

## Desarrollo de modelos matemáticos para el análisis y evaluación de máquinas y equipos industriales

AVILÉS-FERRERA, José Josías\*†, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, José Luis, FLORES-PÉREZ, José Manuel y GONZÁLEZ-AHUMADA, Estefani Janet.

*Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato (UTSOE), Carretera Valle de Santiago-Huanímaro km. 1.2, C.P. 38400. Valle de Santiago, Guanajuato.*

Recibido Abril 15, 2016; Aceptado Junio 17, 2016

### Resumen

Desde hace varios años se ha venido incrementando el uso de herramientas computacionales para el análisis de equipos, maquinaria y herramientas industriales de trabajo continuo como son: motores eléctricos, calentadores, turbinas entre otros; que permiten tener en buenas condiciones estos equipos y a partir de este análisis poder programar el apropiado mantenimiento de ellos o su reparación si ese fuera el caso. A partir del desarrollo de los modelos matemáticos de las máquinas más empleadas en la industria, se puede realizar el análisis y evaluación de estos equipos, mediante su programación en lenguajes computacionales, tales como: EES, Java, C/C++, Visual Basic, etc. Bajo este escenario, se ha desarrollado una plataforma que sirve como una herramienta computacional para el análisis de equipos y procesos que son comúnmente empleados en la industria. Dicha herramienta computacional permite al usuario analizar el desempeño de equipos industriales, como por ejemplo, las bombas centrifugas mediante el análisis de sus curvas de comportamiento en las condiciones de diseño, referencia y operación real. En este artículo se describe el desarrollo de esta plataforma.

**Equipos, análisis, pruebas, computación, mantenimiento**

### Abstract

For several years, it has been increasing the use of computational tools for analysis equipment, industrial machinery and tools of continuous work such as electric motors, heaters, among other turbines; that they allow such equipment in good condition and from this analysis to program the proper maintenance or repair them if that was the case. From the development of mathematical models of the machines most used in industry, you can perform the analysis and evaluation of these teams, by computer programming, such as languages: ESS, Java, C/C++, Visual Basic, etc. Under this scenario, it has developed a platform that serves as a computational tool for the analysis of equipment and processes than are commonly used in the industry. This computer tool allows the user to analyze the performance of industrial equipment, such as centrifugal pumps by analyzing their performance curves in the design conditions, reference and actual operation. In this article is described the development of this platform.

**Equipment, analysis, tests, computer, maintenance**

**Citación:** AVILÉS-FERRERA, José Josías, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, José Luis, FLORES-PÉREZ, José Manuel y GONZÁLEZ-AHUMADA, Estefani Janet. Desarrollo de modelos matemáticos para el análisis y evaluación de máquinas y equipos industriales. Revista de Prototipos Tecnológicos 2016, 2-4: 1-16

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jjavilesfe@utsoe.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La industria moderna, tan competitiva como lo es hoy en día debido a la globalización y a la economía, requiere de procesos bien definidos que garanticen productos de alta calidad, en el menor tiempo posible y a un bajo costo. Por lo que es necesario el buen diagnóstico de sus equipos. Esto con lleva a tener herramientas de diagnóstico que permitan establecer planes de operación y mantenimiento en un tiempo bien definido, cuidando en todo momento que sus recursos materiales y humanos se encuentren en óptimas condiciones, si estos fallaran sería catastrófico para la empresa ya que esto provocaría retrasos en sus tiempos de producción y entrega de su producto, una elevación en los costos de producción e incluso hasta su extinción en el mercado por lo que el impacto que tendría en la sociedad y la economía sería enorme.

Por lo descrito anteriormente, es importante que existan medios y métodos que ayuden a evaluar los equipos y procesos de operación, mediante el diagnóstico de forma óptima a las máquinas y equipos de tal manera que garanticen que se encuentran en excelentes condiciones de operación. En la actualidad, existen métodos que ayudan a mantener y solucionar estos problemas mediante el empleo de estándares internacionales como son ASME, IEEE, ISA y los estándares nacionales como la NOM. Sin embargo, las fallas de los equipos por una mala operación o mala evaluación del mismo, pueden llegar a provocar el retraso en la producción, incrementar los costos debido a un mayor consumo energético y hasta el paro completo de una línea de producción o una planta.

Por lo anterior, se propone desarrollar un modelo matemático que permita evaluar un equipo empleando estas técnicas o metodologías antes mencionadas, que proporcionen una mejor solución a los problemas que se enfrenta la industria manufacturera de la región del bajío, en particular del estado de Guanajuato (Barajas, 2004).

## Justificación

Con la globalización de los mercados, las empresas en el mundo se han visto obligadas a cumplir con estándares de calidad internacionales que les permita ser competitivas a nivel regional, nacional e internacional. Todas las organizaciones deben certificarse cumpliendo con los requisitos de la norma ISO 9001.

Para satisfacer los requerimientos que esta norma exige, es indispensable que las empresas cuenten con un apropiado plan de mantenimiento que les permita conservar sus equipos, herramientas e instalaciones en las mejores condiciones de funcionamiento.

Como en la mayor parte del proceso o aplicaciones operacionales, las tres principales áreas de consideración son la seguridad, la fiabilidad y el costo. El equipo mecánico requiere mantenimiento periódico; Por lo tanto, el mantenimiento debe incluir como cuarto motivo de preocupación.

El desgaste es una de las principales causas que hace necesario el mantenimiento de la maquinaria industrial.

Comparado con los otros dos problemas que ocasionan el reemplazo de máquinas y/o sus componentes como son la fatiga y la corrosión, el desgaste ha sido el menos estudiado y probablemente sea por esta razón, que aún no se ha constituido un cuerpo de conocimientos racional que permita predecirlo con cierto grado de exactitud.

En la actualidad, las bombas centrífugas conforman las piezas claves de la mayoría de los sistemas para manejo de fluidos; y por ser máquinas dinámicas, conformadas por una parte rotatorias y otra fija, forman parte de aquellos equipos cuyos componentes son bastante susceptibles a desgaste.

### Objetivos

Los objetivos desarrollados para este proyecto se muestran a continuación:

- Desarrollar diferentes modelos matemáticos para el diagnóstico de máquinas y equipos industriales en la plataforma EES (Engineering Equation Solver). La función básica proporcionada por el EES es la solución de un conjunto de ecuaciones algebraicas. Este también puede resolver ecuaciones diferenciales, ecuaciones con variables complejas, hacer la optimización, proporcionar regresión lineal y no lineal generar gráficos con calidad de publicación simplificar el análisis de incertidumbre y proporcionar animaciones.
- Hacer un análisis de los equipos industriales más usados en las industrias.
- Incrementar la vida útil de los equipos
- Desarrollar modelos matemáticos para el análisis de maquinaria y equipos industriales.

- Desarrollar nuevas metodologías para la evaluación y diagnóstico de máquinas y equipos industriales.

### Marco teórico

Los equipos industriales son un conjunto de objetos necesarios para desarrollar una actividad o trabajo de tipo industrial o para la industria (Avilés, 2009).

### Turbina

También llamada turbomáquina es una máquina cuyo elemento principal es un rotor a través del cual pasa un fluido de forma continua, cambiando éste su cantidad de movimiento por acción de la máquina, dándose así una transferencia de energía entre la máquina y el fluido, la cual puede ser en sentido máquina-fluido o fluido-máquina. En la figura 1 se muestran las partes de una turbina.

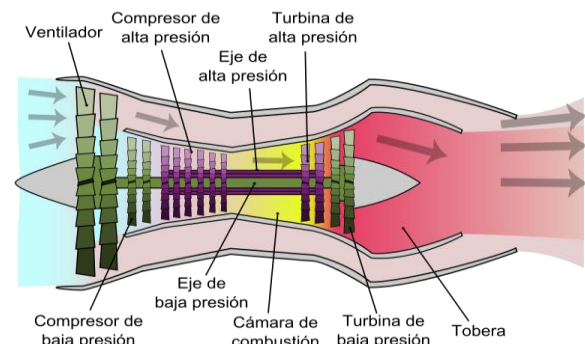


Figura 1 Partes de una turbina.

### Evaporador

Intercambiador de calor donde se produce la transferencia de energía térmica desde un medio a ser enfriado hacia el fluido refrigerante que circula en el interior del dispositivo, luego de una brusca expansión que reduce su temperatura. Durante el proceso de evaporación, el fluido pasa del estado líquido al gaseoso. En la figura 2 se muestran las partes de un evaporador.

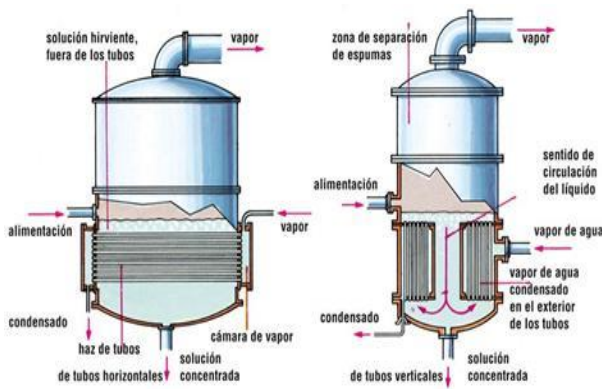


Figura 2 Partes de un evaporador.

Condensador

Es un intercambiador de calor entre fluidos, de modo que mientras uno de ellos se enfría, pasando de estado gaseoso a estado líquido, el otro se calienta. Se fabrican en tamaños y disposiciones diversas.

La función principal del condensador es ser el foco frío o sumidero de calor dentro del ciclo termodinámico, su misión principal es condensar el vapor que proviene del escape de la turbina de vapor en condiciones próximas a la saturación y evacuar el calor de condensación (calor latente) al exterior mediante un fluido de intercambio. En la figura 3 se muestra como está constituido un condensador.

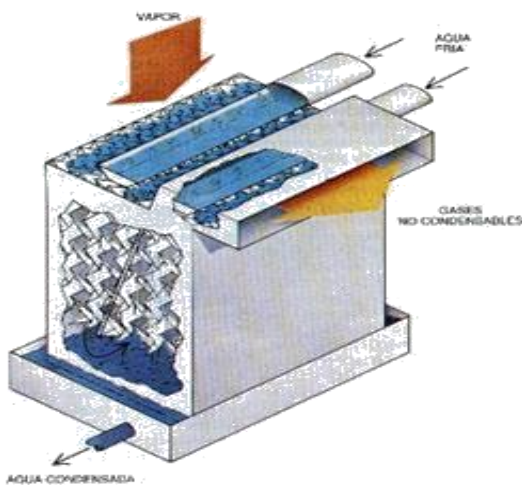


Figura 3 Condensador.

Bombas

Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Recibe energía mecánica, que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad.

Así se tienen bombas que se utilizan para cambiar la posición de un cierto fluido. Un ejemplo lo constituye una bomba de pozo profundo, que adicionan energía de presión sería una bomba en un oleoducto, en donde las cotas de altura, así como los diámetros de tuberías y consecuentemente las velocidades fuesen iguales, en tanto que la presión es incrementada para poder vencer las pérdidas de fricción que tuviesen en la conducción.

Siendo tan variados los tipos de bombas que existen, es muy conveniente hacer una adecuada clasificación. La que se considera más completa, y que se usara en este libro, es la del “Hydraulic Institute”, en su última edición. El mencionado Instituto tiene como miembros a más de cincuenta compañías de fabricantes de equipos de bombeo en el mundo entero y se ha preocupado por mantener al día los llamados “standards”, figura 4.

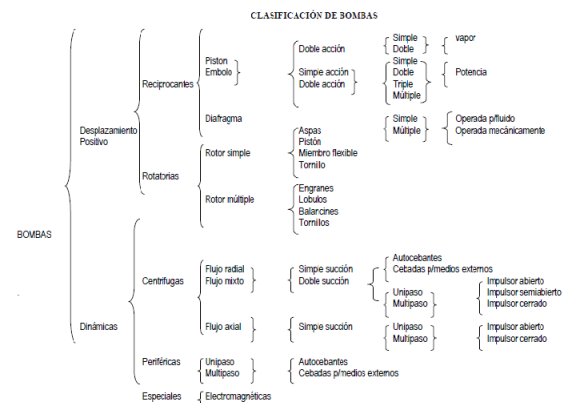
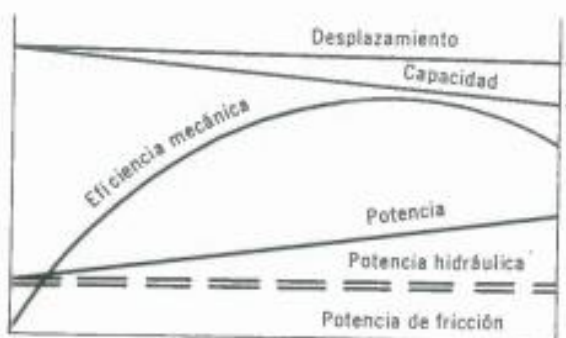


Figura 4 Clasificación de bombas.

## Funcionamiento de las bombas

La acción del bombeo es la adición de energías cinética y potencial a un líquido con el fin de moverlo de un punto a otro. Esta energía hará que el líquido efectúe trabajo, tal como circular por una tubería o subir a una mayor altura. Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial requeridas. Aunque la fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la punta de los alabes o periferia del impulsor y de la densidad del líquido, la cantidad de energía que se aplica por libra de líquido es independiente de la densidad del líquido. Por tanto, en una bomba dada que funcione a cierta velocidad y que maneje un volumen definido de líquido, la energía que se aplica y transfiere al líquido es la misma para cualquier líquido sin que importe su densidad, figura 5.



**Figura 5** Gráficas para una bomba rotatoria con velocidad.

**Desplazamiento:** El desplazamiento es la cantidad teórica de líquido que los elementos giratorios pueden desplazar sin carga o presión. En una bomba de engranes, por ejemplo, el desplazamiento es la suma de los volúmenes existentes entre los dientes.

**Deslizamiento:** Es la cantidad de líquido que regresa de la descarga a la succión, a través de los claros que existen entre los dientes y entre la pared lateral de los engranes y la carcasa.

**Gasto:** El gasto de la bomba es la cantidad de líquido que sale de ella, y es igual al desplazamiento de la bomba menos el retorno o recirculación. Teóricamente, el desplazamiento es una línea recta.

**Potencia:** En una gráfica, la variación de la potencia tiene la forma de línea recta. Para  $P = 0$  existen pérdidas de fricción. Al aumentar la presión aumenta la potencia al freno requerida. Esta depende de la viscosidad y la presión.

**Eficiencia:** La eficiencia de la bomba varía según el diseño de la misma, la viscosidad y otros factores. En general es mayor para bombas de alta presión.

Las bombas rotatorias pueden tener eficiencias muy altas tales como 80-85%, cuando manejan líquidos de viscosidad relativamente alta (10-15,000 SSU).

**Carga estática:** Es la altura, expresada en metros de líquido, de la columna de fluido que actúa sobre la succión (entrada) o descarga (salida) de una bomba.

**Carga estática de descarga:** Es la distancia vertical entre el eje central de la bomba y el punto de entrega libre del líquido.

**Carga estática total:** Es la distancia vertical entre los niveles de succión y descarga.

**Carga de fricción:** Es la columna, en metros, del líquido que se maneja, equivalente y necesaria para vencer la resistencia de las tuberías de succión y descarga y de sus accesorios. Varían de acuerdo con la velocidad del líquido, tamaño, tipo y condiciones anteriores de las tuberías y naturaleza del líquido que se maneja.

**Carga de velocidad:** Un líquido que se mueve a cualquier velocidad dentro de un tubo, tiene energía cinética debida a su movimiento. La carga de velocidad es la distancia de caída necesaria para que un líquido adquiera una velocidad dada y está dada por la ecuación (1).

$$hv = v^2/2g \quad (1)$$

$hv$  = Carga de velocidad en metros de líquido manejado.

$v$  = Velocidad del líquido en m/seg.

$g$  = Aceleración debida a la gravedad, en m/seg<sup>2</sup>.

**Elevación de succión:** Es la suma de la elevación estática de succión, de la carga de fricción de succión total y de las pérdidas de admisión (la elevación de succión es una carga de succión negativa).

**Carga de succión:** Es la carga estática de succión menos de la carga de fricción total y las pérdidas de admisión, más cualquier presión que se encuentre en la línea de succión. Es una presión negativa (hay vacío) y se suma algebraicamente a la carga estática de succión del sistema.

**Carga de descarga:** Es la suma de la carga de descarga estática, de la carga de fricción de descarga y de la carga de velocidad de descarga.

**Carga total:** Es la suma de las cargas de elevación de succión y descarga. Cuando hay una columna de succión, la columna total de la bomba es la diferencia entre las cargas de succión y descarga.

**Presión de vapor:** Si un líquido se encuentra a una temperatura arriba de su punto de congelación, sufre evaporación en su superficie libre. En el seno del líquido se origina una presión que se llama presión de vapor y que está en función directa con la temperatura del líquido.

**Presión de bombeo:** Al funcionar la bomba tiende a formar un vacío en el seno del líquido; este succionar se conoce como presión de bombeo.

**Carga neta positiva de succión (CNPS):** Es la presión disponible o requerida para forzar un gasto determinado, en litros por segundo, a través de la tubería de succión, al ojo del impulsor, cilindro o carcasa de una bomba. Se da en metros del líquido manejado equivalentes a la presión en kg/cm<sup>2</sup> requeridos para forzar el líquido a la bomba.

**CNPS disponible:** Esta depende de la carga de succión o elevación de la carga de fricción, y la presión de vapor del líquido manejado a la temperatura de bombeo. Si se varía cualquiera de estos puntos, la CNPS puede alterarse.

**CNPS requerida:** Esta depende solo del diseño de la bomba y se obtiene del fabricante para cada bomba en particular, según su tipo, modelo, capacidad, y velocidad.

Para un sistema dado, las pérdidas que se tienen en la carga (considerando la succión y descarga) por fricción, varían aproximadamente con el cuadro de la velocidad del líquido en el sistema. El análisis gráfico de un sistema se adapta igualmente a bombas centrifugas, rotatorias o reciprocantes.

Este análisis es necesario para conocer el punto en el cual trabaja una bomba y debe hacerse antes de investigar si las deficiencias del funcionamiento de un equipo se deben a los defectos mecánicos o de instalación (Viejo, 2006).

Curva de fricción de un sistema: Las pérdidas de carga por fricción en un sistema de bombeo son una función del tamaño del tubo, longitud, número y tipo de accesorios que lo integran, velocidad de flujo del líquido y, desde luego su naturaleza, figura 6.

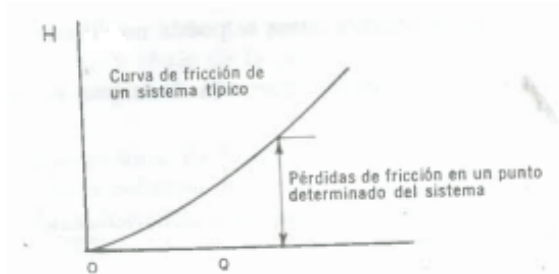


Figura 6 Curva de fricción de un sistema de bomba.

Curva de carga del sistema: Esta curva se obtiene al combinar la curva de fricción del sistema con la curva estática y con cualquier diferencia de presión del sistema. Si se superpone la curva H-Q de la bomba sobre la curva de la carga de carga del sistema, se obtendrá el punto en el cual trabaja una bomba determinada, en el sistema para el cual se ha trazado la curva (McNaughton, 1998).

Una bomba solo puede funcionar dentro de un sistema. Para entregar un volumen dado de líquido en este sistema, la bomba debe aplicar, al líquido, una energía formada por los siguientes componentes:

- Carga estática
- Diferencia en presiones en las superficies de los líquidos.
- Carga de fricción
- Perdida en la entrada y la salida

El rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga incluye tres factores básicos:

- 1) Capacidad (expresada en unidad de volumen por unidad de tiempo, como rpm)
- 2) Carga total (expresada en pies del líquido que se bombea)
- 3) Velocidad a la cual funciona la bomba (en rpm).

El rendimiento o “comportamiento” de la bomba se presenta en forma de curva en que la curva de carga contra capacidad se traza a una velocidad fija. La curva también indica el caballaje al freno requerido con diversos flujos y la eficiencia correspondiente de la bomba. La capacidad a la cual la bomba trabaja con más eficiencia se llama punto máximo de eficiencia (Best Efficiency Point).

El trabajo útil que hace una bomba es el peso del líquido bombeado en un periodo, multiplicado por la carga producida por la bomba y se expresa en términos de caballaje, llamados caballos de agua (WHP). Sería más correcto llamar a WHP caballos de líquido, que se determinan con (2).

$$\text{WHP} = (\text{QH}(\text{sp.gr.}))/3960 \quad (2)$$

WHP = Caballos de agua

Q = Capacidad de la bomba

H = Carga total, ft.

La potencia requerida para la propulsión de la bomba son los caballos de agua divididos entre la eficiencia  $n$  de la bomba. Por lo tanto al dividir la ecuación (2) entre esta  $n$  se tiene (3).

$$\text{WHP} = (\text{QH}(\text{sp.gr.}))/(\text{3960n}) \quad (3)$$

### Leyes de afinidad

Las relaciones que permiten predecir el rendimiento de una bomba a una velocidad que no sea la de característica conocida de la bomba, se llaman leyes de afinidad. Cuando se cambia la velocidad:

- 1) La capacidad  $Q$  en cualquier punto dado en la característica de la bomba varía directamente con la velocidad,  $n$ .
- 2) La carga  $H$  varía en razón directa al cuadrado de la velocidad.
- 3) El caballaje al freno  $P$  varía en razón directa al cubo de la velocidad

En otras palabras si se asigna el subíndice 1 a las condiciones en las cuales se conocen las características y el subíndice 2 denota las condiciones a alguna otra velocidad, entonces, (4), (5) y (6).

$$Q_2/Q_1 = n_2/n_1 \quad (4)$$

$$H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2 \quad (5)$$

$$P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3 \quad (6)$$

Estas relaciones se pueden utilizar sin peligro para cambios moderados en la velocidad.

Hay leyes de afinidad similares para los cambios en el diámetro  $D$  del impulsor, dentro de los límites razonables del impulsor, (7).

$$Q_2/Q_1 = D_2/D_1 \quad (7)$$

$$H_2/H_1 = (D_2/D_1)^2 \quad (8)$$

$$P_2/P_1 = (D_2/D_1)^3 \quad (9)$$

Ocurren ciertas desviaciones de estas leyes incluso con reducciones más o menos pequeñas.

El principio de la similitud dinámica, cuando se aplica a una bomba centrífuga indica que dos bombas de configuración similar tendrán características semejantes de funcionamiento. El término “velocidad específica” es el que relaciona los factores principales de las características de rendimiento: capacidad, carga y velocidad de rotación, en un solo término.

Si las condiciones de funcionamiento de una bomba a su velocidad de diseño, es decir, la capacidad, carga, eficiencia y entrada de potencia con las cuales la curva de eficiencia llega a su máximo, se considera como norma de 100% para comparación entonces las curvas de carga de capacidad, capacidad contra potencia y capacidad contra eficiencia se pueden trazar en términos del porcentaje de sus respectivos valores a la capacidad para máxima eficiencia. Este conjunto de curvas representa la curva “característica tipo” o curva del “100%” de la bomba (Pacheco, 2007).

Las curvas de 100% de bombas que tienen velocidades específicas de 2000, 4000 y 10000 aparecen en las siguientes figuras. Estas curvas se pueden utilizar para predecir la forma aproximada de las características de una bomba cuando se conoce la velocidad específica de ella. Para evitar la interpolación, las curvas de las figuras 8 y 9 muestran el cambio en la carga y la potencia en la relación con la velocidad específica para impulsores de succión sencilla. Un impulsor de doble succión tendrá una característica tipo que se aproximara a la de uno de succión sencilla que tenga una velocidad específica de  $(1/2)$   $1/2$  o sea 70.7% de la del impulsor de doble succión.



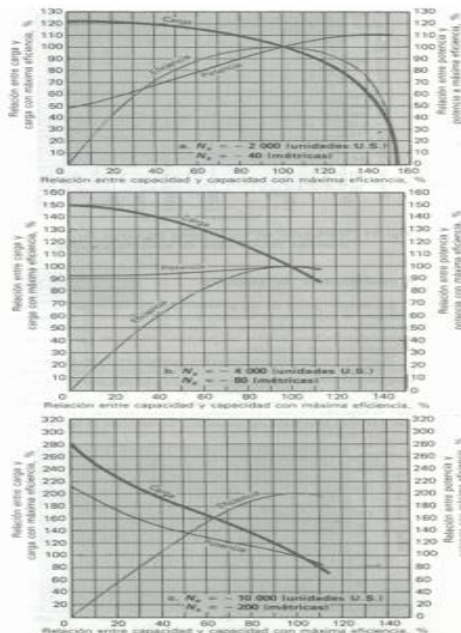


Figura 7 La velocidad específica determina la forma de las características de una bomba centrífuga.

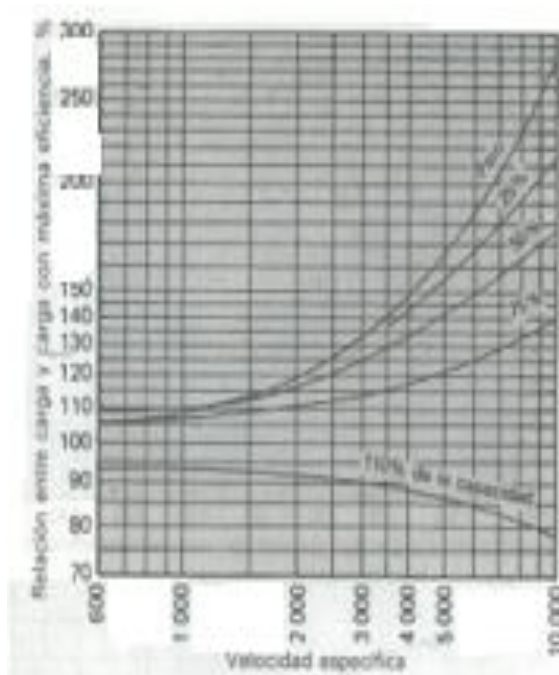


Figura 8 Variación en los valores de carga en bombas centrífugas de succión sencilla.

El rendimiento de la bomba se suele presentar con curvas (figura 10) y la curva de carga contra capacidad se traza a una velocidad fija. Las curvas también indican el cabalaje al freno requerido con diversos caudales y la eficiencia correspondiente.

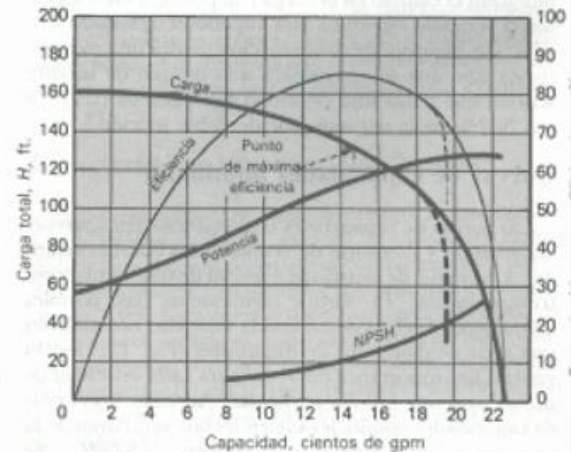


Figura 9 Características de rendimiento de una bomba centrífuga.

En la tabla 1 aparecen 14 clases diferentes de mal funcionamiento de bombas centrífugas, todas ellas se pueden agrupar en tres grupos: problemas hidráulicos reales, problemas mecánicos reales y problemas hidráulicos irreales.

1	La bomba no entrega liquido
2	Entrega menos liquido del esperado
3	No produce suficiente presión
4	La forma de la curva de carga y capacidad es diferente de la curva original de rendimiento
5	Pierde el cebado después del arranque
6	Consumo demasiada potencia
7	Tiene vibraciones
8	Esta ruidosa
9	Fugas excesivas por el prensaestopas
10	Corta duración del prensaestopas
11	Fugas excesivas por el sello mecánico
12	Corta duración del sello mecánico
13	Corta duración de los cojinetes
14	La bomba se sobrecalienta y se pega

Tabla 1 Lista de comprobación de problemas típicos con las bombas centrífugas.

Los problemas hidráulicos reales son cuando la bomba no puede funcionar de acuerdo con las especificaciones de capacidad, y eficiencia.

Pueden ser por fallas en la bomba o en su propulsor. Ciertos problemas hidráulicos, como la cavitación, pueden ocasionar el segundo tipo de problema que son los desperfectos mecánicos, los cuales se notan por síntomas como ruido, vibraciones, sobrecalentamiento y pueden llevar a mal funcionamiento hidráulico con lo que la bomba no cumple con los requisitos de rendimiento.

Los problemas irreales suelen ser hidráulicos y por lo general son el resultado de diseño y colocación incorrectos de la tubería y de procedimientos deficientes para pruebas. La corrección de estos problemas suelen ser más costosas que la de las dos primeras clases, por la dificultad para diagnosticarlas (McNaughton, 1998).

### **Pérdidas**

Todas las pérdidas de energía en la bomba entre las secciones de entrada y salida se clasifican en tres grupos:

a) Pérdidas hidráulicas: Disminuyen la energía especificada útil que la bomba comunica al fluido, es decir, la altura manométrica. Son de dos clases pérdidas de superficie y pérdidas de forma: las pérdidas de superficie se producen por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba (rodete, corona directriz) o de las partículas del fluido entre sí; las pérdidas de forma se producen por el desprendimiento de capa límite los cambios de dirección y en todas las formas difíciles de flujo, en particular en la entrada del rodete si la tangente del alabe no coincide con la dirección de la velocidad relativa a la entrada, o a la salida del rodete si la tangente del álabe de la corona directriz no coincide exactamente con la velocidad absoluta a la salida

b) Pérdidas volumétricas. Son pérdidas de caudal y se dividen en dos clases pérdidas interiores  $q_i$  y pérdidas exteriores  $q_e$ .

c) Pérdidas exteriores,  $q_e$ , constituyen una salpicadura de fluido al exterior, que escapa por el juego entre la carcasa y eje de la bomba que la atraviesa.

d) Pérdidas interiores,  $q_i$ , son las más importantes y reducen mucho el rendimiento volumétrico de algunas bombas. La explicación de estas pérdidas es la siguiente: a la salida del rodete hay más presión que a la entrada. Luego parte del líquido en vez de seguir a la caja espiral retrocederá, por el conducto que forma el juego del rodete con la carcasa, a la entrada del rodete, para volver a ser impulsado por la bomba. Este caudal llamado caudal corto circuito absorbe energía de la bomba.

e) Pérdidas mecánicas: Las pérdidas mecánicas se originan en:

- El rozamiento del prensaestopas con el eje de la máquina.
- El rozamiento del eje con los cojinetes.
- El rozamiento del disco. Se llama así al rozamiento de la pared del exterior del rodete con la atmósfera líquida que le rodea. Es decir, el rodete esquemáticamente es un disco que gira en el interior de una caja en cuyo interior circula fluido; el disco al girar en una atmósfera viscosa donde se produce un rozamiento que incluimos e las pérdidas mecánicas y donde se denomina pérdida de rozamiento.

## Metodología

Un ensayo de una bomba es aquel en que, manteniéndose constante el número de revoluciones,  $n$ , se varia el caudal,  $Q$ , y se obtienen experimentalmente las curvas. Siendo la ultima una herramienta útil en nuestro cálculo.

$H_m = f(Q)$ : Curva de altura manométrica contra flujo volumétrico.

$N_a = f(Q)$ : Curva de potencia al freno contra flujo volumétrico.

$\eta_t = f(Q)$ : Curva de eficiencia contra el flujo volumétrico.

Las consideraciones de similitud en las turbomáquinas hidráulicas tienen por objeto describir el funcionamiento de cierta máquina, por comparación con el funcionamiento experimental de otra máquina o modelo con geometría similar, o para la misma máquina, a la cual se le han cambiado algunas características tal como la velocidad (Correas, 2001).

Se enuncian algunas de estas relaciones, suponiendo que los gastos, flujos volumétricos, y las alturas manométricas son aquellas que permiten obtener la eficiencia máxima. Se designa con “y” a las bombas que en este caso son una misma pero funcionando en condiciones distintas. Variando el número de revoluciones el número de revoluciones de una bomba se obtiene:

- Los caudales son directamente proporcionales al número de revoluciones, (10).

$$Q'/Q'' = n'/n'' \quad (10)$$

- Las alturas manométricas son directamente proporcionales a los cuadrados de los números de revoluciones, (11).

$$H_m'/H_m'' = (n'/n'')^2 \quad (11)$$

- Las potencias son directamente proporcionales a los cubos de los números de revoluciones, (12).

$$N_a'/N_a'' = (n'/n'')^3 \quad (12)$$

## Descripción de la herramienta

Desde hace varios años, se ha venido incrementando el uso de herramientas computacionales para el análisis de equipo de trabajo continuo como son: motores eléctricos, calentadores, turbinas entre otros; que permiten tener en buenas condiciones los equipos y además poder programar el apropiado mantenimiento de ellos o reparación si ese fuera el caso.

Bajo este escenario, se ha desarrollado una herramienta computacional para el análisis de bombas centrifugas. Dicha herramienta permite al usuario analizar el desempeño de la bomba mediante el análisis de las curvas de comportamiento en sus condiciones de diseño, referencia y operación real.

Se presenta el desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de bombas centrifugas. Dicha herramienta permite al usuario analizar el desempeño de la bomba mediante el análisis de las curvas de comportamiento en sus condiciones de diseño, referencia y operación. Para realizar el análisis es necesario que el usuario alimente la herramienta con la información faltante y necesaria de acuerdo a la norma ASME PTC 8.2 (ASME, 1990) y bajo las condiciones de calibración especificadas en la misma norma, para eliminar los posibles errores en los resultados debidos a una mala calibración o adquisición errónea de las señales.

El sistema tiene que ser anticipadamente alimentado con los polinomios de las curvas de comportamiento de la bomba en sus condiciones de diseño, para posteriormente corregir el comportamiento en función de su velocidad de operación actual. La curva corregida por similitud en función de las velocidades de operación, representan el comportamiento esperado si la bomba no tuviera ninguna otra malfunción como: deterioro, rotura, ensuciamiento, etc.

Este desarrollo se realizó en Visual Basic (Halvorson, 1998) y en plataforma EES. Además de las curvas de comportamiento de diseño y referencia, la herramienta posiciona el punto de operación real de la bomba para que pueda ser comparado con sus condiciones esperadas, indicando al usuario las condiciones de operación real de la bomba sobre el desempeño esperado sin tener que comparar con las condiciones de diseño.

### Nomenclatura

QD: Flujo de caudal de diseño  
 QC: Flujo de caudal de diseño corregido  
 RPMBAP: Velocidad actual  
 RPMBA: Velocidad de un diseño  
 HDTBA: Altura dinámica de un diseño  
 HDTC: Altura dinámica corregida  
 BHPBA: Potencia al freno  
 WBA: Potencia en diseño  
 ETABA: Eficiencia del impulsor  
 G47P: Flujo de agua de alimentación

El análisis de las bombas centrifugas se realiza por medio de modelos matemáticos ejecutados en EES, en función de los polinomios que determinan el comportamiento de las variables correspondientes, en función del valor del caudal de bombeo o las revoluciones de trabajo de la bomba.

Por ejemplo, para el análisis de una bomba de agua de alimentación de una central termoeléctrica, los polinomios que interviene en su análisis se muestran en las ecuaciones siguientes, (13, 14, 15).

### Altura Dinámica Total, (m)

$$HDTBA=2575.25473+1.92686557*QD-0.0726980303*QD^2+0.00115071589*QD^3-0.000089323365*QD^4+3.03354598E-08*QD^5-3.81543079E-11*QD^6 \quad (13)$$

### Eficiencia de la bomba, (%)

$$ETBA=0.027424568+1.12844503*QD-0.00750989122*QD^2+0.0000475637921*QD^3-2.45083789E-07*QD^4+7.02509309E-10*QD^5-8.24729045E-13*QD^6 \quad (14)$$

### Potencia al freno de la bomba, (kW)

$$WBA=1903.54199+21.4142844*QD-0.236481835*QD^2+0.00313374513*QD^3-0.0000203627097*QD^4+6.28257255E-08*QD^5-7.47770658E-11*QD^6 \quad (15)$$

Los polinomios son evaluados tanto en el software EES como dentro de la herramienta de diagnóstico y sus resultados son usados para determinar el valor de la variable, tal como se muestra en la tabla 2.

Rango de evaluación	Puntos de evaluación
0	0.000
10	25.236
20	50.472
30	75.708
40	100.944
50	126.180
60	151.416
...	176.652
...	201.888
...	227.124
...	252.360
...	277.596
300	282.643

**Tabla 2** Rangos y puntos de evaluación del caudal de diseño "QD", (L/S).

Los valores obtenidos son utilizados para construir la gráfica del comportamiento de la bomba para cada uno de los polinomios se obtiene las gráficas de las curvas de similitud a partir de las ecuaciones de corrección las cuales se muestran a continuación:

- 1) Se corrige el caudal o flujo en función de la velocidad de la bomba en su condición de operación actual, (16).

$$QC=QD*(RPMBA/RPMBAP) \quad (16)$$

- 2) Una vez corregido el caudal en función de la velocidad de operación, se corrige la altura dinámica total para la nueva condición de referencia, (17).

$$HDTC=HSTBA*(RPMBA/RPMBAP)^2 \quad (17)$$

- 3) La potencia corregida (o de referencia) se puede obtener haciendo la corrección por velocidad o haciendo uso de la altura corregida, (18).

$$BHPBAR=BHPBA*(HDTC/HDTBA)^{3/2} \quad (18)$$

De (17) se sustituye en (18) se obtiene la ecuación reducida, (19).

$$BHPBAR=BHPBA*(RPMAP/RPMBA)^3 \quad (19)$$

El logaritmo seguido para el cálculo de las curvas y de los puntos de interés tiene el siguiente procedimiento:

- Se establecen los arreglos necesarios para los coeficientes de los polinomios de diseño y para los polinomios corregidos en función de las ecuaciones de corrección previamente definida.
- Se evalúa el polinomio entre el valor mínimo y el valor máximo de la variable independiente definida previamente.

- Se grafican las curvas y los puntos de interés de acuerdo al diagnóstico efectuado al equipo en cuestión los cuales son previamente definidos.

**Resultados**

El sistema manual tiene que ser anticipadamente alimentado con los polinomios de las curvas de comportamiento en función de su velocidad de operación actual. Para poder subir los polinomios se desarrolló una interface que permite introducir los polinomios de forma manual o por medio de un archivo de texto (\*.txt) con el formato necesario para identificar los datos del polinomio. La figura 10 muestra un archivo de texto con el formato requerido para polinomios y cargarlos al sistema.

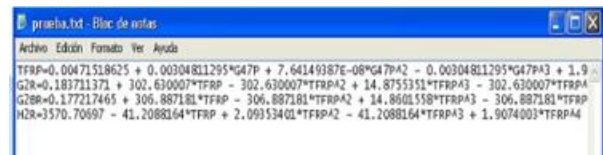


Figura 10 Formato del archivo .txt.

De esta manera, el algoritmo determina la variable dependiente, la variable independiente y los coeficientes del polinomio, posteriormente se procede automáticamente a registrarlos en una tabla de la base de datos. Esto se hace a través de interface desarrollada en Visual Basic (Wang, 1998) y mostrada en la figura 11.

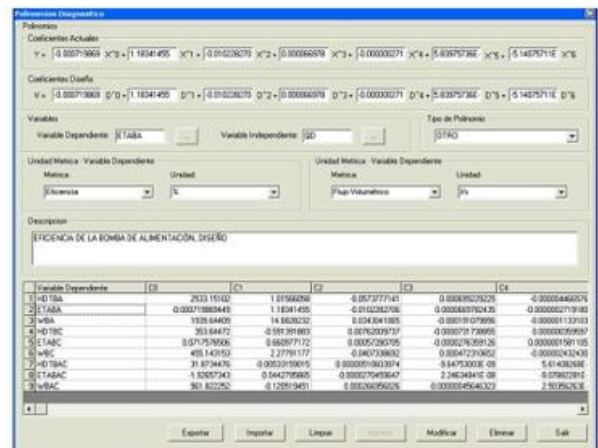


Figura 11 Interface para cargar polinomios.

Una vez que los polinomios se dan de alta en la base de datos, se procede a realizar la configuración de las variables y su relación con los polinomios que sirven para el análisis del equipo en cuestión, esto se realiza con la ayuda de una interface diseñada para este propósito tal como se muestra en la figura 12.

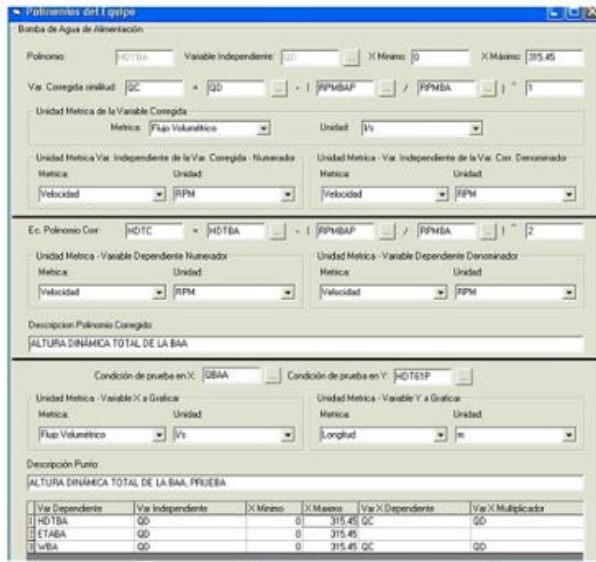


Figura 12 Interface para variables del equipo.

El sistema, una vez alimentado con los polinomios de las curvas de comportamiento de la bomba en sus condiciones de diseño, y el usuario o el sistema mismo alimenta los valores requeridos: P60P, T60P, P61P, G47P, G122P, y dejando al usuario la introducción del valor de RPMBAP.

Se realiza la evaluación de las condiciones de diseño del equipo, posteriormente se corrige el comportamiento de esta en función de su velocidad de operación actual y finalmente se realiza la validación de las condiciones de operación actual para obtener las condiciones necesarias que permiten realizar el diagnóstico del equipo. Estos valores son mostrados por la interface diseñada para este propósito como se muestra en la figura 13.

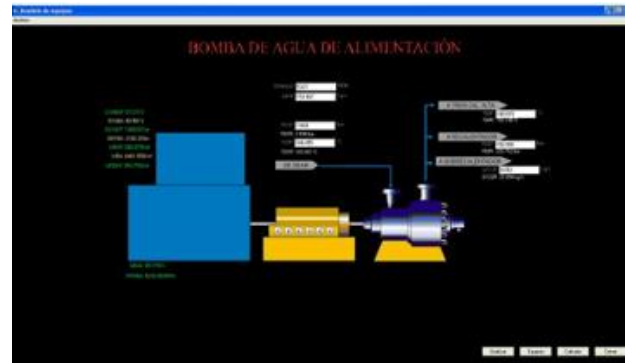


Figura 13 Interface para el análisis de la bomba de alimentación.

Como resultado del diagnóstico para la bomba de alimentación, los resultados de las variables mostradas son: ETABAP, ETABA, HDT61P, HDTBA, WBAP, WBA, WEBAP, QBAA y RPMBA.

En la parte inferior de la interface aparece un botón “Graficar”, al presionarlo se abre una nueva ventana en donde se presentan las curvas de comportamiento del equipo en sus diferentes condiciones de operación, así como el punto de operación real. La figura 14 muestra el resultado obtenido de un análisis de la bomba de alimentación.

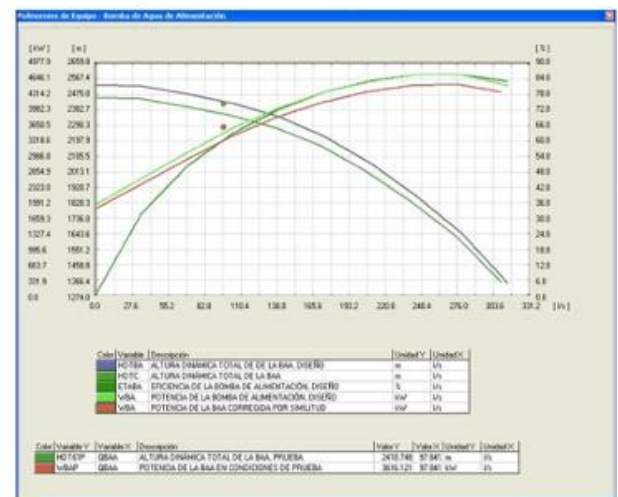
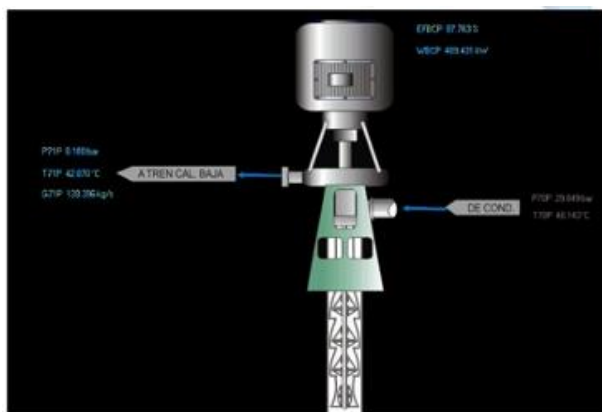


Figura 14 Interface de las curvas del análisis de la bomba.

Los datos representados en la interface antes mencionada son: EFBAP, WBAP, P60AP, T6P, G60P, P25P, T61P, G61P, G123P y G122P, como se muestra en la figura 15.



**Figura 15** Interface del sistema en línea.

## Conclusiones

Este desarrollo se realizó en Visual Basic (Birnos, 1999) y en plataforma EES (F-Chart, 203). Además de las curvas de comportamiento de diseño y referencia, la herramienta posiciona el punto de operación real de la bomba para que pueda ser comparado con sus condiciones esperadas, indicando al usuario las condiciones de operación real de la bomba sin tener que comparar con las condiciones de diseño debido a que no se cuenta en forma manual con la curva de referencia corregida por similitud.

Con este desarrollo, se tiene una herramienta con dos funciones importantes: una herramienta que realiza un diagnóstico del equipo en tiempo real proporcionando información básica que permite una toma de decisión al momento y una herramienta que permite establecer las condiciones óptimas de la operación de la bomba en forma manual, permitiendo al usuario realizar múltiples simulaciones hasta llegar al resultado deseado.

Este desarrollo es parte integral de una herramienta de diagnóstico termoeconómico de sistemas energéticos, específicamente para centrales termoeléctricas y la información obtenida es parte complementaria de los resultados del diagnóstico termoeconómico, ya que el usuario puede identificar la causa de la malfunción para su inmediata corrección o para su programa de mantenimiento con el conocimiento específico del problema real de la bomba. Este desarrollo que implementado en una central termoeléctrica de ciclo convencional ubicada en el centro del país y perteneciente al parque termoeléctrico de la CFE (Avilés, 2009).

## Referencias

- AVILÉS FERRERA, J. J. (2009). Desarrollo de base de datos e interfaces de una herramienta de monitoreo y diagnóstico termoeconómico (Tesis de Licenciatura). Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México.
- ASME. (1990). Centrifugal Pumps. American Society of Mechanical Engineers Performance Test Code 8.2.
- BARAJAS ZAMORA, V. M. (2004). Software de Diagnóstico y Evaluación de Instrumentación de Plantas Termoeléctricas (Tesis de Licenciatura). Universidad de Guanajuato, Salamanca Guanajuato, México.
- BIRNIOS, B; BIRNOS M. (1999). Manuales Compumagazine: Microsoft Visual Basic 6.0, Manual de referencia. Argentina: MP Ediciones.
- CORREAS USÓN, L. C. (2001). Diagnóstico Termoeconómico de la Operación de un Ciclo Combinado (Tesis Doctoral). Universidad de Zaragoza, España.

F-CHART SOFTWARE. (2003). Manual de EES - Engineering Equation Solver for Microsoft Windows Operating System - Comercial and Profesional Versions. (<http://www.fchart.com>). S. A. Klein. USA.

HALVORSON, M. (1998). Step by Step: Microsoft Visual Basic 6.0 Profesional. EE.UU: Microsoft Press.

MCNAUGHTON, K. (1998). Bombas. Selección, uso y mantenimiento. México, DF: Mc Graw-Hill.

MICROSOFT. (1998). Programa de entrenamiento académico: Mastering Microsoft Visual Basic 6 Development. Manual del estudiante. EE.UU: Microsoft Press.

PACHECO IBARRA, J. JESUS. (2007). Desarrollo de una Metodología para el Diagnóstico Termoeconómico de Sistemas Energéticos Avanzados (Tesis Doctoral). Universidad de Guanajuato, Salamanca Guanajuato, México.

VIEJO ZUBICARAY, M; ALVAREZ FERNANDEZ, J. (2006). Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones. México: Limusa, Noriega.

WANG, W. (1998). Visual Basic 6 for Dummies. EE.UU: IDG Books WorldWide.