quad (2.16)$$

es decir, que $S_x(\omega)$ es una función real de ω . Esta es otra razón por la que interesa abordar el estudio de la estructura frecuencial de los procesos reales $x(t)$ a través de su espectro $S_x(\omega)$ y no de su transformada de Fourier $X(\omega)$, dado que esta última es siempre una función compleja más difícil de manejar e interpretar.

- de la anterior puede deducirse que $S_x(\omega)$ es una función par, es decir, que $S_x(-\omega) = S_x(\omega)$ es una función simétrica positiva.
- por último, de su definición puede deducirse que

$$R_x(\tau=0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) d\omega = \langle x^2 \rangle \quad (2.17)$$

por lo que el valor cuadrático medio de un proceso $\langle x^2 \rangle$ viene dado por el área comprendida bajo el gráfico de la densidad espectral $S_x(\omega)$ (ver Fig 2.23). Las unidades de $S_x(\omega)$ son las de (valor cuadrático medio)/(unidad de frecuencia).

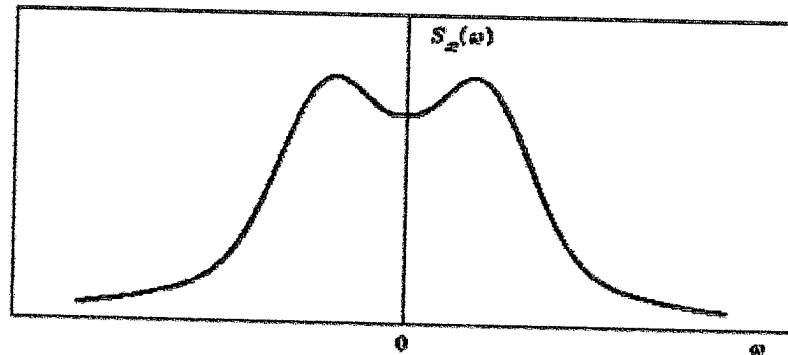


Fig. 2.23. Representación espectral para un proceso real $x(t)$.

D. Métodos no paramétricos de estimación espectral

Los métodos clásicos o no paramétricos se basan en la estimación de la secuencia de autocorrelación de un proceso aleatorio a partir de un conjunto de datos, y posteriormente aplican la transformada de Fourier para obtener una estimación del espectro. Los estimadores no paramétricos más importantes son los basados en el periodograma, introducido por Schuster en 1898. El periodograma tiene como ventaja la sencillez de cálculo, pero su precisión en la estimación del espectro es muy limitada, especialmente para conjuntos reducidos de datos. Existen modificaciones aplicadas al periodograma para mejorar sus prestaciones. En particular, se presentarán los siguientes métodos no paramétricos de estimación espectral:

- Periodograma
- Periodograma Modificado
- Bartlett
- Welch

a. Periodograma

El espectro de potencia de un proceso aleatorio estacionario en sentido amplio es la transformada de Fourier de la secuencia de autocorrelación:

$$S_x(e^{j\omega}) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_x(k) e^{-j\omega k} \quad (2.18)$$

De esta forma, la estimación espectral puede considerarse como un problema de estimación de la autocorrelación. Para un proceso ergódico en autocorrelación y una

cantidad ilimitada de datos, la secuencia de autocorrelación puede ser obtenida mediante el promedio temporal:

$$r_x(k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N x(n)x(n-k) \quad (2.19)$$

Pero si la señal $x(n)$ es conocida únicamente en un intervalo finito (para $n = 0, 1, \dots, N-1$), entonces la secuencia de autocorrelación se ha de estimar mediante una suma finita:

$$r_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n-k) \quad (2.20)$$

Con el fin de asegurar que los valores de $x(n)$ fuera del intervalo $[0, N-1]$ están excluidos del sumatorio, la ecuación anterior se puede escribir de la forma siguiente:

$$r_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n-k); k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.21)$$

para valores negativos de k , se aplica la propiedad de simetría conjugada:

$$r_x(-k) = r_x^*(k)$$

y para valores fuera del intervalo $[-N+1, N-1]$, se iguala a cero:

$$r_x(k) = 0; |k| \geq N$$

Aplicando la transformada de Fourier a la secuencia de autocorrelación calculada, se obtiene el estimador espectral de potencia denominado Periodograma:

$$S_x(e^{j\omega}) = \sum_{k=-N+1}^{N-1} r_x(k) e^{-jk\omega} \quad (2.22)$$

En ocasiones, puede resultar más conveniente expresar el Periodograma en función del proceso $x(n)$. Suponiendo que $x_N(n)$ es una secuencia de longitud N , igual a $x(n)$ en el intervalo $[0, N-1]$, y cero fuera de este intervalo.

$$x_N(n) = \begin{cases} x(n) & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{Para otros valores} \end{cases}$$

De esta manera, se puede considerar $x_N(n)$ como el producto de $x(n)$ con una ventana rectangular $w_R(n)$:

$$x_N(n) = w_R(n)x(n) \quad (2.23)$$

y en términos de $x_N(n)$, se puede expresar la secuencia de autocorrelación estimada como:

$$r_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n)x_N(n-k) = \frac{1}{N} x_N(k) * x_N(-k) \quad (2.24)$$

Tomando la transformada de Fourier y aplicando el teorema de la convolución, el periodograma adquiere la forma:

$$S_x(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} X_N(e^{j\omega})X_N(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} |X_N(e^{j\omega})|^2 \quad (2.25)$$

donde $X_N(e^{j\omega})$ es la transformada discreta de Fourier de la secuencia $x_N(n)$:

$$X_N(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_N(n)e^{-j\omega n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n}$$

Así, el periodograma es proporcional al cuadrado de la transformada discreta de $x_N(n)$, y puede calcularse fácilmente de la siguiente manera:

$$x_N(n) \xrightarrow{DFT} X_N(k) \rightarrow \frac{1}{N} |X_N(k)|^2 = S_{per}(e^{j2\pi nk/N}) \quad (2.26)$$

b. Periodograma modificado

El periodograma modificado tiene por objetivo solucionar el problema de enmascaramiento espectral producido por el periodograma, ocasionado por la gran amplitud de los lóbulos secundarios de la ventana rectangular. Para ello, propone enventanar el proceso con una ventana general $w(n)$. El periodograma modificado se expresa según la ecuación:

$$S_M(e^{j\omega}) = \frac{1}{NU} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)w(n)e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (2.27)$$

donde N es la longitud de la ventana, y

$$U = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |w(n)|^2 \quad (2.28)$$

U es una constante definida de forma que el periodograma modificado resulte asintóticamente no sesgado.

c. Bartlett: Promediado de periodogramas

El método de Bartlett (1948) es un estimador consistente del espectro de potencia que realiza un promediado del periodograma. La mejora respecto al periodograma reside en la reducción de varianza.

Licencia Creative Commons:

Supongamos K realizaciones incorreladas de un proceso aleatorio $x(n)$. Cada realización tiene una longitud L . El periodograma de cada realización $x_i(n)$ es:

$$S_{per}^{(i)}(e^{j\omega}) = \frac{1}{L} \left| \sum_{n=0}^{L-1} x_i(n) e^{-jn\omega} \right|^2; i = 1, 2, \dots, K \quad (2.29)$$

El promedio de estos periodogramas define el estimador de Bartlett:

$$S_b(e^{j\omega}) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K S_{per}^{(i)}(e^{j\omega}) \quad (2.30)$$

El valor medio de $S_b(e^{j\omega})$:

$$E\{S_b(e^{j\omega})\} = E\{S_{per}^{(i)}(e^{j\omega})\} = \frac{1}{2\pi} S_x(e^{j\omega}) * W_B(e^{j\omega}) \quad (2.31)$$

donde $W_B(e^{j\omega})$ es la transformada de Fourier de la ventana de Bartlett, $w_B(k)$, que se extiende desde $-L$ hasta L . Este estimador es asintóticamente no sesgado. Con esta suposición de realizaciones incorreladas, se obtiene una varianza de $S_b(e^{j\omega})$:

$$Var\{S_b(e^{j\omega})\} = \frac{1}{K^2} \sum_{i=1}^K [Var\{S_{per}^{(i)}(e^{j\omega})\}] = \frac{1}{K} Var\{S_{per}^{(i)}(e^{j\omega})\} \approx \frac{1}{K} S_x^2(e^{j\omega}) \quad (2.32)$$

K veces inferior a la del periodograma y tiende a cero cuando K tiende a infinito. En consecuencia, $S_b(e^{j\omega})$ resulta ser un estimador consistente del espectro de potencia si K y L pueden tender a infinito (es decir, si son lo suficientemente altos).

d. Welch: Promediado de periodogramas modificados

Welch, en 1967, propuso dos modificaciones al método de Bartlett.

- En primer lugar, permitió el solapamiento de segmentos de datos. Este efecto se conoce como overlap. Suponiendo que entre dos secuencias sucesivas existe un desplazamiento de D puntos y que cada secuencia consta de L puntos de longitud, la secuencia i -ésima viene determinada por la expresión:

$$x_i(n) = x(n + iD) \quad ; \quad n = 0, 1, \dots, L-1 \quad (2.33)$$

El solapamiento entre dos secuencias consecutivas $x_i(n)$ y $x_{i+1}(n)$ es de $L-D$ puntos, y si las K secuencias cubren una longitud de N puntos, entonces:

$$N = L + D(K-1) \quad (2.34)$$

Licencia Creative Commons:

Suponiendo que no existe solape entre las secuencias ($D = L$); se tendrá $K = N/L$, secciones de longitud L , como en el método de Bartlett. Si se permite que las secuencias posean un solape del 50% ($D = L/2$), el número de secciones K de longitud L es:

$$K = 2N/L - 1 \quad (2.35)$$

De esta manera, se mantiene la resolución (la longitud de la secuencia no varía) del método de Bartlett, pero al doblar el número de periodogramas modificados que van a promediarse, se reduce la varianza.

Con un 50% de solape entre las secuencias, también se podrán formar K secuencias de longitud $2L$, donde K es:

$$K = N/L - 1$$

Así, se mejora la resolución manteniendo la misma varianza que en el método de Bartlett.

Con el overlap o solapamiento es posible incrementar el número y/o la longitud de las secuencias que van a ser promediadas, logrando de esta forma una reducción en la varianza, siempre con un compromiso en la resolución del método de estimación espectral.

- La segunda propuesta consiste en inventanar cada secuencia $x_i(n)$ con una ventana general $w(n)$ (no sólo con la ventana rectangular), antes de calcular el periodograma. De esta manera se obtiene un periodograma modificado por cada secuencia inventanada:

$$S_M^{(i)}(e^{j\omega}) = \frac{1}{LU} \left| \sum_{n=0}^{L-1} w(n)x_i(n)e^{-jn\omega} \right|^2 \quad (2.36)$$

El estimador de Welch es el promedio de los periodogramas modificados:

$$S_w(e^{j\omega}) = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} S_M^{(i)}(e^{j\omega}) \quad (2.37)$$

y su expresión general es:

$$S_w(e^{j\omega}) = \frac{1}{KLU} \sum_{i=0}^{K-1} \left| \sum_{n=0}^{L-1} w(n)x(n+iD)e^{-jn\omega} \right|^2 \quad (2.38)$$

donde U :

$$U = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} |w(n)|^2 \quad (2.39)$$

E. Función de coherencia

Es una función en el dominio de frecuencia, que indica el grado de dependencia lineal que existe entre dos señales en el tiempo, esto resulta en una relación directa que revela las frecuencias en las que se encuentran máximos ó mínimos en ambas señales, su rango esta entre 0 y 1, donde 1, indica una analogía prácticamente perfecta entre las señales en el tiempo, a una frecuencia dada.

La función de coherencia, cumple la ecuación:

$$C_{xy} = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \quad (2.40)$$

donde:

x e y , son las señales a estudiar.

P_{xy} = Densidad espectral de cruce = CSD (Cross Spectral Density)

P_{xx} y P_{yy} = Densidad espectral de potencia = PSD (Power Spectral Density)

C_{xy} = Coherencia entre x e y .

Por su parte, la densidad espectral de cruce se obtiene para dos señales en el tiempo, y se define como la multiplicación de la transformada de Fourier de una señal, por la transformada de Fourier conjugada de la otra, esto es:

$$P_{xy} = |F(y_{(t)})| \times |F(x_{(t)})|' \quad (2.41)$$

F. Potencia de coherencia

Es una aplicación de la Función de Coherencia, da una medida de que parte del espectro medido P_{xx} , es coherente en particular con una señal representada por $y_{(t)}$ y su espectro P_{yy} . Anteriormente se aclaró que la Función de Coherencia es una relación en frecuencia entre dos señales $x_{(t)}$ y $y_{(t)}$, la Potencia de Coherencia por su parte, establece la

influencia de cada una de estas señales (por separado), en la coherencia entre ellas, indicando que tanto afecta $x(t)$ ó $y(t)$, a C_{xy} , se obtiene de multiplicar la Función de Coherencia, por el Espectro de Densidad de Potencia (PSD) de la señal que se desea estudiar:

$$\text{Si se quiere estudiar la influencia de } x(t) \rightarrow PC_x = C_{xy} \times P_{xx}$$

$$\text{Si se quiere estudiar la influencia de } y(t) \rightarrow PC_y = C_{xy} \times P_{yy}$$

Con esta herramienta se logra establecer qué armónicos del espectro son los que están relacionados con el carácter periódico de la cavitación ya que establece la relación entre el espectro de la envolvente de la señal sobre el cojinete guía, que es la que tiene la información de cavitación, con la baja frecuencia de la señal de referencia de la paleta directriz, ya que esta última es la que va a detectar las pulsaciones de presión que gobiernan la formación de cavidades de vapor en el flujo. De manera tal, que con este procedimiento se logra descifrar la periodicidad escondida del fenómeno, para luego proceder a obtener los valores de amplitud de los distintos armónicos seleccionados en cada punto de prueba, se promedian y se construye las curvas de cavitación para cada máquina.

Capítulo III. Diseño del sistema de detección de cavitación

1. Selección del método de detección de cavitación

Para los operadores de turbinas hidráulicas, la cavitación se presenta como uno de los problemas más graves que tienen que enfrentar diariamente. Como ya se ha mencionado anteriormente, el fenómeno depende en gran parte del diseño interno de la máquina por lo que su comportamiento se mantiene muy constante en el tiempo. Esta característica permite deducir que con la detección de los distintos niveles de cavitación que se presentan en el funcionamiento de las unidades, se van a obtener las curvas características de cavitación para cada máquina. En consecuencia, estas gráficas van a mostrar el comportamiento del fenómeno con respecto a la condición de operación de la unidad, de manera tal que se pueden establecer intervalos de funcionamiento más seguros desde el punto de vista de cavitación.

Con la finalidad de determinar el método de detección de cavitación más adecuado para el sistema de monitorización, se procedió a evaluar y seleccionar los distintos métodos previamente descritos en la presente investigación. Los criterios utilizados para dicha discriminación tuvieron que ver principalmente con las ventajas y desventajas de los métodos establecidas en la información biblio-hemerográfica, de igual manera la disponibilidad tanto de materiales y equipos necesarios para ejecutar el método como de resultados previos suficientes para la validación del sistema diseñado, bajo estos principios fue seleccionado el método detección vibratoria como procedimiento a utilizar para el diseño del sistema de monitorización.

Dentro de las ventajas que presenta su utilización, la detección vibratoria se muestra como un método no intrusivo, de manera tal que no es necesario realizar modificaciones sobre la estructura de la máquina para poder ejecutarlo (Bourdon, 2000; Farhat y col, 1999; Zuoyi y col., 1999). En este sentido, otra de sus ventajas establece que es de fácil instalación sobre cualquier turbina hidráulica de manera que se pueden realizar mediciones con la máquina en funcionamiento para poder observar los distintos niveles que se presentan a lo largo de la operación de dicha unidad (Bourdon 2000; Escaler y col, 2002; Farhat y Bourdon, 1998). Por otro lado, es un procedimiento que ha sido ampliamente validado y estudiado por numerosos investigadores (Bourdon P y col, 1996; Dupont y col,

1996; Dorey y col, 1996; Escaler X y col, 2002; Farhat M y col, 1999; Kaye M y Farhat M, 2002; Farhat M y Bourdon P, 1998) y además se tiene acceso a los resultados de la campaña de medición en EDELCA realizada por Hydro-Québec (Bourdon y Lavigne, 2000), en la cual se utilizó el método para determinar los niveles de cavitación en las unidades de las plantas de Guri y Macagua. Estas razones hacen del método de detección vibratoria de cavitación el mejor procedimiento para el diseño del sistema utilizado en la presente investigación.

2. Mejora del método de detección vibratoria de cavitación

Tal como se definió, el método permite descifrar la periodicidad escondida del fenómeno en la máquina a partir de la evaluación de la potencia de coherencia entre las señales (Bourdon, 2000). En este sentido, para poder obtener los valores que van a componer dicha gráfica, es necesario contar con la densidad espectral de potencia de las envolventes de las señales del cojinete guía filtradas en la banda correspondiente, así como con la función de coherencia entre la envolvente de la señal del cojinete guía y la señal del acelerómetro montado sobre la paleta directriz. Con la finalidad de obtener estos parámetros, se utiliza el periodograma de Welch para estimar la densidad espectral de potencia y la función de coherencia.

El periodograma de Welch permite introducir el número de muestras (n_{fft}) con el que se va a hacer el estudio, esta propiedad se traduce en una gran ventaja si se utiliza para definir el paso de discretización en la frecuencia. Por ejemplo, si se quiere obtener el vector de frecuencias (f) para un estudio espectral donde la frecuencia de muestreo (f_0) es de 100 kHz y se tiene un vector de muestras (k) con n_{fft} igual a 10, entonces el vector de frecuencias se calculará como:

$$\begin{aligned} f_s &= 100 \text{ kHz} \\ n_{fft} &= 10 \\ k &= [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10] \\ f_{(i)} &= \frac{k_{(i)}}{n_{fft}} \cdot f_s \\ f &= [0 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70 \ 80 \ 90 \ 100] \text{ kHz} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Si por el contrario n_{fft} es igual a 20, entonces:

$$k = [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20]$$

$$f = [0 \ 5 \ 10 \ 15 \ 20 \ 25 \ 30 \ 35 \ 40 \ 45 \ 50 \ 55 \ 60 \ 65 \ 70 \ 75 \ 80 \ 85 \ 90 \ 95 \ 100] \text{ kHz}$$

Se puede observar que en el primer caso el paso de discretización es de 10 kHz, mientras que en el segundo caso se aumenta $nfft$ al doble y el valor del paso disminuye a la mitad. De esta manera se puede utilizar de la ecuación (3.1) para determinar un paso de discretización deseado a partir de la modificación del valor de $nfft$, ya que $f_{(2)}$ va a ser igual al paso deseado, considerando que la frecuencia de muestreo va a ser una constante en el estudio:

Paso de discretización en frecuencia = $f_{(2)}$

$$k_{(2)} = 1$$

$$f_{(2)} = \frac{1}{nfft} \cdot f_s$$

$$f_{(2)} = \frac{f_{(s)}}{nfft} \quad (3.2)$$

Sin embargo, en el presente estudio es más atractivo determinar cual es el valor $nfft$ para un paso de discretización dado, ya que este último valor va a venir determinado por la frecuencia de rotación (f_0), de manera tal que a la hora de calcular el vector de frecuencias se componga solamente con múltiplos de f_0 , para este último caso se obtiene que:

$$f_{(2)} = f_0$$

$$nfft = \frac{f_s}{f_0} \quad (3.3)$$

Como un ejemplo de la aplicación de esta expresión, se utilizarán en la ec. 3.3 los valores reales con los que se calcularon los vectores de frecuencias en la validación del sistema diseñado y cuyos resultados se mostrarán en el siguiente capítulo:

$$f_0 = 1.875 \text{ Hz}$$

$$f_s = 100 \text{ kHz}$$

$$nfft = \frac{100000}{2,1433} = 46657,0242$$

Debido a que $nfft$ es un numero entero, se decidió tomar solamente la parte entera del número para realizar los estudios posteriores, de ahí que sea necesario calcular el error que se presenta al tomar en cuenta estas consideraciones:

Utilizando la ec. 3.2:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

$$nfft = 46657$$

$$f_{(2)} = \frac{100000}{46657} = 2,143301$$

$$e = \frac{2,143301 - 2,1433}{2,1433} \cdot 100 = 5,19e-5\%$$

De esta forma se muestra que el error en el que se incurre al tomar solamente la parte entera producto del resultado de la ec 3.3, es lo suficientemente pequeño como para aceptar dicha modificación.

Bajo estas consideraciones se utiliza el periodograma de Welch para realizar el estudio espectral, partiendo la señal en varias secciones de $nfft$ muestras (ajustados por la frecuencia de rotación de la máquina) y promediando cada uno de sus estudios espectrales individuales, con la finalidad de disminuir la varianza en el resultado final. Esta forma de estimar la densidad espectral de potencia y la función de coherencia han permitido hacer una reducción en la cantidad de datos necesarios para realizar un estudio de cavitación según los criterios utilizados por Hydro-Québec en su programa CAVIMAX®.

Este software desarrollado por la empresa canadiense y basado en el trabajo de Bourdon (2000), utiliza bloques de treinta (30) registros de 524288 puntos muestreados a 100 kHz por cada señal (Bourdon y Lavigne, 2000), ya que para realizar el cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) se utiliza un algoritmo rápido si el valor $nfft$ es una potencia de base 2, además con este valor de $nfft$ se obtiene un paso de discretización de 0,19. Esos treinta (30) estudios espectrales se promedian para disminuir la varianza y estimar un valor de densidad espectral de potencia. Sin embargo por limitaciones de software los registros deben tener un tamaño de muestra de bloques de 6 sg, lo que aumenta la cantidad de datos necesaria para llevar a cabo el estudio por cada condición estudiada, ya que al muestrear a 100 kHz se traduce en registrar 600.000 puntos.

Por su parte, el sistema diseñado realiza el cálculo de $nfft$ suficiente para obtener un vector de frecuencias compuesto por múltiplos de la frecuencia de rotación de la máquina. Tal como se observa en el ejemplo para una máquina con frecuencia de rotación de 2.1433 Hz (128,6 rpm), el valor de $nfft$ debe ser 47657 (cometiendo un error de 5,19e-5%), por lo que para realizar los mismos treinta (30) promedios, y tomando en cuenta las limitaciones de hardware para recolectar datos, se pueden utilizar bloques de tres (3) registros de 5 sg

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

muestreados a 100 kHz por cada señal. En la Tabla 3.1 se demuestra la disminución en la capacidad requerida de almacenamiento que se obtiene con esta mejora, con respecto a los criterios utilizados por CAVIMAX® para una prueba de cavitación.

Tabla 3.1. Comparación de capacidad de almacenamiento entre el sistema diseñado y CAVIMAX®

Software	Datos por Registro	Cantidad de registros	Cantidad de señales	Condic de operación	Total de datos
DEVICA2003	500.000	3	3	15	67.500.000
CAVIMAX	600.000	30	3	15	810.000.000

Con estos datos se puede calcular el porcentaje que representa la información utilizada por el sistema diseñado, con respecto a la usada por Hydro-Québec:

$$\frac{67,5}{810} * 100 = 8.33\%$$

Es decir, el sistema diseñado disminuye en 91.67% la capacidad de almacenamiento requerida. Esta mejora, tomando en cuenta la gran cantidad de datos, representa una considerable reducción en tiempo de adquisición y procesamiento de datos, memoria, costos computacionales y los costos que involucra tener una unidad de generación bajo pruebas.

Además de estas ventajas, la mejora también representa un aumento en la precisión del estudio. Siguiendo con el ejemplo, con el paso de discretización de CAVIMAX® se comete un error mayor que en el que se incurre con el sistema diseñado:

$$\text{Paso}_{\text{CAVIMAX}} = 0,19$$

$$f_0 = 2,1433$$

$$0,19 \times 11 = 2,09$$

$$e = \frac{2,1433 - 2,09}{2,1433} \cdot 100 = 2,5\%$$

Aunque el error que se comete al utilizar un paso de discretización de 0,19 Hz es aceptable, con la mejora del método se incurre en un error mucho menor; por lo que la mejora realizada también aumenta la calidad del estudio.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3. Devica2003

Para el diseño del sistema de cavitación se programó un software en Matlab 6.5 (con licencia de EDELCA), basado en las consideraciones descritas, denominado DEVICA2003 (Detección Vibratoria de Cavitación). El programa permite realizar el estudio de cavitación a partir de las modificaciones y la mejora alcanzada para el método de detección vibratoria.



Fig.3.1. Pantalla inicial de DEVICA2003

Posee una pantalla inicial o de presentación (Fig. 3.1), con un botón de acción que permite continuar a la pantalla de trabajo (Fig. 3.3), en la cual se presentan los cuatro módulos en los que se apoyan los procesos del software (Fig. 3.2). Para cada uno de estos subprocesos hay botón de acción, a saber:

- Ayuda.
- Datos Iniciales.
- Potencia de Coherencia.

- Curvas de Cavitación.

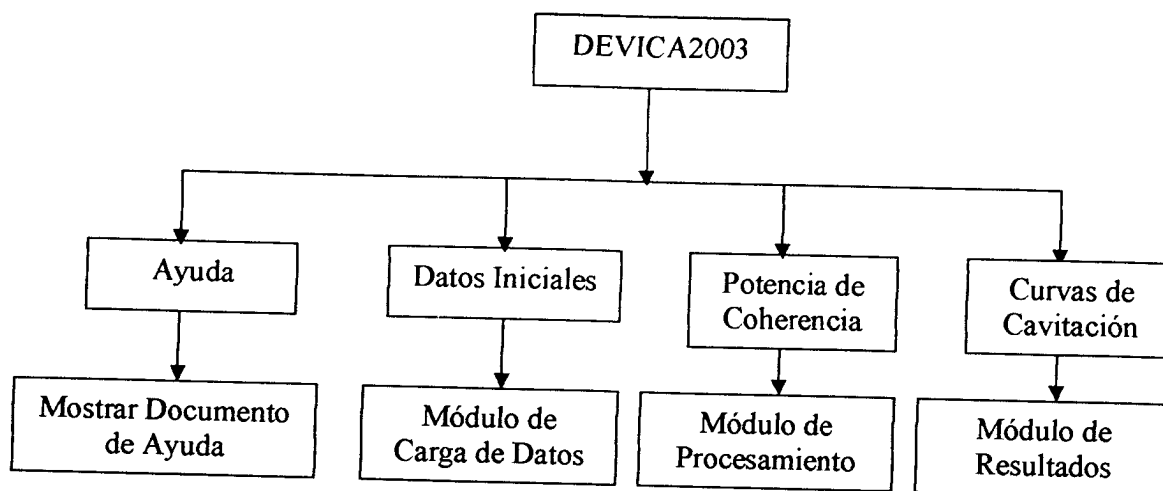


Fig. 3.2. Diagrama de flujo general de DEVICA2003

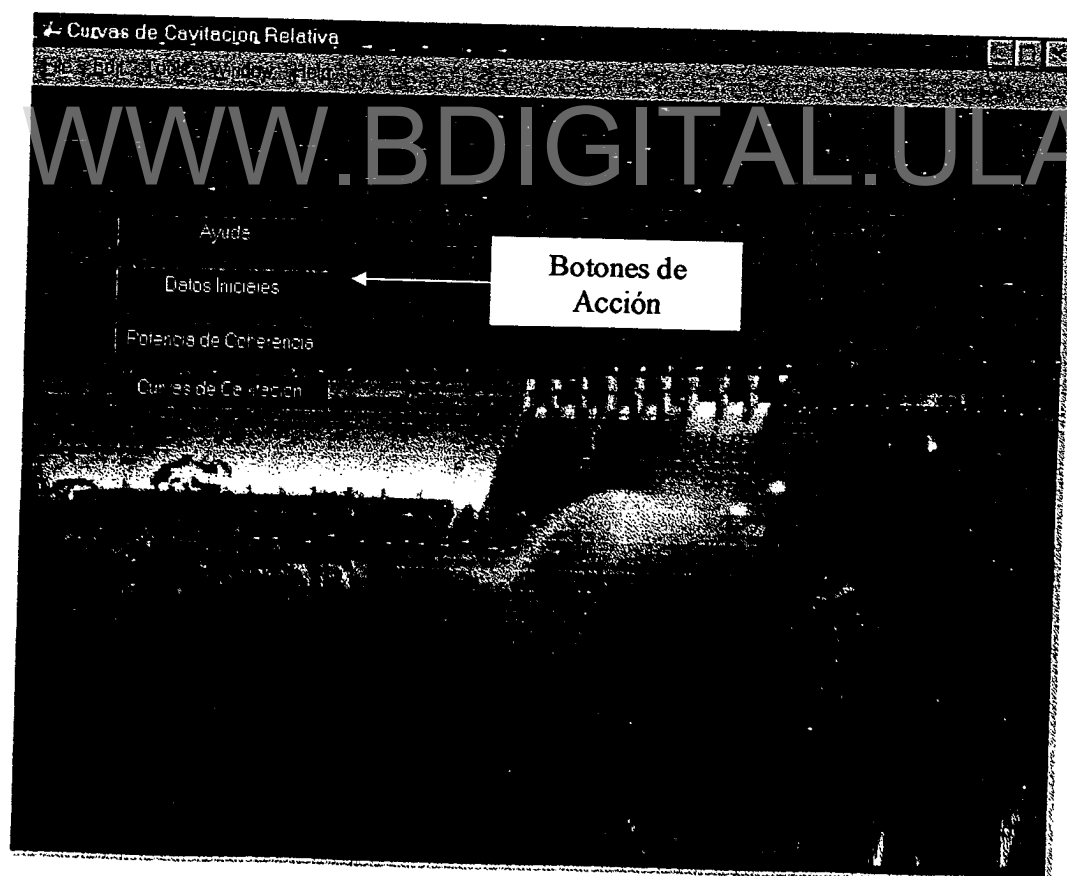


Fig. 3.3. Pantalla principal de DEVICA2003.

3.1. Ayuda

Este módulo es un enlace a la ayuda del programa. Al presionar este botón se despliega un archivo en formato pdf (apéndice 1) que contiene toda la información referente a requerimientos de hardware y software, instalación y manejo del programa, consideraciones para el registro de las señales, bases teóricas del método (recolección de datos y tratamiento), botones de acción, módulos y resultados a obtener.

3.2 Datos Iniciales

Este módulo del programa sirve para cargar una serie de datos que el software necesita para desarrollar el algoritmo (Fig.3.4). A continuación se describen cada una de las series de datos que pide el programa.

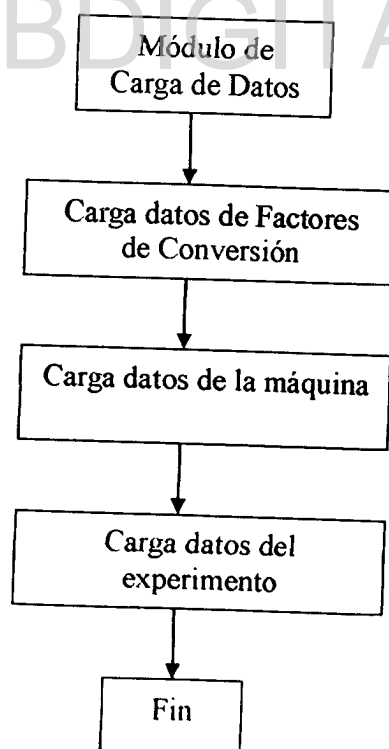


Fig.3.4. Flujograma del módulo de carga de datos

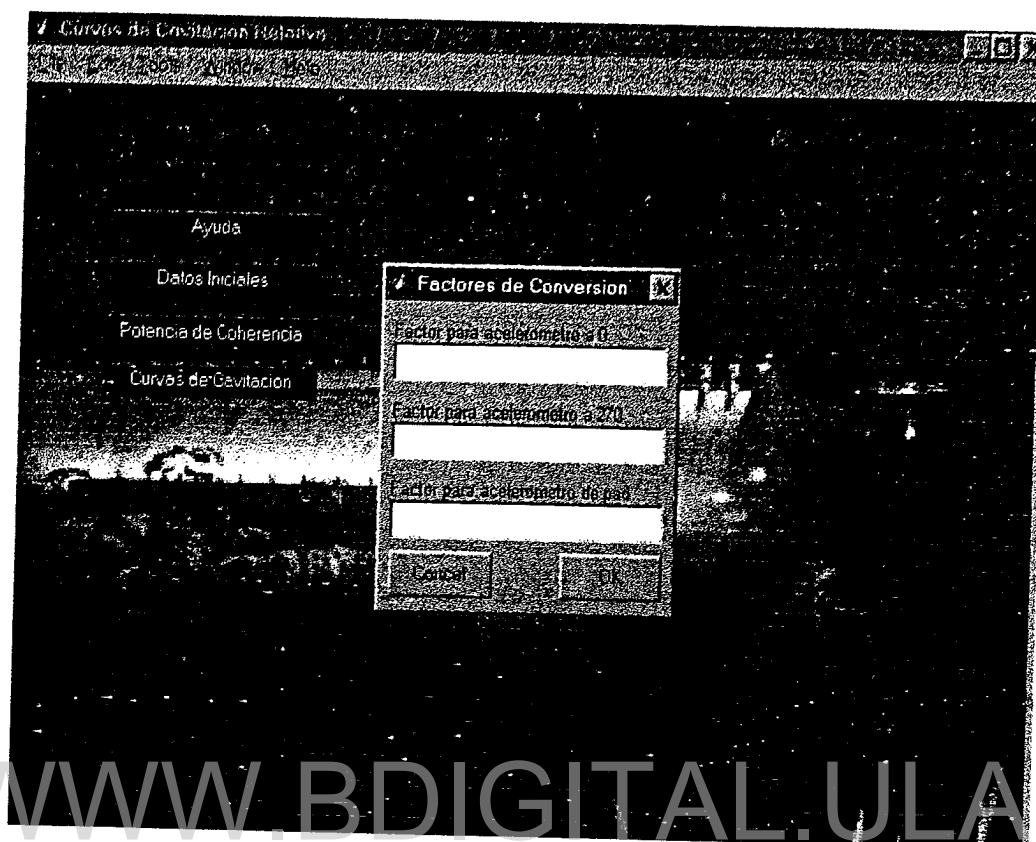


Fig. 3.5. Datos iniciales, factores de conversión

A. Factores de Conversión

Estos campos están destinados a incorporar los factores que permiten hacer la conversión de las señales (Fig.3.5). Estos factores se obtienen a partir de la transformación de las unidades, programadas en el amplificador – acondicionador, al establecer la ganancia de cada señal a $(\text{m}/\text{sg}^2)/\text{mV}$. Si por ejemplo se establece una ganancia de 100 mv/g en el amplificador entonces:

$$100 \text{ mv/g} \rightarrow 0,01\text{g/mv}$$

$$g_{\text{Guri}} = 9.7809 (\text{m}/\text{sg}^2)/\text{g}$$

$$\text{Factor de Conversión} = 0.097809$$

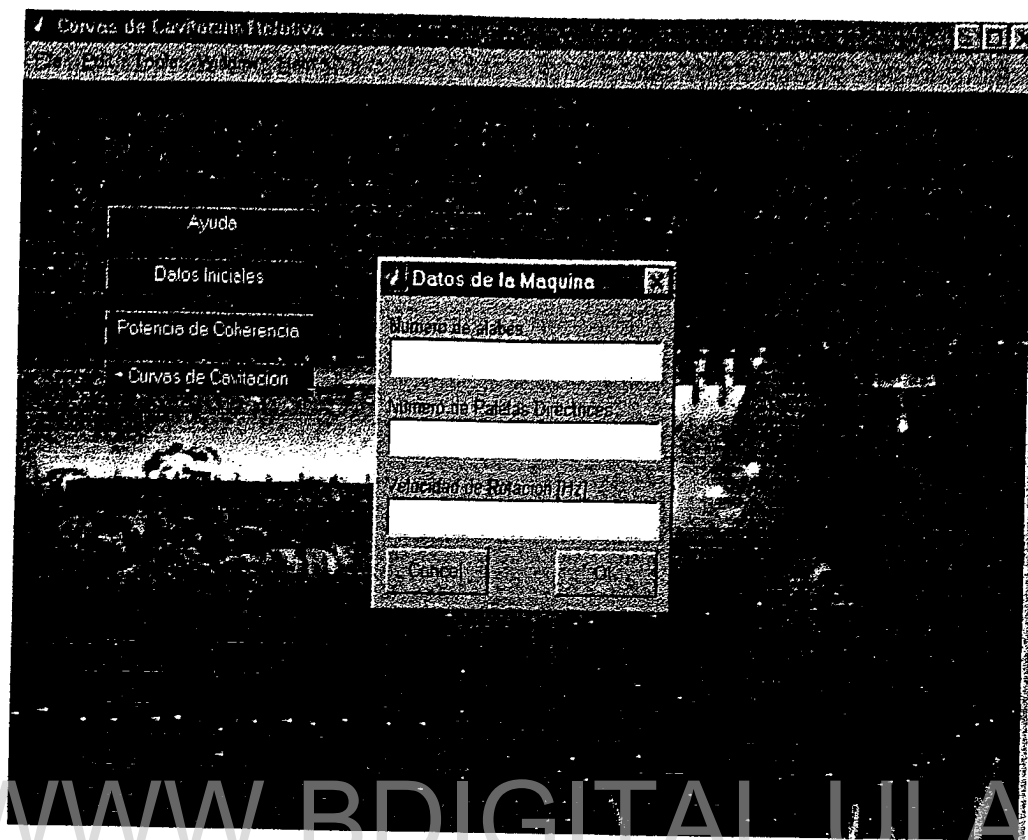


Fig. 3.6. Datos iniciales, datos de la máquina

B. Datos de la máquina

Esta sección es para incluir las características de la máquina referentes a número de álabes, cantidad de paletas directrices y velocidad nominal de rotación en rpm (Fig.3.6).

C. Datos del experimento

En esta sección (Fig. 3.7) se cargan algunos datos referentes a la prueba que se está procesando. Esta información incluye la frecuencia a la que se muestrea en el registrador, los valores que caracterizan cada condición de operación separados por un espacio en blanco (Ejemplo: 60 70 75 80 85 90 95 100 95 90 85 80 75 70 60, en caso de ser por apertura de paleta ó 230 240 250 270 280 290 310 320 340 360 360 340 310 280 240 si es el caso para una prueba hecha con control de potencia). Por último se declara en que unidades vienen los datos anteriormente introducidos para las condiciones de operación estas pueden venir en % de apertura de paletas, MW, mm de recorrido del servomotor, etc.

Licencia Creative Commons:

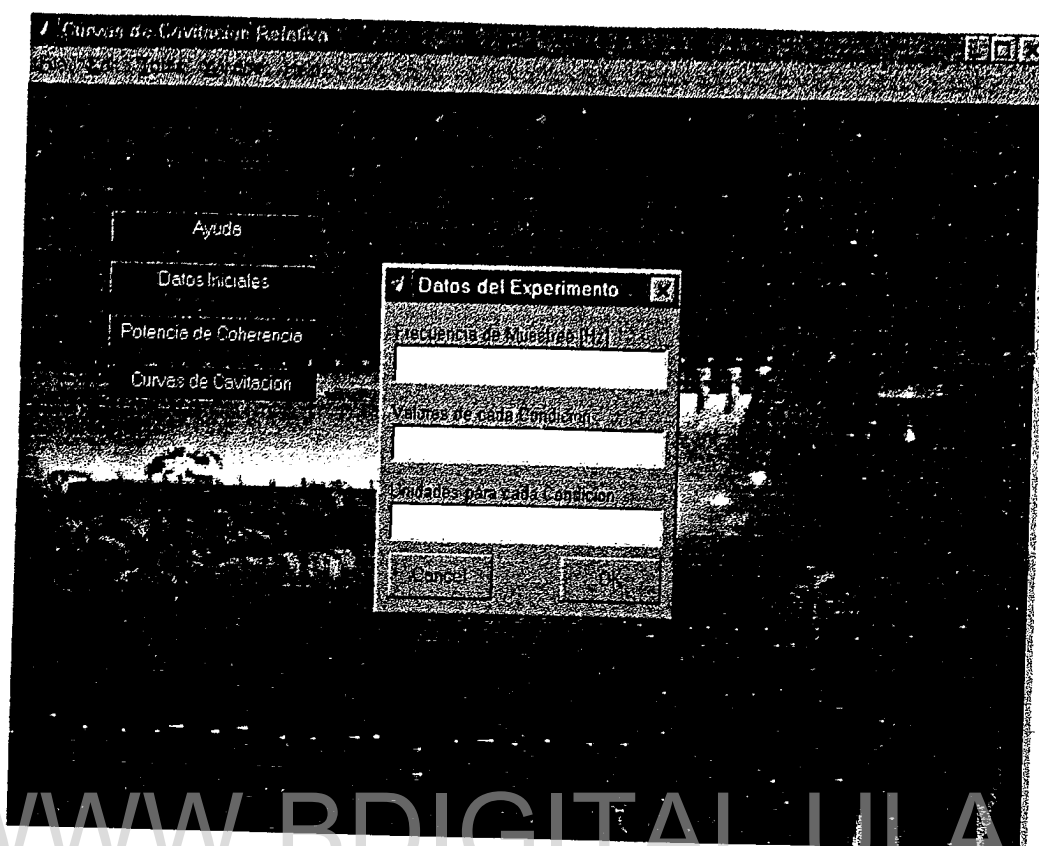


Fig.3.7. Datos iniciales, datos del experimento.

3.3 Potencia de Coherencia

Este módulo fue desarrollado para obtener todas las gráficas (por condición de operación), necesarias para poder evaluar los armónicos que va a definir la curva de cavitación. Por lo tanto este módulo debe cargarse para todas y cada una de las condiciones de operación o puntos de prueba establecidos.

Es en este sector donde se realiza todo el tratamiento matemático fuerte de las señales. A continuación se describe el flujograma (Fig. 3.8) que sigue el algoritmo y la forma en que utiliza las herramientas matemáticas del método:

A. Filtro Butterworth

Para cada registro es necesario obtener la envolvente de la señal temporal, que se encuentra en la banda de 15 a 25 kHz. Con la finalidad de establecer un compromiso entre selectividad y complejidad, se parametrizó un Filtro Butterworth de orden 10, con condición de filtrado para discriminar la banda de 15 a 25 kHz.

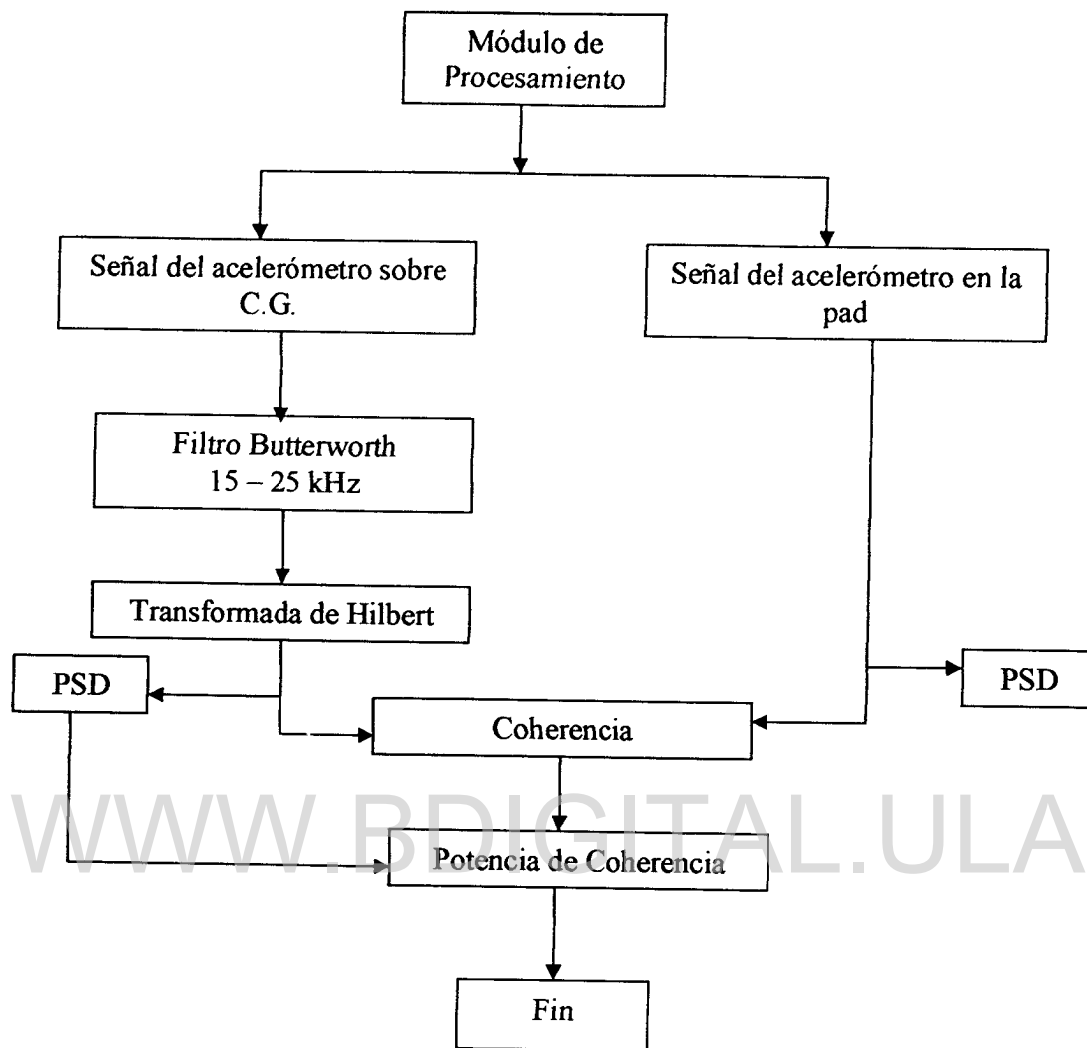


Fig.3.8. Flujograma del módulo de procesamiento.

B. Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert es usada en este caso para obtener la envolvente de la señal previamente filtrada, considerándola producto de un corrimiento en la frecuencia debido a la portadora constituida por la señal de cavitación. Bajo estas consideraciones de tipo analítico, se procede a recuperar la información de la envolvente de la señal en la banda seleccionada, cuyo espectro presenta el mismo ancho de banda partiendo de 0 Hz.

C. Densidad espectral de potencia

La densidad espectral de potencia (PSD por sus siglas en inglés), permite realizar un estudio espectral donde se presentan los valores de energía de la señal tratada y se obtiene,

elevando al cuadrado el módulo de la transformada de fourier de la señal temporal (Ec. x). Para la programación del software se utiliza el periodograma de Welch como método para estimar la densidad espectral de potencia, graficando sus valores en unidades de energía $[(m/s^2)^2]$ por órdenes de rotación. De esta manera se aplica la mejora alcanzada en el diseño del sistema.

$$PSD = |F(X_{(t)})|^2 \quad (x)$$

E. Función de coherencia

Esta herramienta, conocida también como correlación cruzada normalizada cuadrática, toma las señales en el dominio de tiempo y permite hacer una comparación en el dominio de la frecuencia para evaluar el grado de dependencia lineal existente entre ambas, su valor proviene de una normalización por lo que no tiene unidades y sus valores oscilan entre 0 y 1. Siendo 1 el valor que indica la mayor correspondencia lineal y 0 ninguna relación. La comparación se realiza entre las envolventes de las señales filtradas de los acelerómetros montados en el cojinete guía y la baja frecuencia de la señal proveniente de la paleta directriz, ya que ésta última es la que porta la información de las pulsaciones de presión que gobiernan la formación y colapsos de las cavidades de vapor, de manera que se obtienen dos gráficas:

- Función de coherencia entre señal a 0° y la señal de referencia (paleta directriz).
- Función de coherencia entre señal a 270° y la señal de referencia.

Estas gráficas van a mostrar picos en aquellos lugares donde ambas señales son similares de ahí que se pueda determinar que frecuencias están gobernando el fenómeno de cavitación dentro de la máquina.

F. Potencia de coherencia

Esta aplicación de la función de coherencia, permite establecer el aporte que hace la señal del cojinete guía a la coherencia anteriormente calculada, se obtiene a partir de la multiplicación de la función de coherencia por la densidad espectral de potencia de la señal del cojinete guía.

Licencia Creative Commons:

Una vez que se ha realizado la carga de los datos y el procesamiento de este módulo, el programa presenta sus primeros resultados. La primera figura (Fig.3.10 y 3.11) tiene las gráficas correspondientes a la potencia de coherencia tanto a 0 como a 270 grados, las cuales se estudian para obtener el código que va a generar la curva de cavitación relativa. La segunda figura (Fig. 3.9) que aparece es la correspondiente al informe técnico que se elabora en cada estudio, en esta figura se encuentran las siguientes gráficas:

- Coherencia a 0°.
- Potencia de Coherencia a 0°.
- PSD a 0°.
- PSD de Referencia (pad).
- PSD a 0°.
- Potencia de Coherencia a 270°.
- Coherencia a 270°.

Luego de obtener las graficas de potencia de coherencia, tanto a 0° como a 270°, se procede a estudiar su comportamiento para descifrar cuales armónicos son los que poseen la información referente a la cavitación. A continuación se describe un ejemplo del estudio de las gráficas y de la obtención del código de programación.

El código es la forma de indicarle al programa que valores de amplitud de densidad espectral de potencia debe promediar para obtener los niveles de energía para cada punto de prueba. Con el código se determina qué armónicos son los que verdaderamente están gobernando la formación e implosión de cavidades de vapor en el flujo.

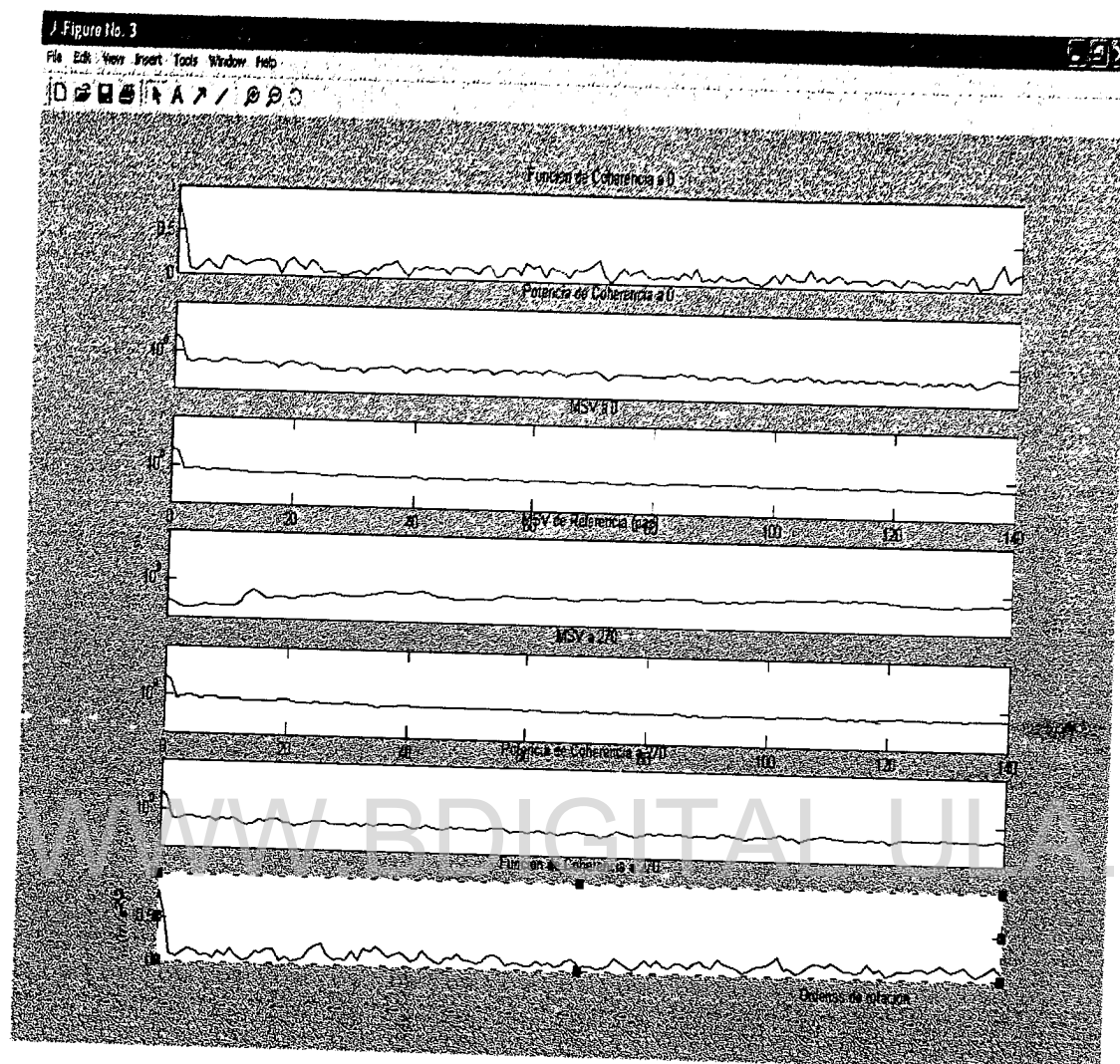


Fig. 3.9. Gráficas para informe técnico

La obtención del código se hace a partir del estudio de las gráficas de potencia de coherencia (Fig. 3.10). Para ello es necesario establecer un criterio que permita decidir que armónicos hay que tomar en cuenta y con cuantas bandas laterales:

Las gráficas de potencia de coherencia vienen en órdenes de rotación por valores de energía $[(m/sg^2)^2]$. Una orden de rotación equivale a la velocidad nominal de rotación de la máquina en Hz.

- Primero se debe conocer la cantidad de álabes y paletas directrices que tiene la máquina, ya que este es el dato que se toma como referencia para leer las curvas. Se resaltan los armónicos correspondientes al número de álabes y de paletas. Por

ejemplo, para la máquina 16 de casa de máquinas II de Planta se tienen 15 álabes y 20 paletas directrices, por lo que en la Fig. 10 aparecen resaltados estos armónicos.

- Luego se observan los picos cercanos a estos armónicos, dentro del intervalo comprendido entre 0 y el cuarto o quinto múltiplo de la cantidad de álabes, y se resaltan tomando nota de la condición de operación correspondiente a cada pico. Si existe más de un pico alrededor de un armónico se debe tomar en cuenta el mayor en amplitud. En la Fig. 3.11 se pueden apreciar los picos del ejemplo resaltados.
- Para definir el código se utiliza la siguiente nomenclatura: P (del francés *Pallier*) corresponde a la cantidad de armónicos de álabes, b la cantidad de bandas laterales incluyendo el armónico, D (del francés *Directrice*) es la cantidad de armónicos de paletas directrices y b las bandas laterales incluyendo el armónico. En el ejemplo se puede extraer el código P3b2D3b3, es decir que se van a tomar en cuenta los valores correspondientes los tres primeros armónicos de álabes, es decir 15, 30 y 45 con 2 bandas laterales por arriba y por debajo incluyendo el mismo, por ejemplo para el primer armónico 14, 15 y 16; de igual manera se tomarán los tres primeros armónicos de paletas directrices esto es 20, 40 y 60 con tres bandas laterales, por ejemplo para el primer armónico 18, 19 20, 21 y 22. De manera tal, que con este código se tomarán en cuenta los valores de amplitud de las siguientes órdenes de rotación: 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 29, 30, 31, 38, 39, 40, 42, 42, 44, 45, 46, 58, 59, 60, 61 y 62.

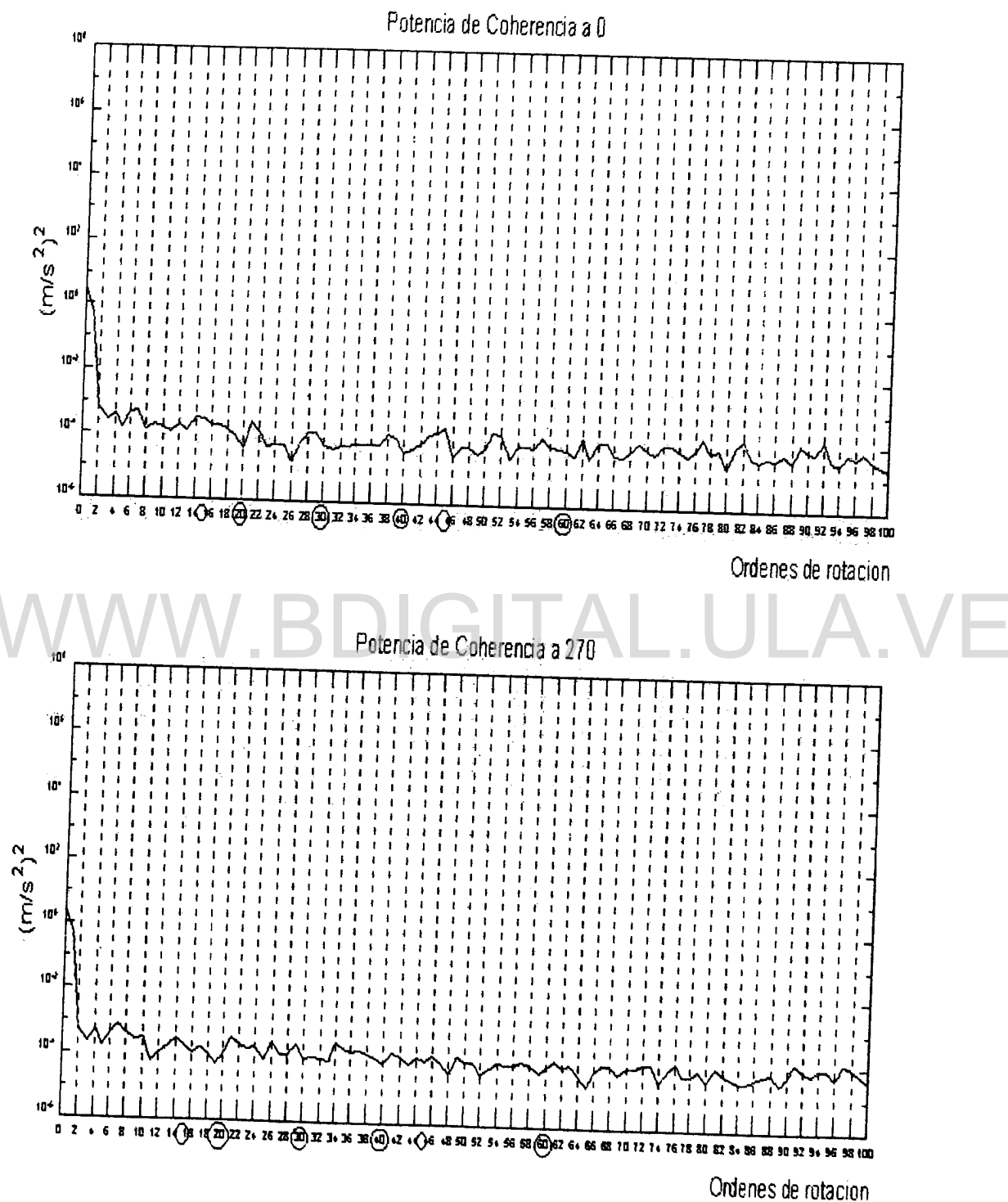


Fig. 3.10. Armónicos de álabes y paletas resaltados para un máquina con 15 álabes y 20 paletas.

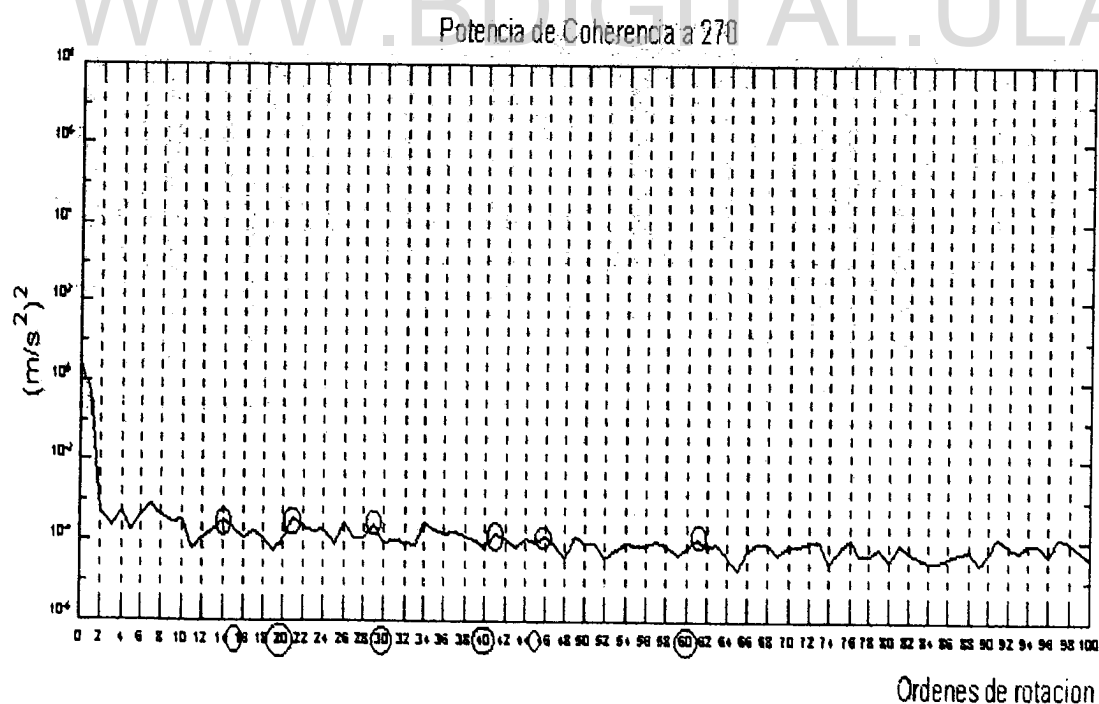
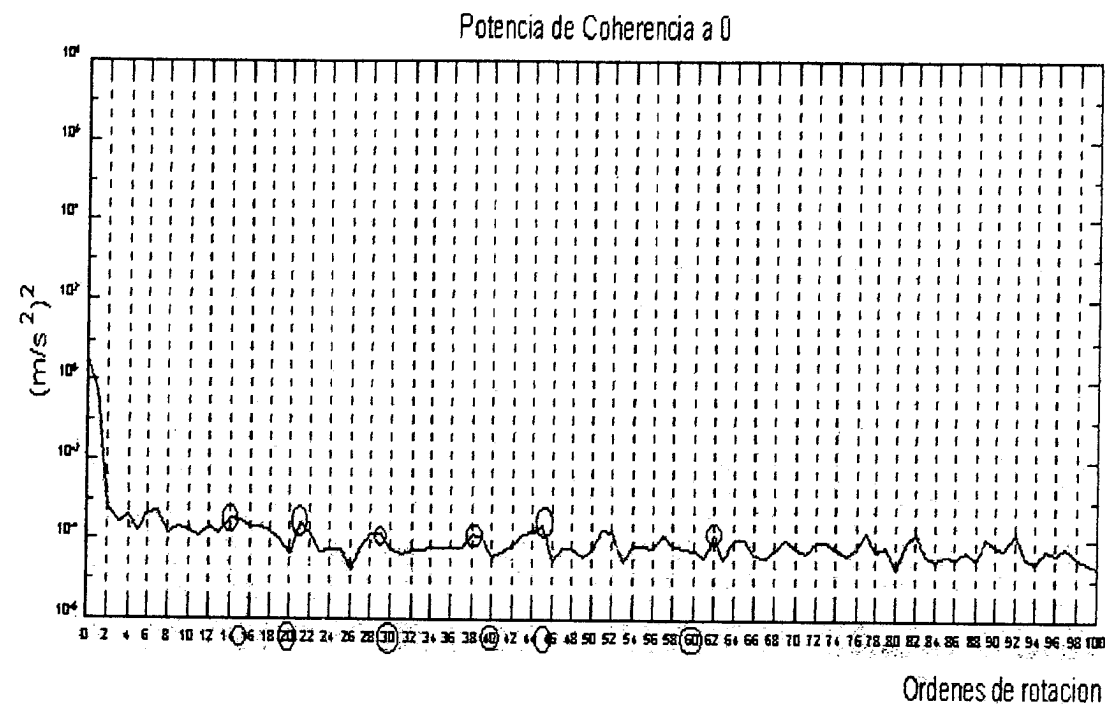


Fig. 3.11. Picos resaltados para el ejemplo anterior.

- Para cada gráfica correspondiente a un punto de prueba, se obtiene un código. Al final se decide cual es la combinación de armónicos y bandas laterales que incluya todos los códigos establecidos a lo largo de la prueba, definiendo así, uno solo para una máquina específica, bajo ciertas condiciones dadas.
- Luego el programa extrae los valores de amplitud correspondientes a los armónicos determinados, en cada punto de prueba, y los promedia. En caso de repetirse algún orden de rotación debido a la cantidad de alabes y paletas presentes, solo se incluirá una sola vez en el promedio realizado. De esta manera se obtiene un punto para cada condición de operación con los cuales se construye la curva de cavitación.

3.4 Curvas de Cavitación

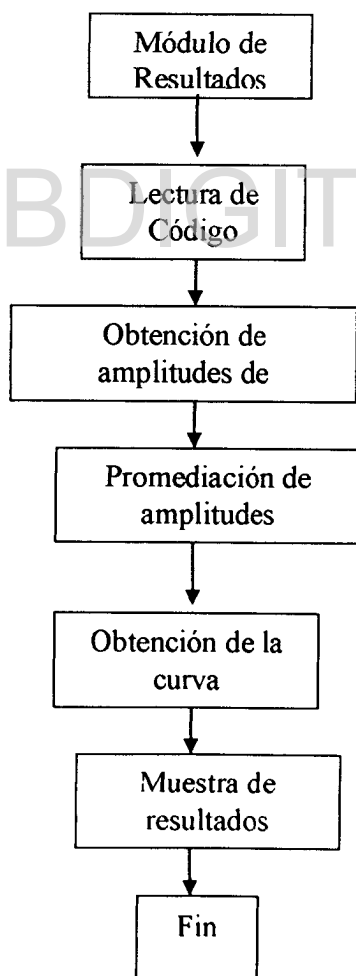


Fig.3.12. Flujograma del módulo de resultados

Una vez procesadas todas las condiciones de operación o puntos de prueba y luego de haber obtenido un código resultante, se procede a obtener las curvas de cavitación relativa, las cuales representan el resultado final del software (Fig. 3.12). Para ello se presiona el botón “Curvas de Cavitación”, inmediatamente aparece un cuadro de diálogo (Fig. 3.3), donde se piden los datos correspondientes al código que se va a utilizar en él. En el ejemplo mostrado se introdujo el código P2b3D3b4.

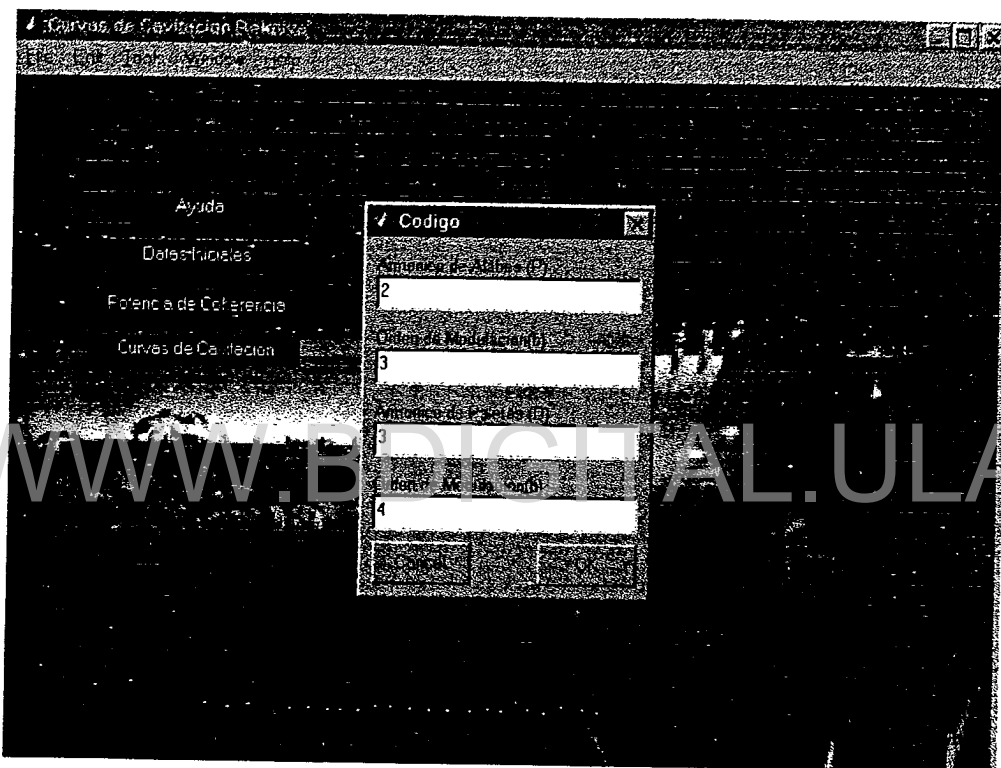


Fig. 3.13. Pantalla al presionar el botón Código

Finalmente DEVICA2003, extrae las amplitudes de densidad espectral de potencia resultantes, correspondientes a los armónicos establecidos con sus bandas laterales, los promedia y obtiene un valor de energía para cada punto de prueba, de esta forma el programa arroja las curvas de cavitación relativa tanto para el acelerómetro a 0° como para el de 270° (Fig. 3.14). En estas gráficas finales se establece la relación entre la condición de operación y los niveles de energía presentes en la máquina para ese punto de prueba, de esta forma se puede determinar el comportamiento de la cavitación dentro de la máquina.

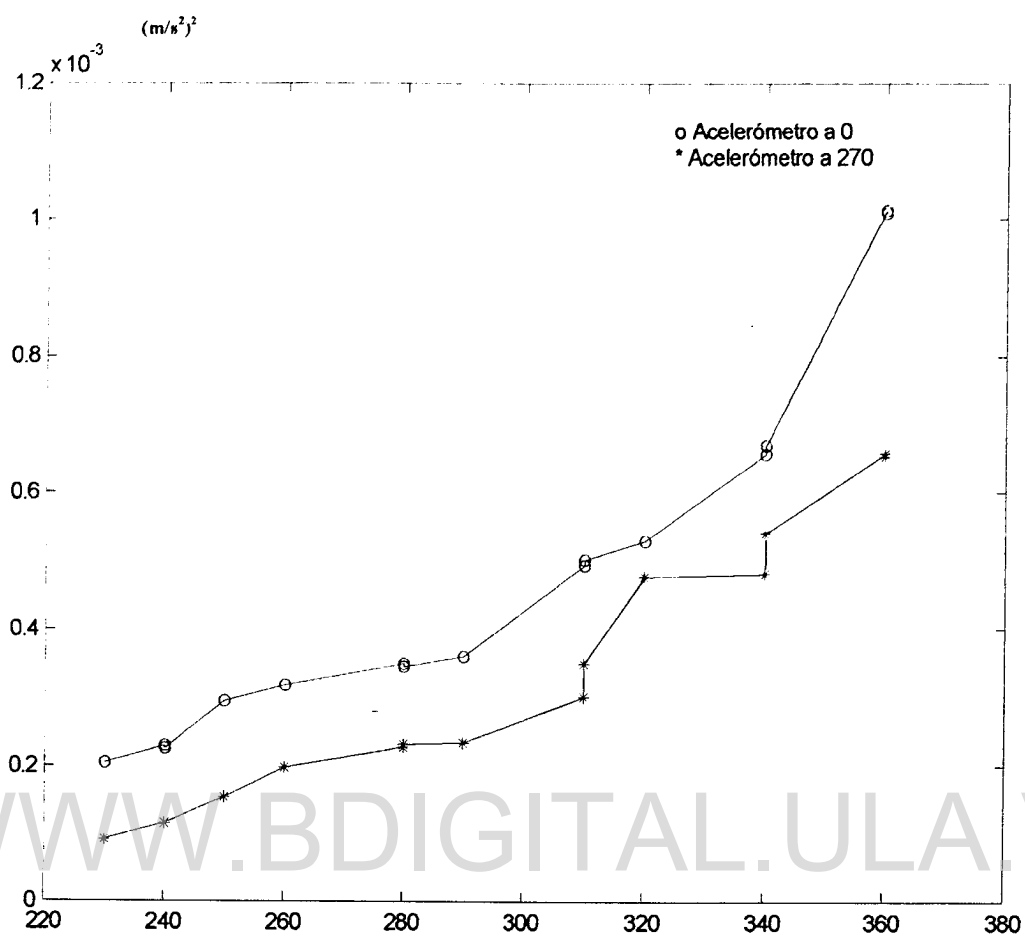


Fig. 3.14. Curva de cavitación relativa para 0° y 270°.

Capítulo IV: Validación del Sistema

Tal como se demostró en el capítulo anterior, el sistema diseñado parte de la optimización del método de detección vibratoria. Estas mejoras tienen que ver principalmente con la disminución de los requerimientos de espacio en disco para el registro de las señales y el aumento de la precisión del paso de discretización en la frecuencia. Sin embargo, se hace necesaria la validación del sistema para poder contar con resultados confiables a la hora de realizar el estudio en investigaciones posteriores. Esta validación se hizo mediante la comparación de las gráficas de cavitación que obtiene el sistema diseñado con aquellas arrojadas por el software CAVIMAX® desarrollado por la empresa canadiense Hydro-Québec y que se basa en el método de detección vibratoria de cavitación desarrollado por Bourdon (2000). Estas curvas de cavitación son los resultados de la campaña de medición realizada por Hydro-Québec en el año 2000 y que establecen el comportamiento del fenómeno en las unidades de las casas de máquinas de las plantas de Guri y Macagua (Bourdon y Lavigne, 2000). Para ello se hicieron pruebas en las unidades 10 y 16 de Planta Guri, ya que estas habían sido previamente estudiadas en dicha campaña de medición y se poseen los datos necesarios para hacer la comparación de los resultados y la correspondiente validación. En los próximos apartados se describirán la puesta a punto de las pruebas, su ejecución, resultados y la posterior validación.

1. Pruebas de Cavitación

Para comprobar la veracidad de los resultados que se obtienen con el sistema diseñado se procedió a elaborar un protocolo de pruebas, con la finalidad de establecer un procedimiento para llevar a cabo pruebas de cavitación estándares bajo los criterios del sistema. El protocolo toma en cuenta las consideraciones hechas para la optimización del método así como la disponibilidad de materiales y equipos para la realización de los experimentos, por lo que se adapta a las necesidades de la investigación. A continuación se describen los instrumentos que se utilizaron para la realización de las pruebas, cuyos resultados se muestran en los apartados 2 y 3 de este capítulo, su instalación y la ejecución de la prueba.

Licencia Creative Commons:

Atribución-No Comercial-Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

1.1 Instrumentación y equipos

- 3 acelerómetros piezoeléctricos Endevco 7259-A-25, respuesta de frecuencia 50 kHz, ancho de banda de respuesta plana 10 Hz – 30 kHz.
- 3 cables para acelerómetros tipo Microdot.
- Registrador – Analizador digital Yokogawa AR4400, con resolución de 16 bit, convertidores A/D y filtros antialiasing de alto desempeño.
- Osciloscopio digital Yokogawa.
- Calibrador de acelerómetros.
- 4 Cables coaxiales de 15 mts.
- 6 cables coaxiales de 1,5 mts.
- Puntas BNC.
- Bases para los acelerómetros, fijación con pegamento.
- Amplificador – Acondicionador Nexus B & K 2693A104, 4 canales.
- Computador portátil.

1.2 Montaje de los acelerómetros

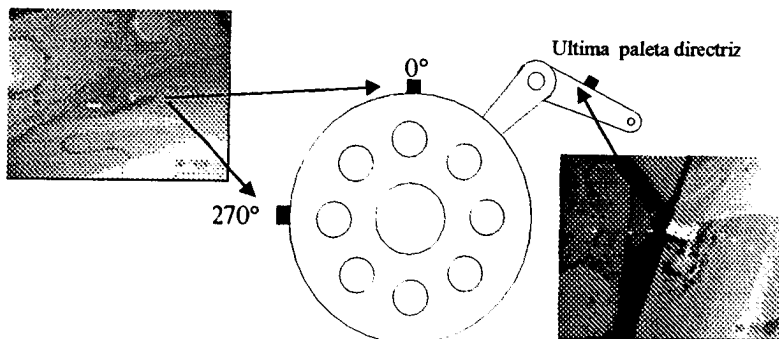


Fig. 4.1. Ubicación de los acelerómetros en el cojinete guía y la última paleta directriz

La instalación y montaje de los acelerómetros se debe realizar tal como se muestra en la Fig. 4.1:

- Radialmente sobre la cubierta del cojinete guía de la turbina en posición aguas arriba ó 0°.

- Radialmente sobre la cubierta del cojinete guía de la turbina a 270° del anterior, mirando la cubierta desde el generador, girando en sentido horario.
- Horizontalmente sobre el brazo de la última paleta directriz de la caja espiral.

1.3 Instalación

- Se requiere la unidad parada, frenos y tuercas de seguridad de los servomotores aplicadas.
- Instalación de dos (2) acelerómetros Isotron de alta frecuencia en el cojinete guía de la turbina.
- Instalación de un (1) acelerómetro Isotron de alta frecuencia en el brazo de la última paleta directriz.
- Instalación del acondicionador-amplificador Nexus multicanal y el registrador digital de señales Yokogawa AR-4400 (Fig. 4.2).
- Se estima un tiempo para la instalación y configuración de los sensores y equipos de adquisición de cinco (5) horas.

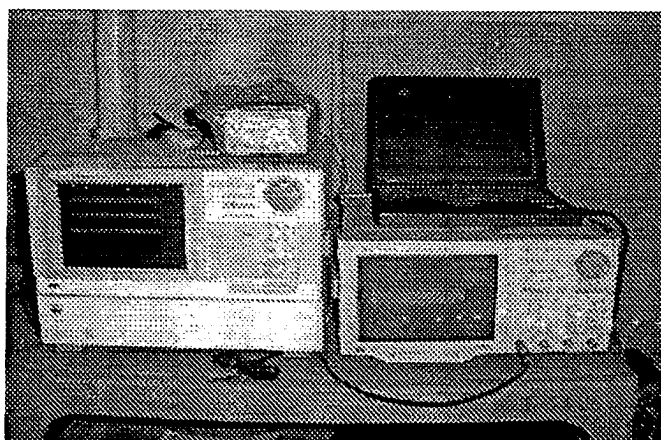


Fig. 4.2. Montaje de equipos para la prueba de cavitación.

1.4 Ejecución de la prueba (registros)

- Arrancar la unidad, sincronizarla y llevarla al 100% de apertura de paletas directrices según la regla del servomotor de apertura o a la máxima potencia, según sea el caso. La condición se establece bajo el control manual del gobernador con el

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

limitador de apertura o desde el cuarto de control de la planta. Esto se hace para establecer los parámetros del equipo amplificador y el registrador, principalmente la ganancia de manera tal que en el desarrollo de la prueba no se saturen los canales.

- Esperar cinco minutos para la estabilización hidráulica de la máquina, se tomarán tres (3) registros de 5 segundos con intervalos de 1 segundo a una frecuencia de muestreo de 100 kHz. El almacenamiento de la data en el computador portátil se realizará antes de seguir a la próxima condición de operación.
- Luego llevar la máquina al 60% (este valor mínimo va venir limitado por el departamento de producción de la planta) de apertura de paletas y seguidamente a 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 95, 85, 75 y 65%, es decir desde el mínimo hasta el máximo valor permitido de cinco en cinco para poder obtener una buena resolución de la curva, con los valores intermedios repetidos para observar posibles comportamientos anómalos. En cada paso se tomarán registros de los sensores instalados. En caso de hacer la prueba bajo el control de potencia se deben calcular los valores aproximados de potencia que asemejen las condiciones anteriormente descritas.
- Se estima que cada paso puede durar cerca de 20 a 25 minutos, lo que indica que la unidad estará bajo prueba cerca de cinco (5) horas.

2. Prueba en Unidad 10 de Casa de Maquinas I de Planta Guri.

2.1 Datos de la Prueba

La prueba se realizó el 01/08/2003 en las instalaciones de casa de máquinas I de Planta Guri. Esta máquina tiene 24 paletas directrices y 16 álabes en el rodete y su velocidad de rotación es de 128,6 rpm. Debido a que esta máquina está limitada en potencia de salida por el generador, los puntos de prueba fueron escogidos en relación con los valores de potencia de salida máxima (360 MW) y mínima (230 MW) correspondientes al rango de operación de la máquina. Los niveles del embalse aguas arriba y aguas abajo se obtuvieron del cuarto de control con un valor de caída máximo de 131,69 m y promedio de 130,87 m, los valores de potencia de salida utilizados como puntos de prueba en las gráficas de cavitación también fueron aportados por el cuarto de control. Los sensores en el cojinete guía fueron montados en dirección radial sobre la pared del cojinete y a unos 10 centímetros sobre el

asiento de la estructura. Los puntos de prueba utilizados fueron los correspondientes a las siguientes potencias de salida (MW): 230, 240, 250, 270, 280, 290, 310, 320, 340, 360, 360, 340, 310, 280 y 240; en este caso no se pudo comenzar la prueba desde el máximo valor por disposiciones del cuarto de control de la planta. En la Tabla 4.1 se muestran los demás datos de esta prueba.

2.2 Resultados de la prueba

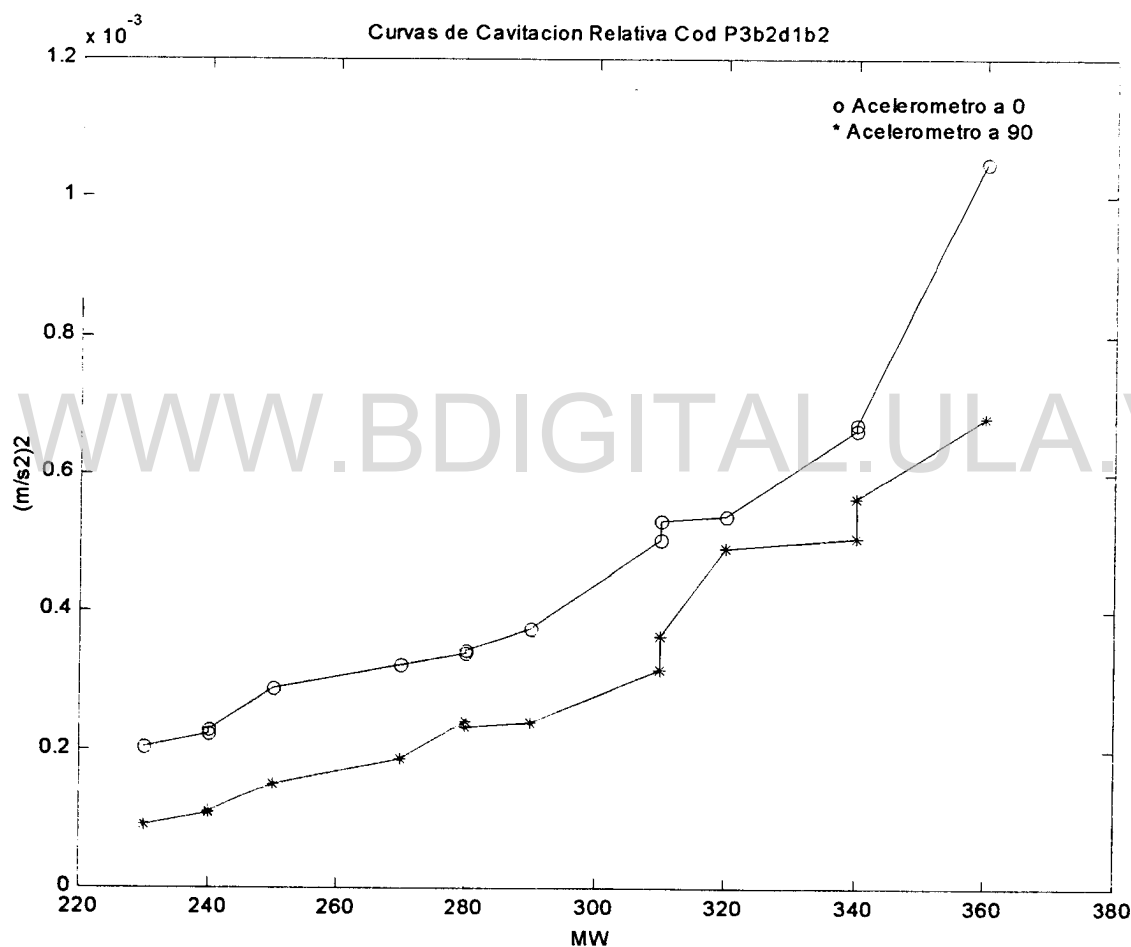


Fig. 4.3. Curvas relativas de cavitación de la unidad 10 obtenidas por DEVICA2003

Para descifrar el carácter periódico del fenómeno dentro de la máquina, se obtuvo el siguiente código P3b2D1b2, es decir que se están tomando en cuenta las siguientes órdenes de rotación 15, 16, 17, 23, 24, 25, 31, 32, 33, 47, 48 y 49, sus amplitudes se promedian y se obtiene un valor de energía $[(m/s^2)^2]$ para cada punto de prueba tanto para el acelerómetro montado a 0° como para el colocado a 270° , de manera que al graficar todas las condiciones

de operación se obtienen dos (2) curvas de cavitación para esta máquina en específico (Fig. 4.3). El comportamiento mostrado por ambas curvas se presenta muy constante en el intervalo comprendido entre 230 MW y 310 MW, a partir de este punto se presentan incrementos muy abruptos en los niveles de energía, por lo que 310 MW representa el límite superior del intervalo de funcionamiento seguro para esta máquina desde el punto de vista de cavitación. Además se aprecia que el nivel máximo es el correspondiente a 360 MW y el mínimo se encuentra a 230 MW. Por lo tanto, el rango operativo donde se presenta los niveles de cavitación aceptables está comprendido entre los 230 y 310 MW, de manera tal que se recomienda trabajar la unidad en este rango de potencia siempre y cuando no existan otros factores que interfieran en su funcionamiento.

3 Prueba de cavitación unidad 16 de Casa de Maquinas II de Planta Guri

3.1. Datos de la prueba

La prueba se realizó el 17/10/2003 en las instalaciones de casa de máquinas II de Planta Guri. Esta máquina tiene 20 paletas directrices y 15 álabes en el rodete y su velocidad de rotación es de 112,5 rpm. Los puntos de prueba fueron escogidos en relación a la carrera del servomotor correspondiente al rango operativo de la máquina. Los resultados de la prueba fueron graficados contra el porcentaje de apertura de paletas leído directamente de la regleta del servomotor en (%). Los niveles del embalse aguas arriba y aguas abajo se obtuvieron del cuarto de control, con un máximo valor de caída 136,79 m y un promedio de 136,36 m. Los sensores en el cojinete guía fueron montados en dirección radial sobre la pared del cojinete y a unos 12 centímetros sobre el asiento de la estructura. Los puntos de prueba utilizados fueron los correspondientes a los siguientes porcentajes de apertura de paletas 99, 60, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 99, 95, 85 y 60; en este caso no se pudo alcanzar el 100 % de apertura de paletas debido a limitaciones en el gobernador de la unidad. Los demás datos se muestran en la Tabla 4.2.

3.2 Resultados de la prueba

El análisis de las graficas de potencia de coherencia estableció el siguiente código para esta máquina P3b3D3b3, de manera tal que se están tomando en cuenta las siguientes ordenes de rotación 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 28, 29, 30, 31, 32, 38, 39, 40, 41,

42, 43, 44, 45, 46, 47, 58, 59, 60, 61 y 62, estas amplitudes promediadas y graficadas generan la curva de cavitación relativa mostrada en la Fig. 4.4. En este sentido, el comportamiento del fenómeno en esta máquina es distinto al mostrado en la máquina anterior, se observa una disminución inicial de los niveles de energía que en el caso del acelerómetro colocado a 0° va hasta 70 % de apertura de paletas, mientras que en la señal del sensor a 270° se prolonga hasta 80%. A partir de 80% se observa un aumento pronunciado de los valores registrados por la señal de 0° , de igual manera se aprecia un aumento en los niveles de la señal a 270° después de 85%. Por lo tanto el intervalo de funcionamiento recomendado es el comprendido entre 60% y 85% de apertura de paletas, siempre y cuando no existan otros factores que incidan en el funcionamiento normal de la máquina en este intervalo.

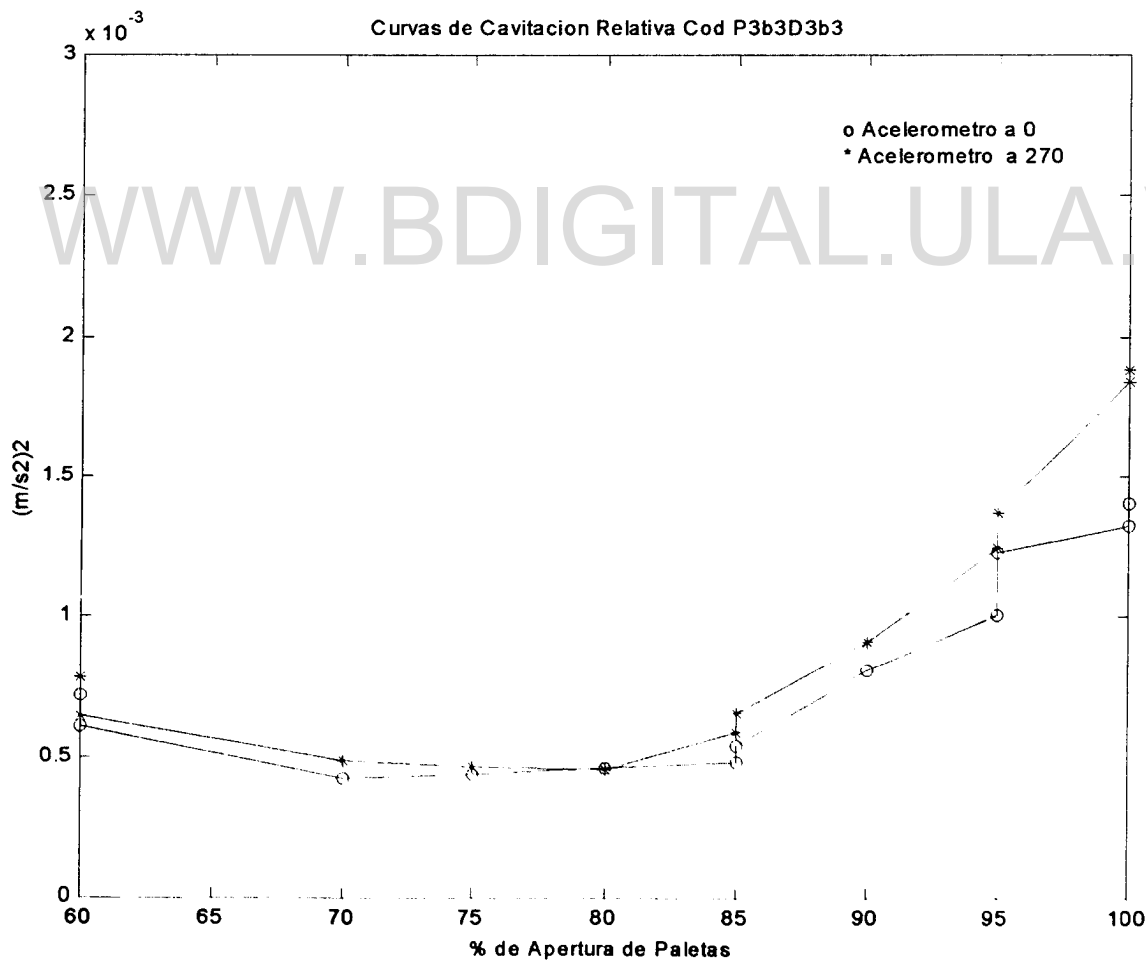


Fig. 4.4. Curvas relativas de cavitación de la unidad 16 obtenidas por DEVICA2003.

Tabla 4.3. Datos de prueba de cavitación Unidad 10 de casa de máquinas I de Planta Guri

Unidad: 10 de casa de máquinas I de Planta Guri.

Fecha: 01/08/2003.

Hora	Código de Prueba	Carrera SM %	Carrera SM [mm]	Potencia [MW]	Notas	Nivel Aguas Arriba [mts]	Nivel Aguas Arriba [mts]	Caída [mts]
11:00	Cond1	0	0	0	Gain = 100 mv/g	255,71	124,41	131,30
13:52	Cond2	59,50	410	230		255,72	124,58	131,14
14:03	Cond3	61,50	422	240		255,72	124,70	131,02
14:21	Cond4	64,50	436	250		255,73	124,83	130,90
14:32	Cond5	69,00	455	270		255,73	124,91	130,82
14:42	Cond6	71,00	466	280		255,73	124,94	130,79
14:53	Cond7	72,00	477	290		255,73	124,97	130,76
15:06	Cond8	78,50	512	310		255,74	124,99	130,75
15:18	Cond9	81,00	530	320		255,74	125,03	130,71
15:30	Cond10	89,50	571	340		255,74	125,04	130,70
15:41	Cond11	98,50	622	360		255,74	125,07	130,67
15:46	Cond12	98,50	622	360		255,74	125,09	130,65
16:23	Cond13	89,50	572	340		255,74	125,10	130,64
16:36	Cond14	79,00	513	310		255,74	125,05	130,69
16:46	Cond15	70,50	473	280		255,74	125,01	130,73
16:59	Cond16	61,70	425	240		255,74	124,05	131,69
Mínima						255,71	124,05	130,64
Máxima						255,74	125,10	131,69
Promedio						255,73	124,86	130,87

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 4.4. Datos de prueba de cavitación Unidad 16 de casa de máquinas II de Planta Guri

Unidad: 16 de casa de máquinas II de Planta Guri

Fecha: 17/10/2003.

Hora	Código de Prueba	Carrera SM %	Carrera SM [mm]	Potencia [MW]	Notas	Nivel Aguas Arriba [mts]	Nivel Aguas Abajo [mts]	Caída [mts]
11:15	Cond1	99	885	660	Gaing=100mV/g	263,33	126,54	136,79
12:15	Cond2	60	581	441		263,33	126,71	136,62
12:35	Cond3	70	658	530		263,33	126,73	136,60
15:20	Cond4	75	696	568		263,32	127,10	136,22
15:05	Cond5	80	733	594		263,32	127,07	136,25
13:20	Cond6	85	777	620		263,33	126,90	136,43
13:35	Cond7	90	820	640		263,32	126,99	136,33
14:07	Cond8	95	857	650		263,32	127,15	136,17
14:19	Cond9	99	885	660		263,32	127,21	136,11
14:36	Cond10	95	857	651		263,32	127,11	136,21
14:54	Cond11	85	773	618		263,32	127,08	136,24
15:32	Cond14	60	681	436		263,33	127,03	136,30
						263,32	126,54	136,11
						263,33	127,21	136,79
						263,32	126,97	136,36

4. Validación de resultados

En el capítulo II se describieron algunos factores que inciden en los niveles de cavitación que se pueden presentar en una turbina hidráulica. Estos parámetros deben ser tomados en cuenta a la hora de comparar los resultados obtenidos en dos pruebas realizadas en la misma máquina pero distanciadas en el tiempo. Entre estos factores el más influyente es la rugosidad de la superficie, ya que los efectos erosivos de la cavitación van a cambiar la superficie y por consiguiente la intensidad de la cavitación tal como lo reportan Caron y col (2002) y Guenoun y col (2003). Por lo tanto, en una máquina cuyo diseño no ha sido modificado, se pueden presentar cambios en la intensidad de la cavitación debido al efecto que causa la rugosidad provocada por el efecto erosivo acumulado de la cavitación. Otro punto a tomar en cuenta a la hora de realizar comparaciones son los valores de amplitud de las gráficas, ya que los métodos de estimación espectral usados por ambos programas difieren en sus parámetros de programación, por lo que estas amplitudes no sirven como punto de comparación en las validaciones, de manera tal que se deben observar las tendencias de las curvas, valores máximos y mínimos, puntos de quiebre y rangos de operación seguros.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se realiza la comparación entre los resultados obtenidos por DEVICA2003 y los arrojados por CAVIMAX® en la campaña de medición realizada en 2000 (Bourdon y Lavigne, 2000), además se establecen las condiciones de embalse para ambas series de prueba.

4.1 Unidad 10

La Tabla 4.3 muestra una comparación entre los niveles que presentaba el embalse para la fecha en que se realizó la prueba por Hydro-Québec y la variación para cuando se hizo la de la presente investigación. Se puede apreciar una diferencia de 16 m entre la caída neta de las pruebas, de manera tal que se hace necesario aumentar el ángulo de apertura de las paletas para alcanzar un mismo valor de potencia de salida, esta modificación del ángulo de ataque del fluido puede afectar los niveles de energía atribuibles a cavitación así como variaciones en los mecanismos erosivos (Li, 2000). Por su parte la diferencia en el nivel de descarga es muy pequeña como para influir directamente en las mediciones.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 4.3. Comparación de los niveles del embalse para ambas pruebas.

Nivel (promedio)	DEVICA2003	CAVIMAX®
Aguas arriba (m)	255,73	271,03
Aguas abajo (m)	124,86	125,00
Caída (m)	130,87	146.03

Si bien las diferencias en las cotas del embalse pueden afectar en cierta manera los valores de las curvas de cavitación, no son el factor determinante del comportamiento del fenómeno. En realidad es el perfil del álabe lo que va a definir la tendencia de la curva de cavitación, por ello el efecto de la erosión en el tiempo y los consiguientes cambios en la rugosidad de la superficie, van a incidir directamente en las variaciones que se presentan a la hora de comparar los resultados de las pruebas. Sin embargo, tal como se puede apreciar en ambas gráficas (Fig. 4.5) y (Fig. 4.6), la tendencia de ambas curvas es muy similar si se toma en cuenta parámetros tales como forma, niveles máximos y mínimos e intervalos de funcionamiento seguros

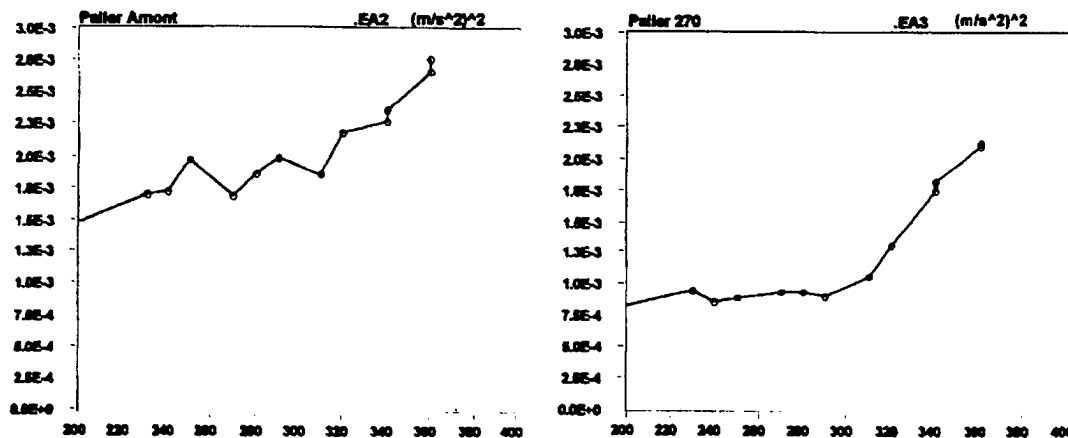


Fig. 4.5. Curvas relativas de cavitación obtenidas por CAVIMAX® para la unidad 10. (Fuente: Bourdon P y Lavigne P, 2000).

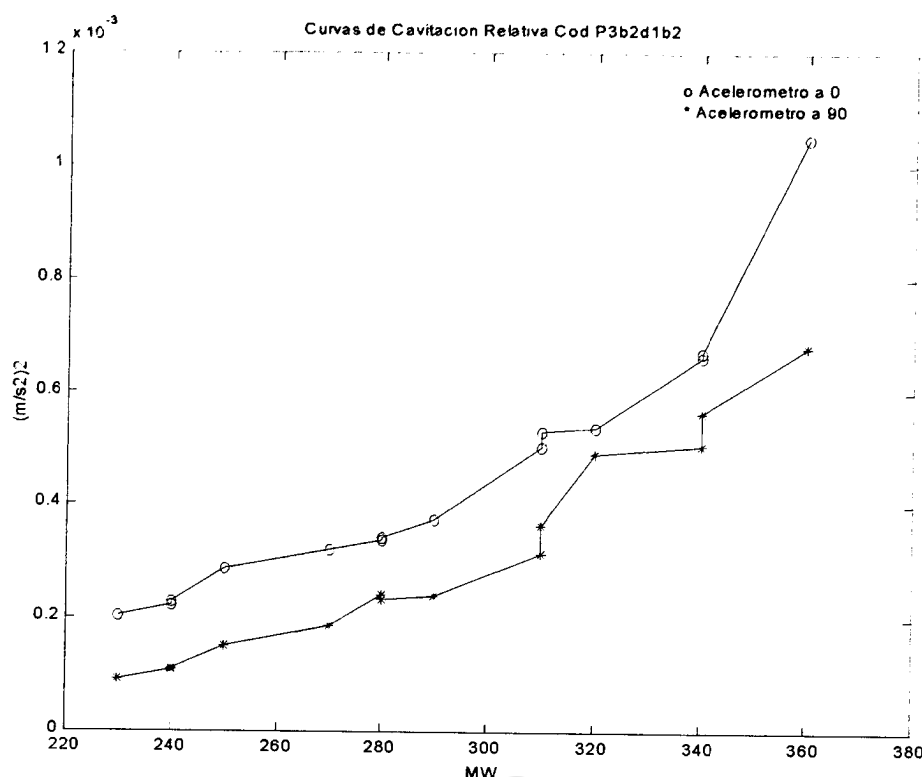


Fig. 4.6. Curvas relativas de cavitación de la unidad 10 obtenidas por DEVICA2003

En este sentido, se puede apreciar que la tendencia de la gráfica resultante de DEVICA2003 (4.6) es muy similar a la obtenida por CAVIMAX (Fig. 4.5). Ambas curvas tienen un comportamiento más o menos estable hasta los 310 MW, a partir de este punto las curvas adquieren pendientes mucho más pronunciadas, siendo este sector el de mayor actividad y alcanzando el mayor nivel de energía en 360 MW. Por su parte, el nivel mínimo se presenta en los 230 MW, constituyendo de esta forma el intervalo de funcionamiento seguro el cual se extiende hasta los 310 MW tal como se estableció en el apartado 2.2 de este capítulo.

De esta manera, se constata los resultados mostrados por Bourdon y Lavigne (2000), y se obtiene una primera validación del sistema.

4.2 Unidad 16

Los valores de la tabla 4.4, muestran una diferencia de 8 m en la caída neta entre las pruebas hechas en esta unidad, la cual es mucho menor que la presentada en la unidad 10. Por su parte la sumergencia sigue presentando cotas similares, ya que es una gran

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

preocupación del cuarto de control de la planta mantener este nivel constante para evitar mayores problemas de cavitación a la salida del álabe en las unidades.

Tabla 4.4. Comparación de los niveles del embalse para las pruebas en las unidades 16.

Nivel (promedio)	DEVICA2003	CAVIMAX®
Aguas arriba (m)	263,32	271,02
Aguas abajo (m)	126,97	127,02
Caída (m)	136,60	144.40

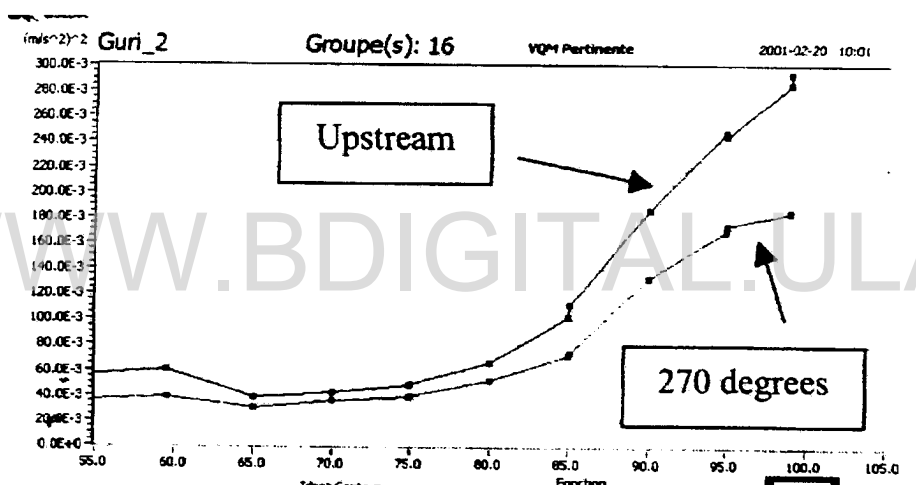


Fig. 4.7. Curvas relativas de cavitación obtenidas por CAVIMAX para la unidad 16. (Fuente: Bourdon P y Lavigne P, 2000)

Por su parte, los resultados obtenidos por Hydro-Québec en 2000 (Fig. 4.7) son bastante similares a los arrojados por DEVICA2003 (Fig. 4.8). En ambos se pueden apreciar tendencias similares en el comportamiento del fenómeno, se comienza con un leve descenso de los niveles, luego una zona de crecimiento constante hasta 85% de apertura de paletas y luego un crecimiento abrupto hasta alcanzar el máximo nivel en el punto de mayor porcentaje de apertura de paletas. Por otro lado, el intervalo de operación considerado como el más apropiado para el funcionamiento de la máquina, se encuentra igualmente entre 60% y 85% de apertura de paletas. Con este experimento se constata una

vez mas los resultados con Hydro-Québec y se obtiene así la segunda validación del sistema diseñado.

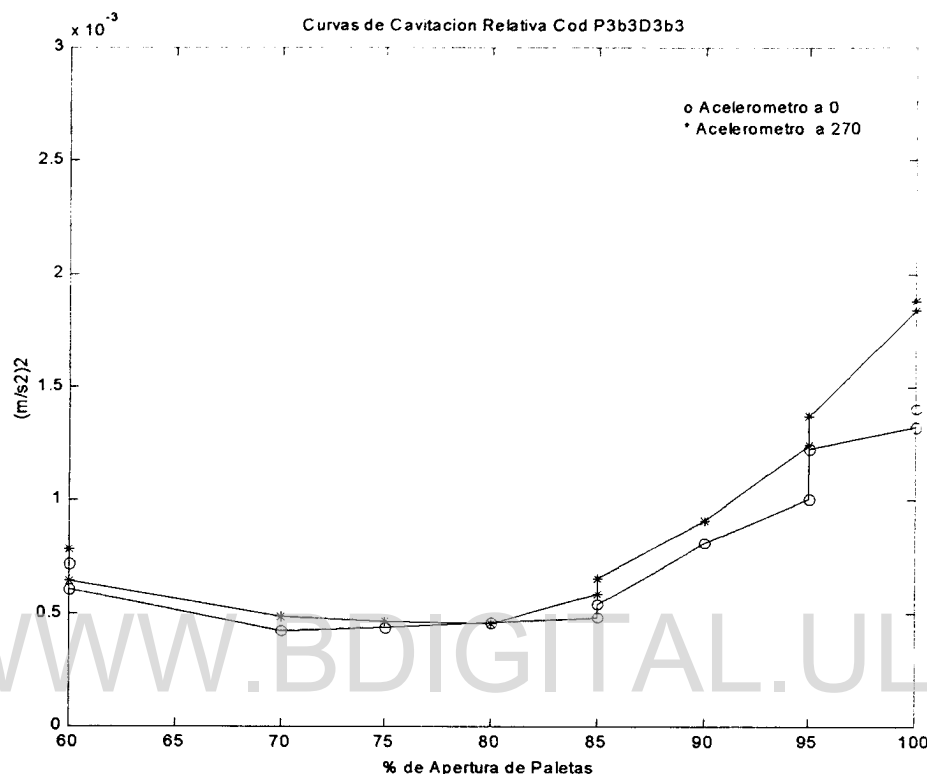


Fig. 4.8. Curvas relativas de cavitación de la unidad 16 obtenidas por DEVICA2003.

Estas validaciones permiten afirmar que el sistema diseñado está en la capacidad de realizar estudios de cavitación relativa en turbinas hidráulicas, con la finalidad de establecer la curva característica de cavitación de la máquina. El estudio se hace más atractivo en el momento en que se incluye como parte de las pruebas de diagnóstico, de aceptación, de contratación, ya que se puede verificar el estado de la máquina, desde el punto de vista de cavitación:

- Cuando se instala por primera vez, para verificar su estado después de dicha instalación.
- Cuando se va a entregar para una reparación mayor o rehabilitación, con la finalidad de programar y diseñar los planes de rehabilitación.
- Cuando ya se han realizado dichas modificaciones, para verificar los beneficios de los planes de rehabilitación y las garantías de los contratistas.

En este orden de ideas, es necesario continuar profundizando esta línea de investigación con la finalidad de desarrollar la detección de erosión causada por el fenómeno, a través de la medición de cavitación absoluta.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

V. Conclusiones

- El sistema para monitorear el fenómeno de cavitación, desarrollado en este trabajo de grado permite observar el comportamiento del mismo con respecto a la condición de operación de la máquina, de manera tal que se convierte en una herramienta a la hora de la toma de decisiones tanto para operaciones como para mantenimiento, ya que permite mejorar los índices de mantenimiento (vida útil de los equipos, tiempo medio entre fallas, disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de la planta, etc) a partir de la operación de las máquinas en intervalos de funcionamiento más seguros.
- El sistema de monitorización de cavitación es una referencia para el diseño e implementación de planes de repotenciación, así como para la verificación de sus resultados y beneficios, ya que detecta los niveles de cavitación que se presentan en la operación de la máquina antes y después de los cambios realizados.
- La mejora incorporada al método reduce en más del 90% la cantidad de datos necesaria para realizar un estudio de cavitación, lo que representa una considerable reducción en tiempo de adquisición y procesamiento de datos, memoria, costos computacionales y los costos que involucra tener una unidad de generación bajo pruebas.
- De igual forma, las mejoras realizadas al método de detección vibratoria incluyen una mayor precisión a la hora de definir los vectores de frecuencia en función de la velocidad de rotación de la máquina, incluyendo solamente los múltiplos del armónico principal.
- Los resultados de las pruebas realizadas en las unidades 10 y 16 de casa de máquinas I y II de Planta Guri, muestran el comportamiento del fenómeno y el rango de operación de la máquina más recomendado para su funcionamiento desde el punto de vista de cavitación, por lo que el sistema se puede considerar una herramienta para la toma de decisiones, tanto en mantenimiento como en producción.
- Debido a que los parámetros de programación de los métodos espectrales usados por el software de referencia y por el sistema diseñado son distintos, las amplitudes que presentan las curvas de cavitación no son punto de comparación para la validación de resultados.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- La validación de los resultados se realiza a partir de la comparación del comportamiento de las curvas, es decir, valores mínimos y máximos, puntos de quiebre, tendencia y rangos seguros de funcionamiento.
- Los resultados obtenidos por el sistema de monitoreo de cavitación reproducen la tendencia del comportamiento de las curvas relativas de cavitación obtenidas por Hydro-Québec en la campaña de medición de 2000, estas comparaciones permiten considerar que el programa DEVICA2003 ha superado la primera etapa de validación. Futuras mediciones en otras unidades tanto Francis como Kaplan permitirán consolidar la metodología propuesta.
- Las diferencias existentes entre pruebas realizadas en una misma máquina, pero distanciadas en el tiempo, tienen que ver principalmente con las modificaciones en la rugosidad y el perfil del álabe causadas por el efecto acumulado de la cavitación. Es por ello que se hace necesario el estudio de este fenómeno en investigaciones posteriores.
- Es necesario realizar investigaciones adicionales orientadas a obtener curvas de cavitación absolutas, donde se pueda relacionar la condición de operación con el desgaste estimado de la estructura del rodete, de manera tal que se obtengan curvas de cavitación absolutas.
- Las nuevas versiones del programa deben estar destinadas a incluir los estudios de cavitación absolutas y módulos de análisis automáticos con la finalidad de obtener herramientas para el mantenimiento predictivo.

Bibliografía

Bajic B, 2003, Methods for vibro-acoustic diagnostic of turbine cavitation, Journal of Hydraulic Research, Vol. 41 No. 1, pp.87 – 96.

Bourdon P, Farhat M, Simoneau R, Pereira F, Dupont P, Avellan F, Dorey J-M, 1996, Cavitation erosion prediction on francis turbines Part 1. Measurements on the prototype, Proceedings of the 18th IAHR Symposium, España.

Bourdon P y Lavigne P, 2000, Cavitation at EDELCA Guri and Macagua Plants, Hydro-Québec, IREQ, Varennes, Canadá.

Bourdon P, 2000, La détection vibratoire de l' érosion de cavitation des turbines Francis, PhD thesis, EPFL, Lausanne, Suiza.

Caron J-F, Farhat M, Avellan F, 2002, Physical investigation of the cavitation phenomenon, Proceedings of FEDSM'02, Canadá.

Carone A, 2002, Desarrollo de un programa en MATLAB para procesamiento de vibraciones de alta frecuencia propias de cavitación en turbinas hidráulicas, Universidad de los Andes, Mérida.

Colmenares C., 2000, Estudio del fenómeno de la cavitación y su influencia sobre las turbinas hidráulicas tipo Francis de Guri en C.V.G. EDELCA. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”. Ciudad Guayana.

Dorey JM, Laperrousaz E, Avellan F, Dupont P, Simoneau R, Bourdon P, 1996, Cavitation erosion prediction on francis turbines. Part 3 Methodologies of prediction, Proceedings of the 18th IAHR Symposium, España.

Dupont P, Caron J-F, Avellan F, Bourdon P, Lavigne P, Farhat M, Simoneau R, Dorey J-M, Archer A, Laperrousaz E, 1996, Cavitation erosion prediction on francis turbines. Part 2 Model test and flow analysis, Proceedings of the 18th IAHR Symposium, España.

Escaler X, Esgusquiza E, Mebaraki T, Avellan F y Farhat M, 2002, Field assessment of cavitation detection methods in hydropower plants, Proceedings of the XXIst IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, Suiza.

Escaler X, Egusquiza E, Mebarki T, Avellan F, Farhat M, 2002, Field assesment of cavitation detection methods in hydropower plants, Proceedings of the XXIst IAHR Symposium, Suiza.

Farhat M, 1994, Contribution à l' étude de l' érosion de cavitation: Mécanismes Hydrodynamiques et prediction, Ph.D. thesis No 1273, EPFL, Suiza.

Farhat M y Bourdon P, 1998, Extending repair intervals oh hydro-turbines by mitigating catitaion erosion, CEA Electricity '98 Conference & Exposition, Toronto, Canadá.

Farhat M, Bourdon P, Gagne J L y Remillard L, 1999, Improving hydro turbine profitability by monitoring cavitation aggressiveness, CEA Electricity '99 Conference & Exposition, Montreal, Canadá.

Figueroa F, 2000, Evaluación de los niveles de cavitación en las turbinas Francis de las casas de máquinas de Guri mediante el método de detección vibratorio con la finalidad de determinar parámetros aceptables de operación, Universidad Simón Bolívar, Puerto Ordaz.

Guennoun F, Farhat M, Ait Y, Avellan F, Pereira, 2003, Experimental investigation of a particular traveling bubble cavitation, Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003), Japon.

Kaye M, 2000, Cavitation Monitoring of Hydraulic Machines by Vibration Analisis, Ph.D. thesis No 2112, EPFL, Suiza.

Kaye M, Farhat M, 2002, Classification of cavitation in hydraulic machines using vibration analysis, Proceedings of the XXIst IAHR Symposium, Suiza

Kjeldsen M, Arndt R, Effertz M, 2000, Spectral Characteristics of sheet/cloud cavitation, Journal of Fluids Engineering, ASME.

Lohrberg H, Hofmann M, Ludwig G, Stoffel B, 1999, Analysis of damaged surfaces. Part II: Pit counting by 2D optical techniques, 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, EUA.

Oppenhenheim A y Lim J, 1988, Advanced topics in signal processing, Prentice Hall, EUA.

Papoulis A, 1977, Signal processing, Prentice Hall, EUA.

Rodriguez P, Cavitation pitting mitigation in hydraulic turbines, Vol 1 y 2 Final report EPRI AP-4719, Project 1745-10, Electric Power Research Institute, EUA.

Schwartz M, 1980, Information, transmission, modulation and noise, Mc Graw Hill, EUA.

Singhal A, Athavale M, Li H, Jiang Y, Mathematical basis and validation of the full cavitation model, Journal of Fluids Engineering, ASME.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE



DEVICA2003

DETECCIÓN VIBRATORIA DE CAVITACIÓN

MANUAL DE USUARIO

Desarrollado Por: Ing. Oswaldo Bastidas

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

El software DEVICA2003 está programado en MATLAB 6.5, por lo que es necesario disponer del mencionado programa en el ordenador en que se va a correr el DEVICA2003. Por otro lado, los requerimientos mínimos de hardware son procesador de 500 Mhz, 128 Mhz de memoria RAM y 1 Ghz para guardar los datos a procesar. Cabe destacar que conforme van aumentando las prestaciones de la computadora en la misma medida se obtendrán resultados más rápidos.

I Método Vibratorio de Detección de Cavitación

Devica2003 es un software basado en el método vibratorio de detección de cavitación. El método establece una relación entre la vibración a la que se somete la máquina y los niveles de cavitación presentes en el lado de baja presión de los álabes rotantes de una turbina hidráulica.

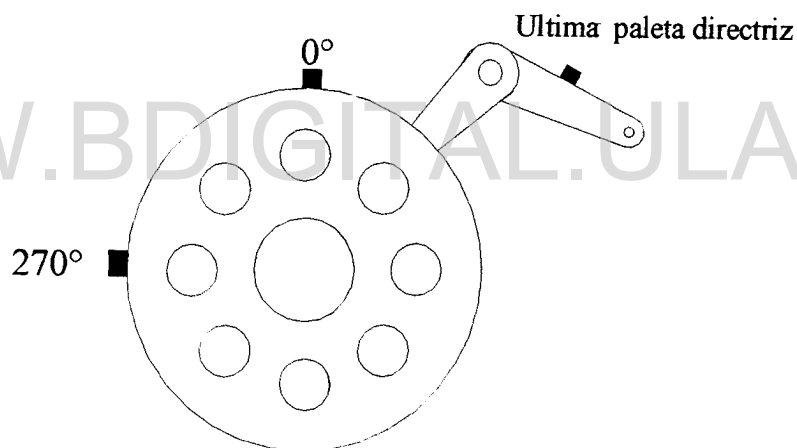


Fig 1. Ubicación de los acelerómetros.

Para la recolección de las señales de vibración es necesario la utilización de tres (3) sensores de aceleración de alta frecuencia (Fig 1). Inicialmente se montan radialmente dos (2) acelerómetro sobre la cubierta del cojinete guía de la turbina. El primero en posición aguas arriba a 0° y el otro a 270° del anterior, girando en sentido horario, ya que es en esta zona de la cubierta de la turbina donde se perciben de forma directa las vibraciones a las que se somete el lado de baja presión del álabe. Por otro lado, también es necesario montar otro sensor de alta frecuencia sobre el brazo de la última paleta directriz de la caja espiral, ya que esta señal posee la información de las pulsaciones de presión que gobiernan la formación y colapso de cavidades de vapor en el flujo.

Con el fin de obtener los valores de energía para cada condición de carga, una vez obtenidas todas las señales necesarias, es necesario realizar un procesamiento de los datos con la ayuda de herramientas matemáticas siguiendo el flujograma mostrado en la Fig. 2.

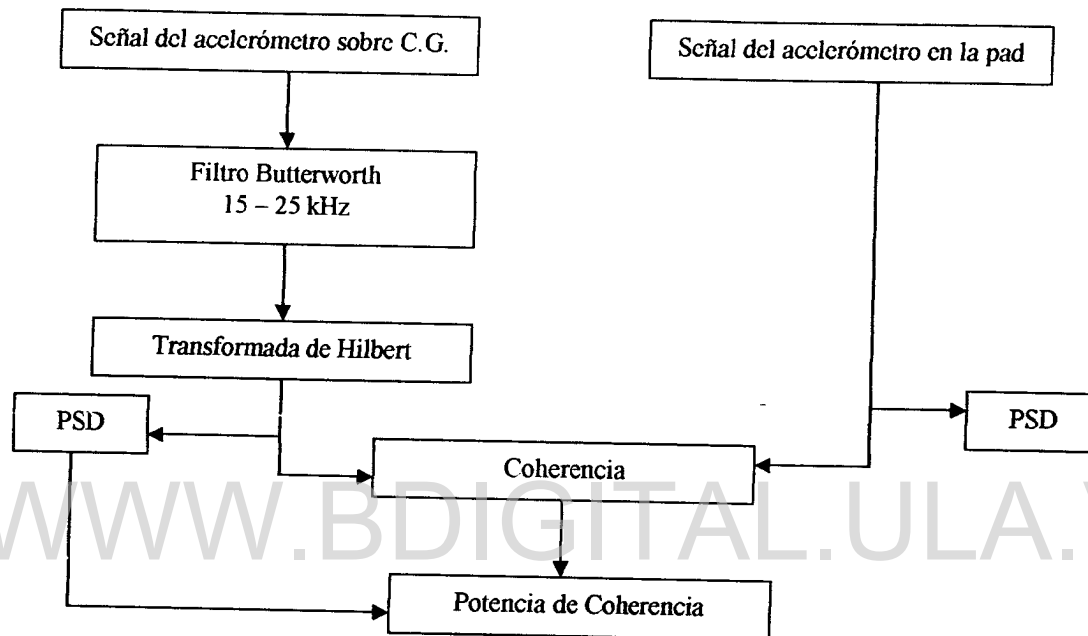


Fig.2. Flujograma del método vibratorio de detección de cavitación

II Organización de los Datos y Nomenclatura de Archivos

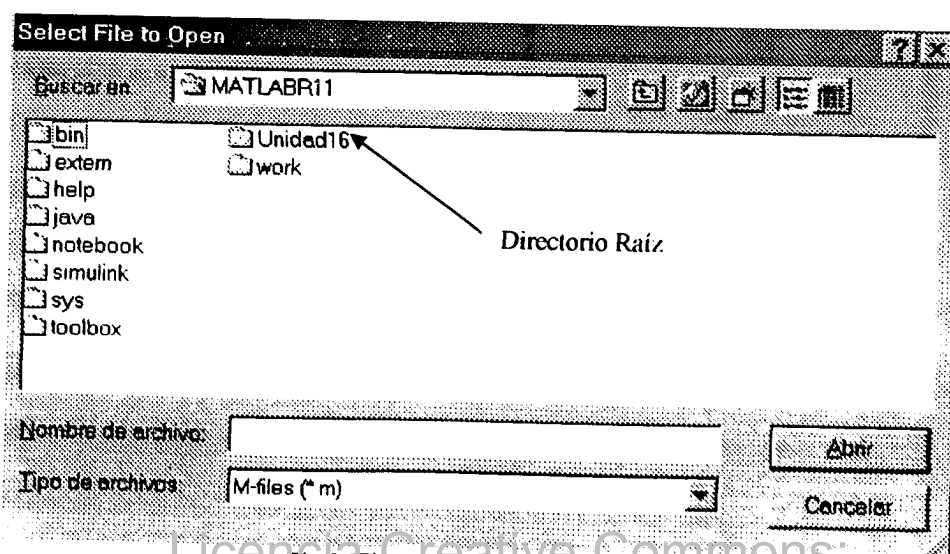


Fig.3. Ejemplo del directorio raíz.

Todos los datos correspondientes a una prueba deben incluirse dentro de un directorio raíz (Fig. 3), el cual puede estar en cualquier parte del disco duro. Sin embargo es necesario tomar en cuenta que MATLAB no acepta nombres de directorios con espacios en blanco o con alguno de los siguientes caracteres: ., ; ' % ` ' () [] { } / \ | : * ? " < >.

Dentro de este directorio raíz se deben incluir las distintas carpetas que tendrán los datos correspondientes a cada condición de operación (Fig. 4), se recomienda que el nombre de la carpeta haga referencia a la condición que contiene de manera que sea fácil identificarlas a la hora de ejecutar el programa.

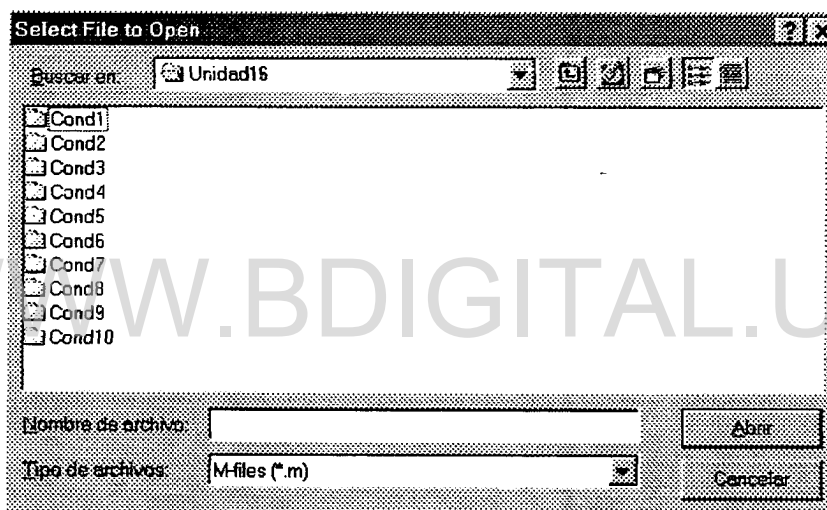


Fig. 4. Ejemplo de carpetas correspondientes a cada condición de operación

Por otro lado la recolección de los datos también presenta algunas consideraciones. Como se explicó anteriormente el método utiliza tres señales de vibración, sin embargo para poder cumplir con requisitos estadísticos y realizar las promediaciones necesarias, se requiere obtener varios registros de la misma señal. Esta cantidad multiplicada de datos hace necesario contar con un orden preestablecido para poder procesar dicha información en forma estandarizada.

Por estas razones se necesita una regla para la estandarización en el registro de la información, la cual debe estar en concordancia con lo programado en el software. De ahí que al momento de almacenar los registros se debe cumplir con la siguiente nomenclatura; para cada señal se coloca primero una "x" debido a que MATLAB no acepta la lectura archivos que empiecen con caracteres numéricos. Seguidamente se

hace referencia al acelerómetro del cual proceden los datos, para el sensor a 0° se escribe “0”, para el de 270° “270” y para el sensor montado sobre el brazo de la última paleta directriz “pad”, según sea el caso. Por último debe ir un número correlativo que se corresponde con la cantidad de registros hechos para cada condición de operación. En la Tabla 1 se muestra como deben nombrarse los archivos para una condición de operación en la cual se hacen tres (3) registros de cada señal (ver también Fig. 7).

Tabla 1. Nombres de los archivos para una condición de operación con tres (3) registros por señal

	Sensor		
	0°	270°	Paleta Directriz
Registro 1	x01.m	x2701.m	xpad1.m
Registro 2	x02.m	x2702.m	xpad1.m
Registro 3	x03.m	x2703.m	xpad3.m
⋮	⋮	⋮	⋮
Registro n	x0n.m	x270.m	xpad.m

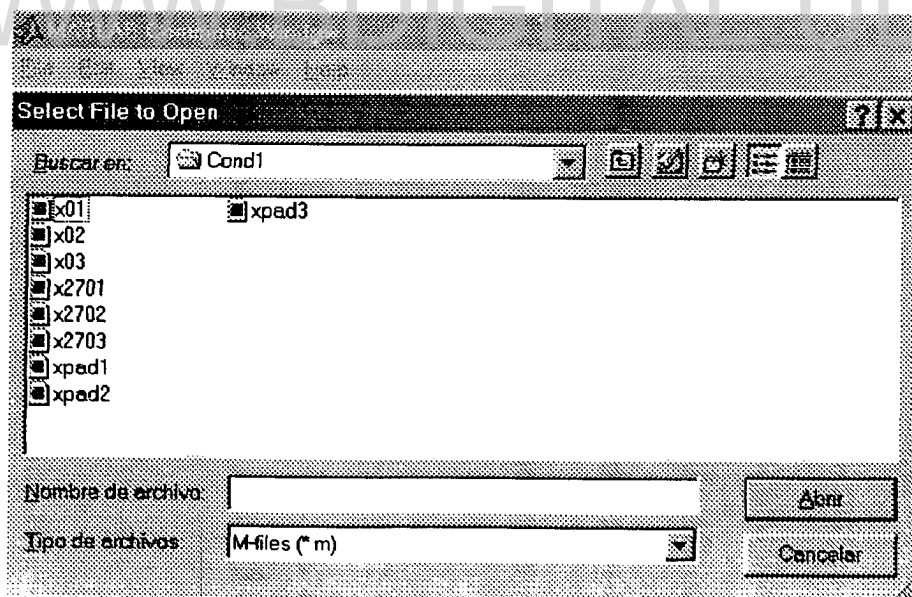


Fig.5. Archivos para una condición de operación con tres (3) registros por señal

III. Instalación del Programa

El software fue diseñado en MATLAB 6.5 por lo tanto para poder instalarlo es necesario disponer de dicho programa o una versión superior. La instalación del

software es bastante sencilla solo basta copiar la carpeta con el nombre DEVICA2003 al disco duro.

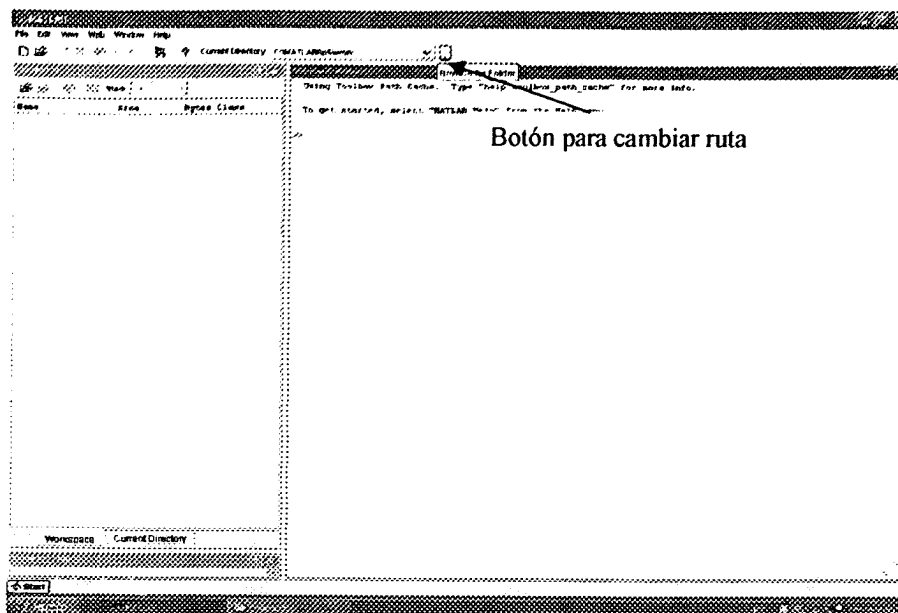


Fig. 6. Botón para cambiar la ruta de MATLAB

Sin embargo al momento de realizar la corrida es necesario cambiar la ruta para ubicar comandos que MATLAB tiene por defecto, para ello hay presionar los botones mostrados en la Fig.6, luego presionar el botón EXAMINAR o BROWSE (Fig.7) y ubicar con el explorador la carpeta DEVICA2003. Una vez aceptado el directorio DEVICA2003 como la ruta que usará MATLAB para buscar los comandos, ya se puede comenzar a utilizar el programa.

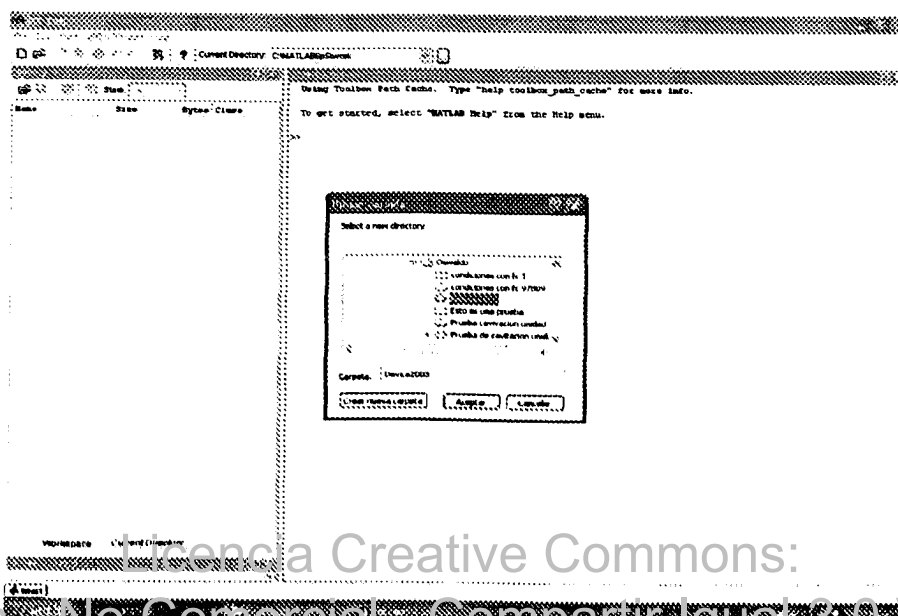


Fig. 7. Ubicación de la carpeta DEVICA2003 como nueva ruta de MATLAB

IV DEVICA2003

Una vez instalado el programa y establecida la ruta de MATLAB, se procede entonces a ejecutar el software. Para ello simplemente se escribe “Devica2003” en el espacio de trabajo de MATLAB (Fig.8).

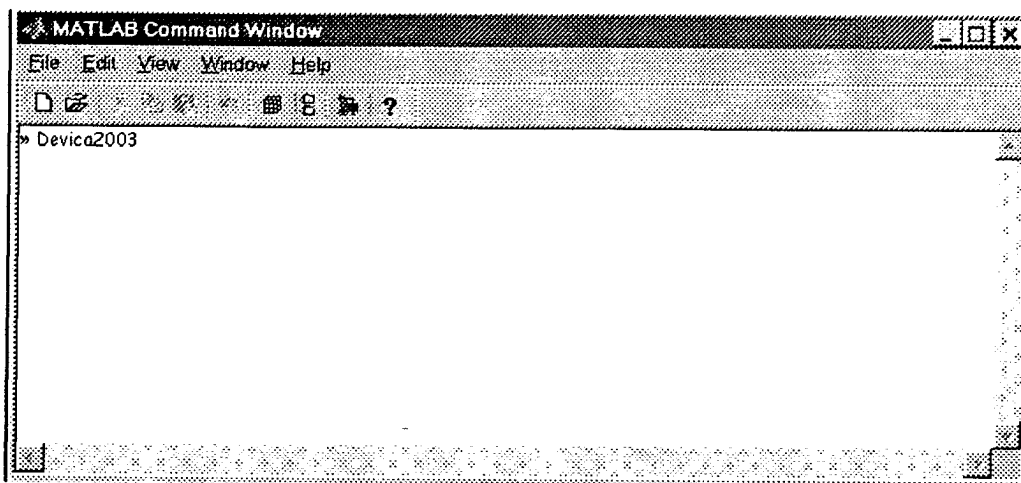


Fig. 8. Cargando Devica2003 en el espacio de trabajo de MATLAB

Después de llamar al programa se muestra la pantalla inicial (Fig. 9), la cual posee un botón que al presionarlo permite la entrada a la pantalla del programa.



Fig.9. Pantalla inicial de DEVICA2003

Luego de oprimir el botón para continuar, se muestra la pantalla del programa en la cual se pueden observar cuatro (4) botones de acción:

- Ayuda.
- Datos Iniciales.
- Potencia de Coherencia.
- Curvas de Cavitación.

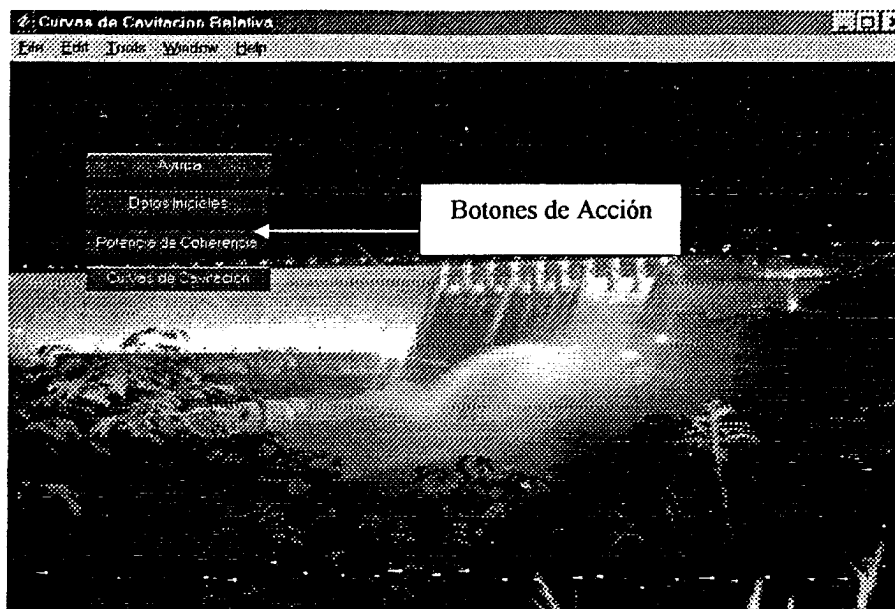
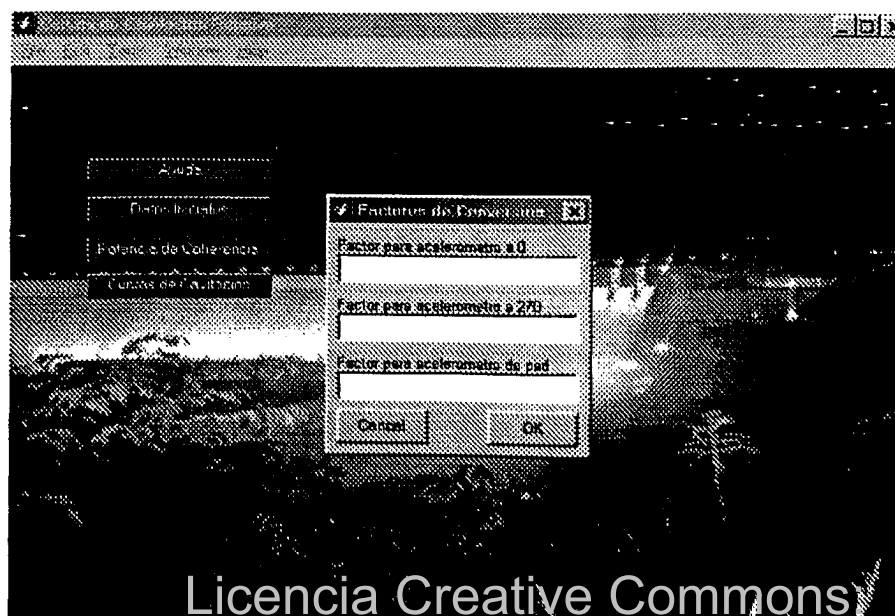


Fig. 10 Pantalla principal de DEVICA2003.

4.1 Datos Iniciales

Este módulo del programa sirve para cargar una serie de datos que el software necesita para desarrollar el algoritmo. A continuación se describen cada una de las series de datos que pide el programa



Licencia Creative Commons

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Fig. 11. Datos iniciales, factores de conversión

Factores de Conversión (Fig.11): En estos campos deben colocarse los factores que permiten hacer la conversión de las señales. Estos factores se obtienen a partir de la transformación de las unidades, programadas en el amplificador – acondicionador al establecer la ganancia, de cada señal a (m/sg²)/mV. Si por ejemplo se establece una ganancia de 100 mv/g en el amplificador entonces:

$$100 \text{ mv/g} \rightarrow 0,01\text{g/mv}$$

$$g_{\text{Guri}} = 9.7809 \text{ (m/sg}^2\text{)/g}$$

$$\text{Factor de Conversión} = 0.097809$$

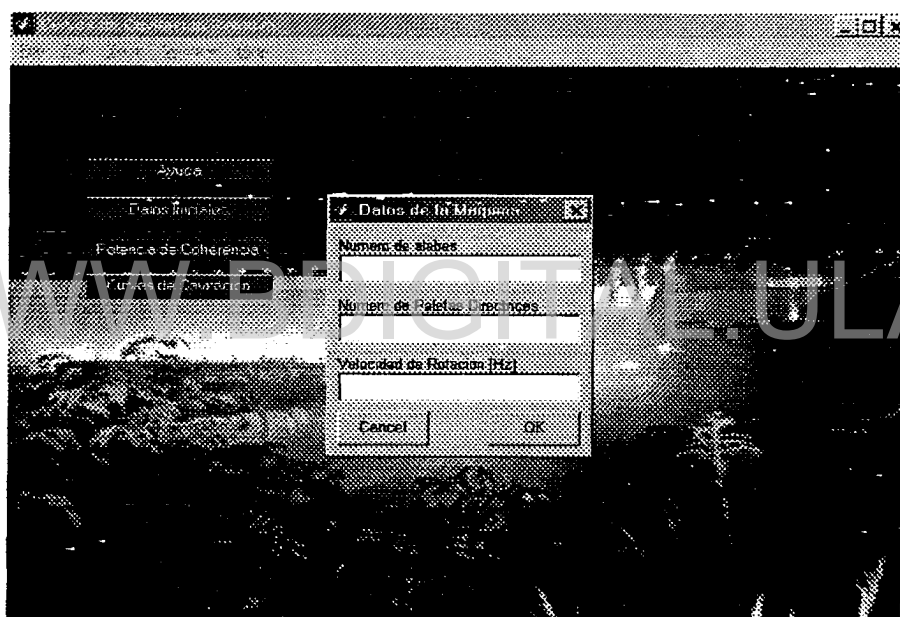


Fig. 12. Datos iniciales, datos de la máquina

Datos de la máquina (Fig.12): en esta sección deben incluirse las características de la máquina referentes a número de álabes, cantidad de paletas directrices y velocidad nominal de rotación en rpm.

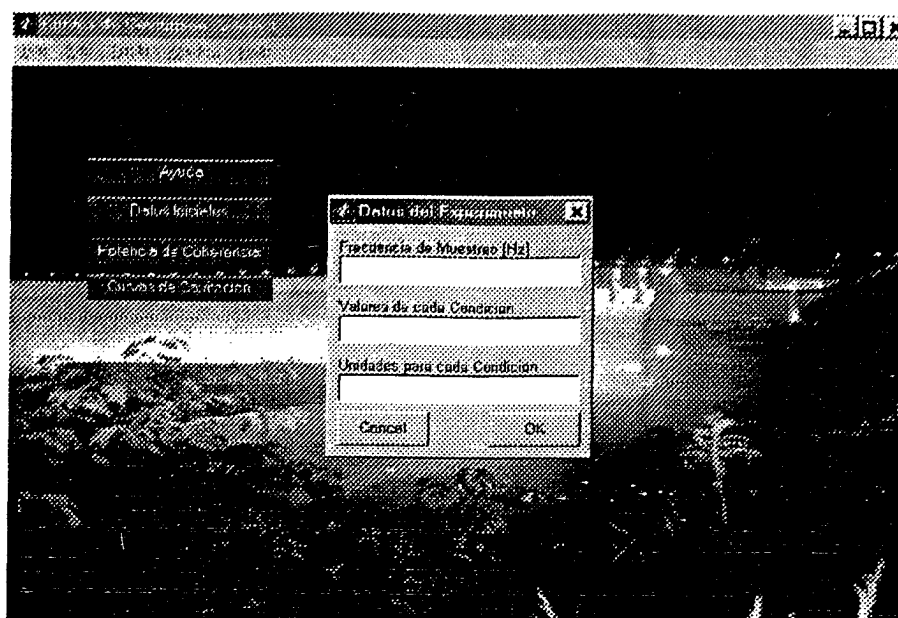


Fig. 13. Datos iniciales, datos del experimento.

Datos del experimento: en esta sección se cargan algunos datos referentes a la prueba que se esta procesando. Se debe colocar la frecuencia a la que se muestrea en el registrador, los valores que caracterizan cada condición de operación separados por un espacio en blanco (Ejemplo: 60 70 75 80 85 90 95 100 95 90 85 80 75 70 60, en caso de ser por apertura de paleta ó 230 240 250 270 280 290 310 320 340 360 360 340 310 280 240 si es el caso para una prueba hecha con control de potencia). Por último se declara en que unidades vienen los datos anteriormente introducidos para las condiciones de operación estas pueden venir en % de apertura de paletas, MW, mm de recorrido del servomotor, etc.

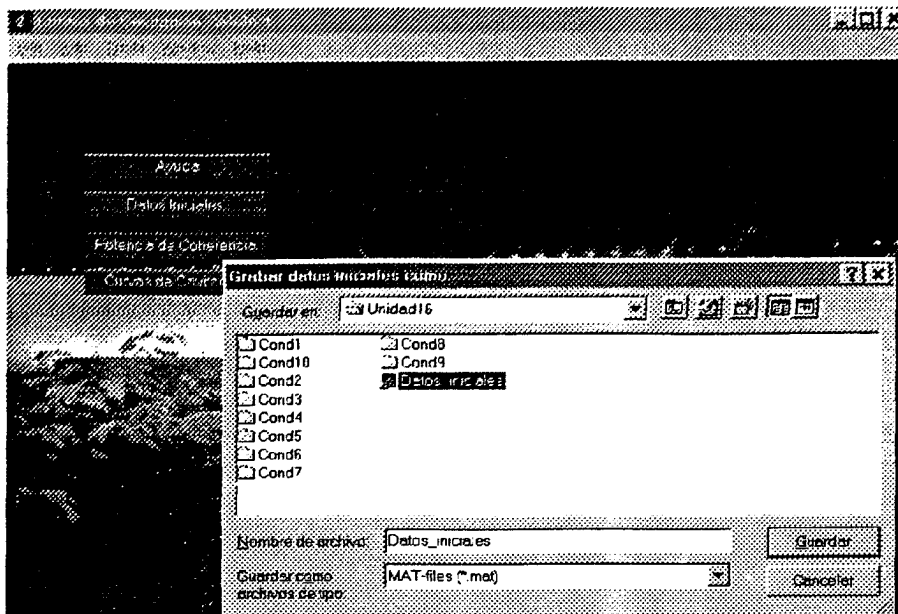


Fig. 14. Opción para guardar los datos iniciales en el directorio raíz

Una vez cargados todos los datos iniciales el programa abre la opción para guardar estos iniciales en el directorio raíz de la prueba (Fig. 14), se puede utilizar cualquier nombre para identificar este archivo siempre y cuando cumpla con las restricciones anteriormente descritas. Es necesario guardar los datos en el directorio raíz para que el programa pueda saber cual es la carpeta con la que va a trabajar en los procedimientos siguientes.

4.2 Potencia de Coherencia

Este módulo fue desarrollado para obtener todas las gráficas, por condición de operación, necesarias para poder evaluar el código que va a definir la curva de cavitación. Por lo tanto este módulo debe cargarse para todas y cada una de las condiciones de operación establecidas.

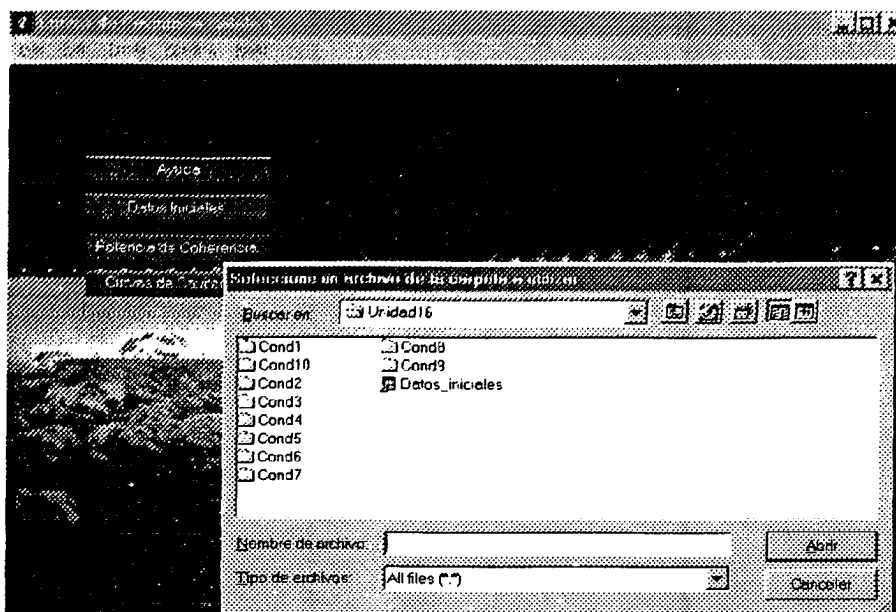


Fig. 15. Definición de la condición de operación a procesar en potencia de coherencia

Al accionar este botón se muestra una ventana del explorador de Windows con el mensaje “Seleccione un archivo de la carpeta a utilizar” (Fig. 15), esto se hace con la finalidad de decirle al programa cual es la carpeta que corresponde a la condición que se va a estudiar. Por ejemplo si se va a procesar la condición 1 entonces se hace doble clic en la carpeta correspondiente y luego sobre cualquier archivo dentro de esta carpeta (Fig.16), así el programa sabe que estos son los datos que va a utilizar para obtener las gráficas.

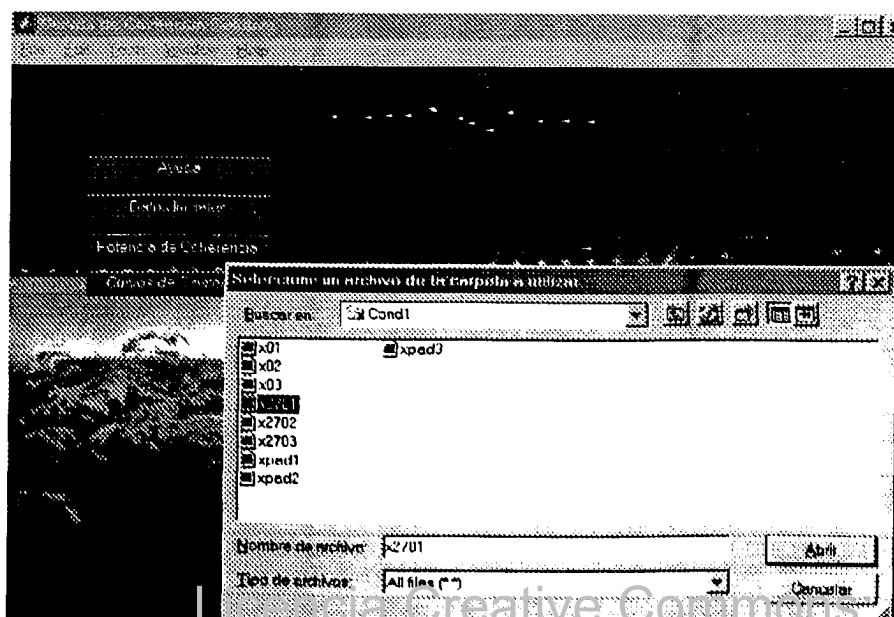


Fig. 16. Archivo de la carpeta seleccionada

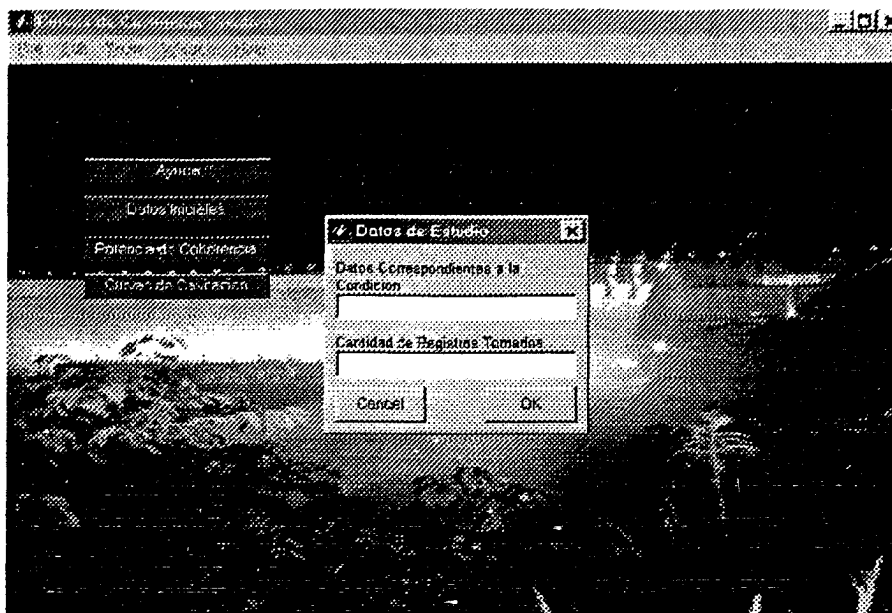


Fig. 17. Identificación de la condición seleccionada

Luego de seleccionar un archivo cualquiera de la carpeta a utilizar se despliega un cuadro de dialogo (Fig. 17), donde se debe indicar a que condición de operación corresponden los datos seleccionados, Esto se hace debido a que las carpetas pueden tener cualquier nombre siempre y cuando cumplan con las restricciones anteriormente descritas, por lo que una vez seleccionadas deben identificarse. Además se pide la cantidad de registros hechos a esta condición en específico.

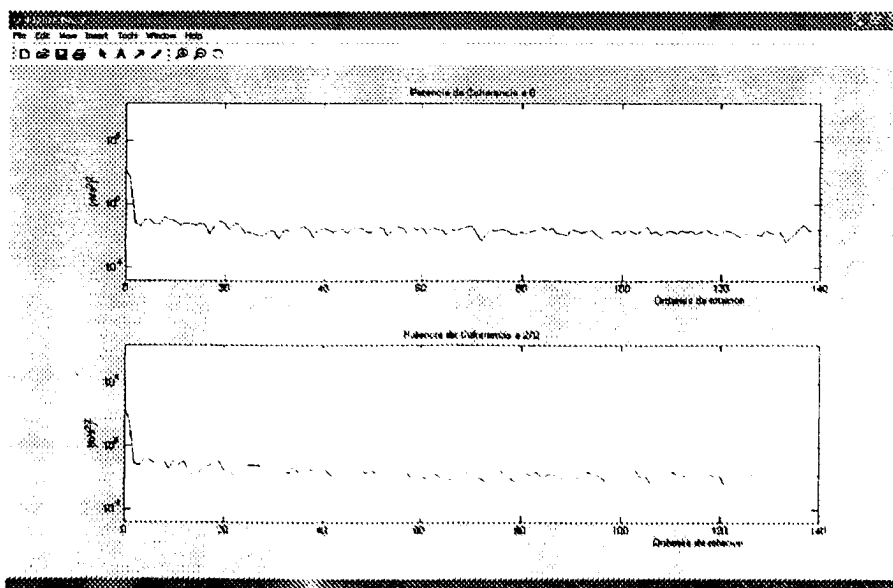


Fig. 18. Gráficas de potencia de coherencia a 0° y 270°.

Una vez caracterizada la condición a estudiar el programa presenta sus primeros resultados. La primera figura (Fig.18) tiene las gráficas correspondientes a la potencia de coherencia tanto a 0 como a 270 grados, las cuales se estudian para obtener el código que va a generar la curva de cavitación relativa. La segunda figura (Fig.19) que aparece es la correspondiente al informe técnico que se elabora en cada estudio, en esta figura se encuentran las siguientes gráficas:

- Coherencia a 0°.
- Potencia de Coherencia a 0°.
- PSD a 0°.
- PSD de Referencia (pad).
- PSD a 270°.
- Potencia de Coherencia a 270°.
- Coherencia a 270°.

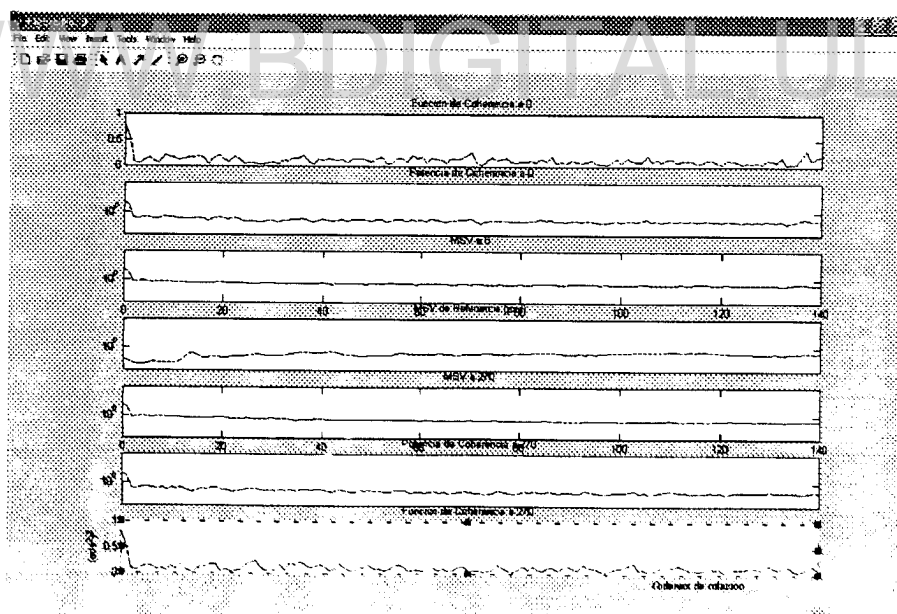


Fig. 19. Gráficas para informe técnico

4.3 Curvas de Cavitación

Una vez procesadas todas las condiciones de operación se procede a obtener las curvas de cavitación relativa, las cuales representan el resultado final del software. Para

diálogo (Fig. 20), donde se piden los datos correspondientes al código que se va a utilizar en el estudio (para información detalla sobre cómo obtener el código remitase al apartado V). En el ejemplo mostrado se introdujo el código P2b3P3b4.

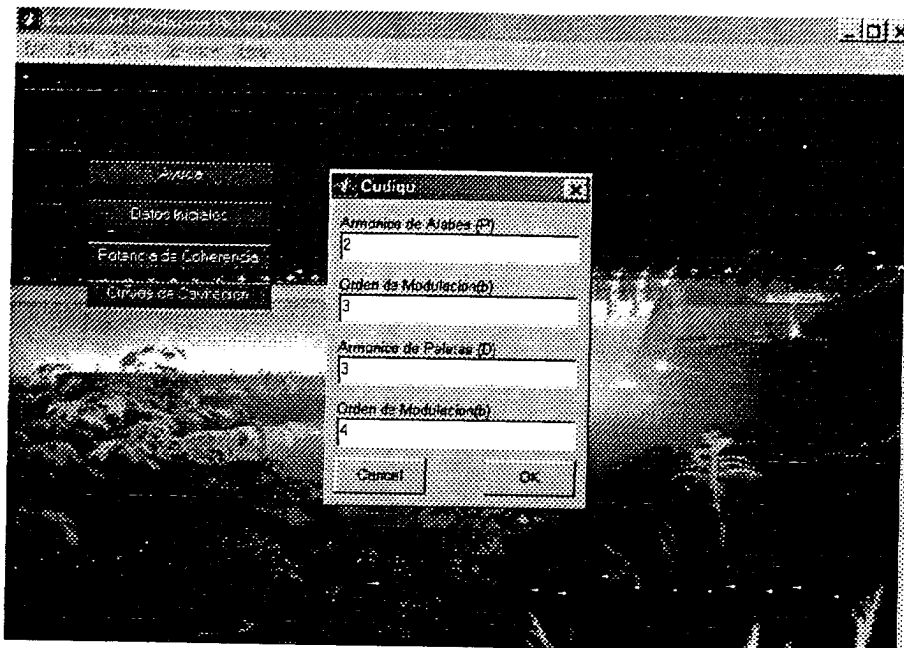


Fig. 20 Introduciendo el código de la prueba

Finalmente DEVICA2003 arroja las curvas de cavitación relativa tanto para el acelerómetro a 0° como para el de 270°(Fig.21).

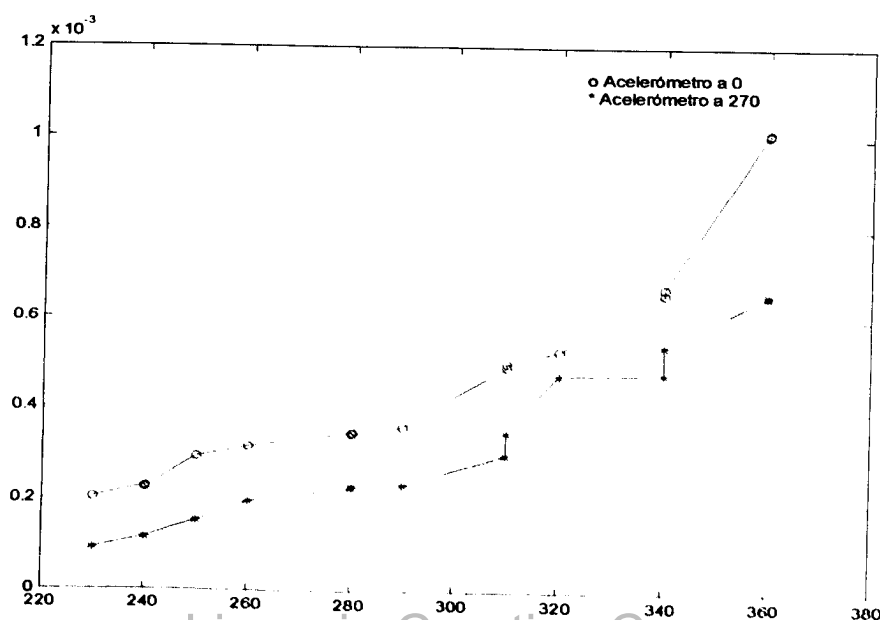


Fig.21. Curva de cavitación relativa para 0° y 270°.

V Obtención del Código

El código es la forma de indicarle al programa que valores de amplitud de densidad espectral de potencia debe promediar para obtener los niveles de energía para cada condición. Con el código se determina que armónicos son los que verdaderamente están gobernando la formación e implosión de cavidades de vapor en el flujo.

La obtención del código se hace a partir del estudio de las gráficas de potencia de coherencia (Fig. 22). Para ello es necesario establecer un criterio que permita decidir que armónicos hay que tomar en cuenta y con cuantas bandas laterales, a continuación se presentan algunas consideraciones a tomar en cuenta a la hora de definir el código para una prueba.

- Primero se debe conocer la cantidad de álabes y paletas directrices que tiene la máquina, ya que este es el dato que se toma como referencia para leer las curvas. Se resaltan los armónicos correspondientes al número de álabes y de paletas. Por ejemplo, para la máquina 16 de casa de máquinas II de Planta se tienen 15 álabes y 20 paletas directrices, por lo que en la Fig. 22 aparecen resaltados estos armónicos.

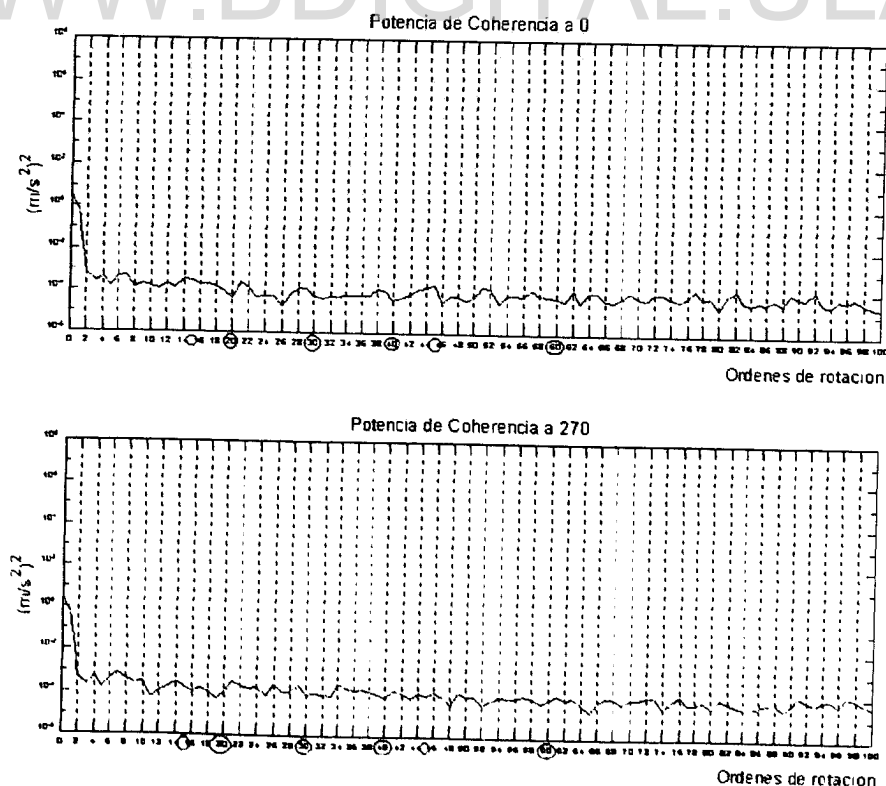


Fig. 22. Armónicos de álabes y paletas resaltados para un máquina con 15 álabes y 20 paletas.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- Luego se observan los picos cercanos a estos armónicos, dentro del intervalo comprendido entre 0 y el cuarto o quinto múltiplo de la cantidad de álabes, y se resaltan tomando nota de la condición de operación correspondiente a cada pico. Si existe más de un pico alrededor de un armónico se debe tomar en cuenta el mayor en amplitud. En la Fig. 23 se pueden apreciar los picos del ejemplo resaltados.
- Para definir el código se utiliza la siguiente nomenclatura: P (del francés *Pallier*) corresponde a la cantidad de armónicos de álabes, b la cantidad de bandas laterales incluyendo el armónico, D (del francés *Directrice*) es la cantidad de armónicos de paletas directrices y b las bandas laterales incluyendo el armónico. En el ejemplo se puede extraer el código P3b2D3b3, es decir que se van atomar en cuenta los valores correspondientes a las siguientes órdenes de rotación: 14, 15, 16, 18, 19, **20**, 21, 22, 29, **30**, 31, 38, 39, **40**, 42, 42, 44, **45**, 46, 58, 59, **60**, 61 y 62. Las marcadas con negritas corresponden a los armónicos de álabes y paletas, los demás tienen que ver con la cantidad de bandas laterales indicadas por el código. Para los armónicos de álabes se indican 2 bandas laterales, es decir el armónico mismo y una orden de rotación tanto por arriba como por abajo (14, 15 y 16), así para armónico de paletas se indican 3 bandas (18, 19, **20**, 21, 22).

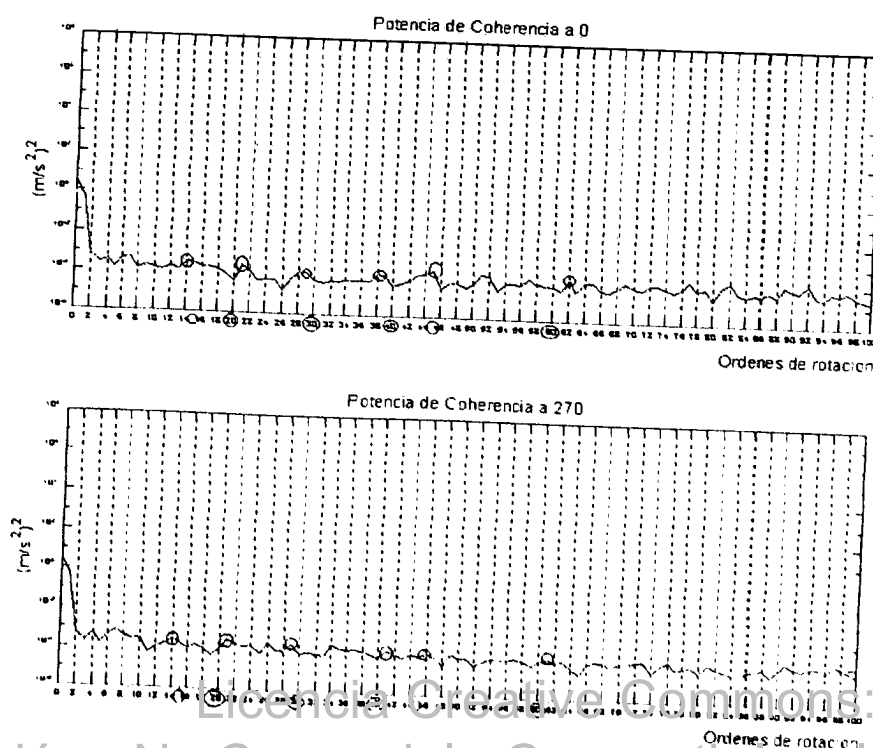


Fig. 23. Picos resaltados para el ejemplo anterior.

- Para cada gráfica correspondiente a un punto de prueba, se obtiene un código. Al final se decide cual es la combinación de armónicos y bandas laterales que incluya todos los códigos establecidos a lo largo de la prueba, definiendo así, uno solo para una máquina específica, bajo ciertas condiciones dadas.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
function h1 = DEV2003()
% This is the machine-generated representation of a Handle Graphics
object
% and its children. Note that handle values may change when these
objects
% are re-created. This may cause problems with any callbacks written to
% depend on the value of the handle at the time the object was saved.
% This problem is solved by saving the output as a FIG-file.
%
% To reopen this object, just type the name of the M-file at the MATLAB
% prompt. The M-file and its associated MAT-file must be on your path.
%
% NOTE: certain newer features in MATLAB may not have been saved in this
% M-file due to limitations of this format, which has been superseded by
% FIG-files. Figures which have been annotated using the plot editor
tools
% are incompatible with the M-file/MAT-file format, and should be saved
as
% FIG-files.
```

```
load DEV2003.mat
```

```
h1 = figure(...
'Color',[0.831372549019608 0.815686274509804 0.784313725490196],...
'Colormap',get(0,'defaultfigureColormap'),...
'InvertHardcopy',get(0,'defaultfigureInvertHardcopy'),...
'Name','Curvas de Cavitacion',...
'NumberTitle','off',...
'PaperPosition',[10 20 11.2604166666667 7.6666666666667],...
'Position',[10 20 780 530],...
'Renderer',get(0,'defaultfigureRenderer'),...
'RendererMode','manual',...
'UserData',zeros(1,0));
```

```
setappdata(h1,'GUIDEOptions',struct(...
'active_h',1,...
'taginfo',struct(...
'pushbutton',5,...
'axes',2),...
'override',0,...
'release',12,...
'resize','simple',...
'accessibility','on',...
'mfile',0,...
'callbacks',1,...
'singleton',1,...
'syscolorfig',1));
```

```
h2 = uicontrol(...
'Parent',h1,...
'Units','normalized',...
'BackgroundColor',[0 0 1],...
'ForegroundColor',[1 1 1],...
'ListboxTop',0,...
```

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
'Position',[0.031767955801105 0.794605809128631 0.175414364640884
0.0518672199170125],...
'String','Ayuda',...
'Tag','pushbutton1');
```

```
h3 = uicontrol(...
'Parent',h1,...
'Units','normalized',...
'BackgroundColor',[0 0 1],...
'Callback','[rutaraiiz c0 c270 cpad na npd fo fs uni_cond
condicion]=dat_ini',...
'ForegroundColor',[1 1 1],...
'ListboxTop',0,...
'Position',[0.031767955801105 0.744813278008299 0.175414364640884
0.0477178423236514],...
'String','Datos Iniciales',...
'Tag','pushbutton2');
```

```
h4 = uicontrol(...
'Parent',h1,...
'Units','normalized',...
'BackgroundColor',[0 0 1],...
'Callback','cavip_dev(rutaraiiz,c0,c270,cpad,fs,fo)',...
'ForegroundColor',[1 1 1],...
'ListboxTop',0,...
'Position',[0.031767955801105 0.695020746887967 0.175414364640884
0.0477178423236514],...
'String','Potencia de Coherencia',...
'Tag','pushbutton3');
```

```
h5 = uicontrol(...
'Parent',h1,...
'Units','normalized',...
'BackgroundColor',[0 0 1],...
'Callback','curvas(rutaraiiz,na,npd,uni_cond,condicion)',...
'ForegroundColor',[1 1 1],...
'ListboxTop',0,...
'Position',[0.031767955801105 0.645228215767635 0.175414364640884
0.0477178423236514],...
'String','Curvas de Cavitacion',...
'Tag','pushbutton4');
```

```
h6 = axes(...
'Parent',h1,...
'CameraPosition',[150.5 150.5 9.16025403784439],...
'CameraPositionMode',get(0,'defaultaxesCameraPositionMode'),...
'Color',get(0,'defaultaxesColor'),...
'ColorOrder',get(0,'defaultaxesColorOrder'),...
'Position',[-0.00414364640883978 0 1.00276243093923
0.997925311203319],...
'XColor',get(0,'defaultaxesXColor'),...
'XLim',[0.5 300.5],...
'XLimMode','manual',...
```

Licencia Creative Commons:

Sistema para monitorizar cavitación en turbinas hidráulicas Tipo Francis
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
'YColor', get(0, 'defaultaxesYColor'), ...
'YDir', 'reverse', ...
'YLim', [0.5 300.5], ...
'YLimMode', 'manual', ...
'ZColor', get(0, 'defaultaxesZColor'), ...
'Clipping', 'off', ...
'HandleVisibility', 'off', ...
'HitTest', 'off', ...
'Interruptible', 'off', ...
'SelectionHighlight', 'off', ...
'Tag', 'axes1', ...
'Visible', 'off');
```

```
h7 = get(h6, 'title');
```

```
set(h7, ...
'Parent', h6, ...
'Color', [0 0 0], ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'Position', [150.5 -2.14945652173913 1.00005459937205], ...
'VerticalAlignment', 'bottom', ...
'HandleVisibility', 'off', ...
'Visible', 'off');
```

```
h8 = get(h6, 'xlabel');
```

```
set(h8, ...
'Parent', h6, ...
'Color', [0 0 0], ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'Position', [150.222479185939 310.078804347826 1.00005459937205], ...
'VerticalAlignment', 'cap', ...
'HandleVisibility', 'off', ...
'Visible', 'off');
```

```
h9 = get(h6, 'ylabel');
```

```
set(h9, ...
'Parent', h6, ...
'Color', [0 0 0], ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'Position', [-8.24190564292322 151.111413043478 1.00005459937205], ...
'Rotation', 90, ...
'VerticalAlignment', 'bottom', ...
'HandleVisibility', 'off', ...
'Visible', 'off');
```

```
h10 = get(h6, 'zlabel');
```

```
set(h10, ...
'Parent', h6, ...
'Color', [0 0 0], ...
'HorizontalAlignment', 'right', ...
'Position', [0.638760407030527 0.703804347826065 1.00005459937205], ...
'HandleVisibility', 'off', ...
'Visible', 'off');
```

Licencia Creative Commons:

```
h11 = image(...  
    'Parent',h6,...  
    'CData',mat{1},...  
    'XData',[1 300],...  
    'YData',[1 300]);
```

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
function h1 = Devica2003()
% This is the machine-generated representation of a Handle Graphics
object
% and its children. Note that handle values may change when these
objects
% are re-created. This may cause problems with any callbacks written to
% depend on the value of the handle at the time the object was saved.
% This problem is solved by saving the output as a FIG-file.
%
% To reopen this object, just type the name of the M-file at the MATLAB
% prompt. The M-file and its associated MAT-file must be on your path.
%
% NOTE: certain newer features in MATLAB may not have been saved in this
% M-file due to limitations of this format, which has been superseded by
% FIG-files. Figures which have been annotated using the plot editor
tools
% are incompatible with the M-file/MAT-file format, and should be saved
as
% FIG-files.

load Devica2003.mat

h1 = figure(...
'Color',[0.831372549019608 0.815686274509804 0.784313725490196],...
'Colormap',get(0,'defaultfigureColormap'),...
'InvertHardcopy',get(0,'defaultfigureInvertHardcopy'),...
'Name','DEVICA2003',...
'NumberTitle','off',...
'PaperPosition',get(0,'defaultfigurePaperPosition'),...
'Position',[20 50 760 500]);

setappdata(h1, 'GUIDEOptions', struct(...
'active_h', 1, ...
'taginfo', struct(...
'pushbutton', 2, ...
'axes', 2), ...
'override', 0, ...
'release', 12, ...
'resize', 'simple', ...
'accessibility', 'on', ...
'mfile', 0, ...
'callbacks', 1, ...
'singleton', 1, ...
'syscolorfig', 1));

h2 = uicontrol(...
'Parent',h1,...
'Units','normalized',...
'Callback','close;dev2003',...
'ListboxTop',0,...
'Position',[0.480263157894737 0.296 0.0460526315789474 0.03],...
'String','>>',...
'Tag','pushbutton1');
```

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
h3 = axes(...
'Parent',h1,...
'CameraPosition',[360.5 270.5 9.16025403784439],...
'CameraPositionMode',get(0,'defaultaxesCameraPositionMode'),...
'Color',get(0,'defaultaxesColor'),...
'ColorOrder',get(0,'defaultaxesColorOrder'),...
'Layer','top',...
'Position',[-0.00131578947368421 -0.004 1 1.002],...
'XColor',get(0,'defaultaxesXColor'),...
'XLim',[0.5 720.5],...
'XLimMode','manual',...
'YColor',get(0,'defaultaxesYColor'),...
'YDir','reverse',...
'YLim',[0.5 540.5],...
'YLimMode','manual',...
'ZColor',get(0,'defaultaxesZColor'),...
'Clipping','off',...
'HandleVisibility','off',...
'HitTest','off',...
'Interruptible','off',...
'SelectionHighlight','off',...
'Tag','axes1',...
'Visible','off');
```

```
h4 = get(h3,'title');
set(h4,...
'Parent',h3,...
'Color',[0 0 0],...
'HorizontalAlignment','center',...
'Position',[360.026315789474 -6.50598802395211 1.00005459937205],...
'VerticalAlignment','bottom',...
'HandleVisibility','off',...
'Visible','off');
```

```
h5 = get(h3,'xlabel');
set(h5,...
'Parent',h3,...
'Color',[0 0 0],...
'HorizontalAlignment','center',...
'Position',[360.026315789474 565.829341317365 1.00005459937205],...
'VerticalAlignment','cap',...
'HandleVisibility','off',...
'Visible','off');
```

```
h6 = get(h3,'ylabel');
set(h6,...
'Parent',h3,...
'Color',[0 0 0],...
'HorizontalAlignment','center',...
'Position',[-29.3421052631579 271.577844311377 1.00005459937205],...
'Rotation',90,...
'VerticalAlignment','bottom',...
'Visible','off');
```

```
'HandleVisibility','off',...
'Visible','off');

h7 = get(h3,'zlabel');

set(h7,...
'Parent',h3,...
'Color',[0 0 0],...
'HorizontalAlignment','right',...
'Position',[0.973684210526316 1.03892215568862 1.00005459937205],...
'HandleVisibility','off',...
'Visible','off');

h8 = image(...
'Parent',h3,...
'CData',mat{1},...
'XData',[1 720],...
'YData',[1 540]);
```

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
function [rutaraiz,c0,c270,cpad,na,npd,fo,fs,uni_cond,condicion]=dat_ini
titulo= 'Factores de Conversion';
datos = {'Factor para acelerometro a 0','Factor para acelerometro a 270',
...
        'Factor para acelerometro de pad'};
linea= [1,35];
var = inputdlg(datos,titulo,linea);
DE1=char(var(1));
c0=str2num(DE1);
DE2=char(var(2));
c270=str2num(DE2);
DE3=char(var(3));
cpad=str2num(DE3);

titulo2= 'Datos de la Maquina';
datos2 = {'Numero de alabes','Numero de Paletas Directrices', ...
        'Velocidad de Rotacion [rpm]'};
linea2= [1,35];
var2 = inputdlg(datos2,titulo2,linea2);
DE1=char(var2(1));
na=str2num(DE1);
DE2=char(var2(2));
npd=str2num(DE2);
DE3=char(var2(3));
fo=str2num(DE3);
fo=fo/60;

titulo3= 'Datos del Experimento';
datos3 = {'Frecuencia de Muestreo [Hz]','Valores de cada Condicion', ...
        'Unidades para cada Condicion'};
linea3= [1,35];
var3 = inputdlg(datos3,titulo3,linea3);
DE1=char(var3(1));
fs=str2num(DE1);
uni_cond=char(var3(3));
DE2=char(var3(2));
a=['condicion=','DE2,'];
eval(a);
[archivoini,rutaraiz]=uiputfile('.mat','Grabar datos iniciales como:');
s=['save ',rutaraiz,archivoini,' c0,c270,cpad,na,npd,fo,fs,a'];
eval(s);
```

```
function cavip_dev (rutaraz,c0,c270,cpad,fs,fo)
%
%Sintaxis:cavip_dev (rutaraz,c0,c270,cpad,fs,fo)
%
%Permite realizar todos los calculos necesarios para hallar la
%potencia de coherencia entre las senales de los acelerometros
%montados en el cojinete guia y la senal de baja frecuencia montada
%en la paleta directriz. Como resultado arroja 2 curvas de potencia de
%coherencia correspondientes a la senales de los acelerometros del
%cojinete guia.
r=[rutaraz,'*.*'];
[archivo,ruta]=uigetfile(r,'Seleccione un archivo de la carpeta a
utilizar');

titulo= 'Datos de Estudio';
datos = {'Datos Correspondientes a la Condicion','Cantidad de Registros
Tomados'};
linea= [1,35];
var = inputdlg(datos,titulo,linea);
DE1=char(var(1));
cond_oper=str2num(DE1);
DE2=char(var(2));
cant_ensy=str2num(DE2);
b=num2str(cond_oper);

[x0,x270,xpad]=agrup_dev(ruta,cant_ensy,b);

x0=c0*x0; %multiplicando por los factores de conversion
x270=c270*x270;
xpad=cpad*xpad;
[HTx0,HTx270,xpad]=filtrado(x0,x270,xpad);

clear x0;
clear x270;

nfft=fix(fs/fo);

[a,cc]=size(HTx0);
for i=1:cc
    MSV0(:,i)=psd(HTx0(:,i),nfft,fs,hanning(nfft)); %calculando MSV
    MSV270(:,i)=psd(HTx270(:,i),nfft,fs,hanning(nfft));
    MSVPAD(:,i)=psd(xpad(:,i),nfft,fs,hanning(nfft));

    [FC0(:,i),f0]=cohere(HTx0(:,i),xpad(:,i),nfft,fs,hanning(nfft));%calcu
    lando la funcion
    [FC270(:,i),f270]=cohere(HTx270(:,i),xpad(:,i),nfft,fs,hanning(nfft));
    %de coherencia
end
ro=f0/fo; %calculando ordenes de rotacion
clear HTx0;
clear HTx270;

MSV0=MSV0';
MSV0=sum(MSV0)/cc; %promediando los valores de las
MSV0=MSV0';
MSV270=MSV270'; %senales de todos los experimentos
```

```

MSV270=sum(MSV270)/cc;
MSV270=MSV270';
MSVPAD=MSVPAD';
MSVPAD=sum(MSVPAD)/cc;
MSVPAD=MSVPAD';
FC0=FC0';
FC0=sum(FC0)/cc;
FC0=FC0';
FC270=FC270';
FC270=sum(FC270)/cc;
FC270=FC270';

P0=FC0.*MSV0;
P270=FC270.*MSV270;

figure;
subplot (2,1,1),semilogy(ro,P0);
title('Potencia de Coherencia a 0'),...
    axis([0,140,10e-7,10e7]),...
    ylabel('(m/s^2)^2'),...
    xlabel('
Ordenes de rotacion'),
subplot (2,1,2),semilogy(ro,P270);
title('Potencia de Coherencia a 270'),...
    axis([0,140,10e-7,10e7]),...
    ylabel('(m/s^2)^2'),...
    xlabel('
Ordenes de rotacion'),

figure
subplot (7,1,1),plot (ro,FC0);
title('Funcion de Coherencia a 0'),...
    axis([0,140,0,1]),...
subplot (7,1,2),semilogy(ro,P0);
title('Potencia de Coherencia a 0'),...
    axis([0,140,10e-7,10e7]),...
subplot (7,1,3),semilogy(ro,MSV0);
title('MSV a 0'),...
    axis([0,140,10e-7,10e7]),...
subplot (7,1,4),semilogy(ro,MSVPAD);
title('MSV de Referencia (pad)'),...
    axis([0,140,10e-7,10e7]),...
subplot (7,1,5),semilogy(ro,MSV270);
title('MSV a 270'),...
    axis([0,140,10e-7,10e7]),...
subplot (7,1,6),semilogy(ro,P270);
title('Potencia de Coherencia a 270'),...
    axis([0,140,10e-7,10e7]),...
subplot (7,1,7),plot(ro,FC270);
title('Funcion de Coherencia a 270'),...
    axis([0,140,0,1]),...
    ylabel('(m/s^2)^2'),...
    xlabel('
Ordenes de rotacion'),
ql=['save ',rutaraiz,'cond',b,' MSV0 MSV270 FC0 f0 FC270 f270 P0 P270
nfft ro'];
eval(ql);

```

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
function [HTx0,HTx270,xpad]=filtrado(x0,x270,xpad);  
fs=100000;  
fn=fs/2;  
w1=5000/fn;  
w2=15000/fn;  
[A,B]=butter(10,[w1,w2]);  
xp0=filter(A,B,x0);  
xp270=filter(A,B,x270);
```

```
HTx0=abs(hilbert(x0));  
HTx270=abs(hilbert(x270));
```

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
function [resultante]=codigo (na, npd, aa, oma, ap, omp)
factor_alab=[0:aa-1]*((oma*2)-1);
factor_pal=[0:ap-1]*((omp*2)-1);
v_alab=[1:aa];
v_alab=v_alab*na;
ap
npd
v_paleta=[1:ap]*npd;

for i=1:aa
    for j=-(oma-1):(oma-1)
        inda=j+oma+factor_alab(i);
        cod_alab(inda)=v_alab(i)+j;
    end
end

for i=1:ap
    for j=-(omp-1):(omp-1)
        indp=j+omp+factor_pal(i);
        cod_pal(indp)=v_paleta(i)+j;
    end
end

for i=1:length(cod_alab)
    flag=1;
    for j=1:length(cod_pal)
        if cod_alab(i)==cod_pal(j)
            flag=0;
            j=length(cod_pal);
        end
    end
    if flag==1
        resultante(i)=cod_alab(i);
    end
end

resultante=[resultante,cod_pal];
```

```
function curvas(rutaraiz,na,npd,uni_cond,condicion)

titulo= 'Codigo';
datos = {'Armonico de Alabes (P)','Orden de Modulacion(b)','Armonico de
Paletas (D)','Orden de Modulacion(b)'};
linea= [1,35];
var = inputdlg(datos,titulo,linea);
DE1=char(var(1));
aa=str2num(DE1);
DE2=char(var(2));
oma=str2num(DE2);
DE3=char(var(3));
ap=str2num(DE3);
DE4=char(var(4));
omp=str2num(DE4);

[resultante]=codigo(na,npd,aa,oma,ap,omp);

for k=1:length(condicion)
    a1=['load ',rutaraiz,'cond'];
    b=num2str(k);
    a2=[a1,b];
    eval(a2);
    ro=fix(ro);

    for i=1:length(resultante)
        indice=find(ro==resultante(i));
        punto0(i)=MSV0(indice);
        punto270(i)=MSV270(indice);
    end

    punto0=punto0';
    punto0=sum(punto0)/length(punto0);
    punto270=punto270';
    punto270=sum(punto270)/length(punto270);

    CAVITACION0(k)=punto0;
    CAVITACION270(k)=punto270;
end
figure;
plot (condicion,CAVITACION0,'go',condicion,CAVITACION270,'b*');
xlabel(uni_cond);
ylabel('MSV [(m/s2)^2]');
```