

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN

TESIS

“METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN EN HYSYS DE
UNA BOMBA CENTRÍFUGA EN EL COMPLEJO
PETROQUÍMICO CANGREJERA”

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

PRESENTA:

Ing. Ysmael Ramírez Jiménez

ASESOR:

Dr. ROBERTO RAMÍREZ MESA.



MINATITLÁN, VER.

ENERO 2012

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN



Minatitlán, Ver., 23/ENERO/2012
DIV. DE EST. DE POSGRADO E INVEST.
OFICIO No. DEPI-TIT-021-2012

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

ING. YSMAEL RAMÍREZ JIMÉNEZ
PRESENTE

Después de haber satisfecho los requisitos establecidos en el procedimiento académico para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería en los Institutos Tecnológicos, y de conformidad con el H. Comité Revisor, es grato autorizarle la impresión de su Tesis:

“METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN EN HYSYS DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA EN EL COMPLEJO PETROQUIMICO CANGREJERA”

ATENTAMENTE


ING.. FLOR DE AZALIA LÓPEZ ROBLES
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN



Boulevard Institutos Tecnológicos S/N, Col. Buena Vista Norte, C. P. 96848, Minatitlán, Veracruz
Teléfono (01 922) 22 243 45, 22 2 43 39, Fax 22 243 36, e-mail: dirección@itmina.edu.mx
<http://www.itmina.edu.mx>



DEDICATORIA

DEDICATORIA

A mi esposa:

ORALIA MENDEZ JIMENEZ, por el gran apoyo y comprensión que me brindó para realizar esta maestría, y por el ánimo insistente para la realización de este proyecto.

A mis hijos:

JAZMIN Y JESÙS DAVID, por su comprensión al privarlos de mi compañía, aunque saben que dios estuvo con ellos, los quiero mucho.

A mi padre:

FELICIANO RAMIREZ JIMENEZ, por la paciencia y amor demostrado a lo largo de mi vida, gracias te llevo en mi corazón siempre, perdóname por no poder estar todos los días a tu lado.

A todos mis hermanos y amigos

AGRADECIMIENTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a dios por darme el don de la vida, el tiempo, la sabiduría para el inicio y la conclusión de esta maestría.

Agradezco al Instituto Tecnológico de Minatitlán por darme la oportunidad de realizar mis estudios en sus instalaciones, así como a su plantilla administrativa por su atención.

Agradezco al Complejo Petroquímico Cangrejera de Coatzacoalcos Veracruz por su atención y apoyo en la realización de esta investigación en las Instalaciones de esta planta.

Agradezco a mi asesor de Tesis y maestros:

Dr. Roberto Ramírez Mesa por su disponibilidad y paciencia en el desarrollo de este trabajo, así como a: Dr. Lázaro Valentín García Aguilar, Dr. Hernando Romero Paredes Rubio, MC. Arturo Casados, MC. René Yamamoto Arana, MC. Andrés Álvarez Alvarado.

A mis compañeros de estudios.

Por su sincero apoyo en los momentos de dificultades de salud y por animarme a la conclusión de este proyecto.

RESUMEN

RESUMEN

La finalidad de este trabajo es ofrecer una metodología para evaluar en HYSYS una bomba centrífuga en el Complejo Petroquímico Cangrejera, con la intención de que en un futuro se pueda implementar a nivel de Pemex Petroquímica.

El trabajo se fundamenta en el desarrollo de un análisis energético basado en la Primera Ley de la Termodinámica, con el propósito de determinar el funcionamiento óptimo de dicho sistema de un proceso.

Esto proporciona un panorama de las áreas de mejora del proceso a través del uso eficiente de la energía, cuales son las secciones ó áreas del proceso donde existen los mayores costos operativos y así determinar el potencial de optimización del proceso.

El trabajo experimental se llevo a cabo en la Petroquímica durante los meses de enero – mayo de 2011 y la simulación y modelado matemático desde octubre a diciembre del mismo año.

Se determinó además la curva de NPSH disponible del sistema de operación de la bomba así como el modelo matemático que lo describe.

Para el desarrollo del modelo se utilizó el programa HYSYS de ASPEN Plus y estadística para EXCEL.

ABSTRACT

ABSTRACT

The purpose of this paper is to provide a methodology to assess the HYSYS a centrifugal pump Cangrejera Petrochemical Complex, with the intention that in future can be implemented at the level of PEMEX Petrochemicals.

The work is based on the development of an energy analysis based on the First Law of Thermodynamics, in order to determine the optimal functioning of the system of a process.

This provides an overview of the areas of process improvement through the efficient use of energy, what are the sections or areas of the process where there are higher operating costs and determine the potential for process optimization.

It also determines the available NPSH curve system pump operation and the mathematical model that describes it.

To develop the program model was used HYSYS and ASPEN Plus statistical EXCEL

ÍNDICE

ÍNDICE

Introducción.....	1
-------------------	---

CAPITULO I. GENERALIDADES DEL COMPLEJO PETROQUIMICO CANGREJERA

1.1 Descripción de la Empresa.....	4
1.2 Localización.....	4
1.3 Distribución de los Procesos.....	4
1.4 Visión.....	5
1.5 Misión.....	5
1.6 Política.....	6
1.7 Comercialización de productos.....	6
1.8 Planta de Servicios Auxiliares.....	7

CAPITULO II. TEORIA SOBRE CAVITACIÓN Y BOMBAS

2.1 NPSH.....	11
2.2 NPSH Requerida.....	11
2.3 NPSH Disponible.....	12
2.4 Cavitación.....	12
2.5 Cavitación de Succión.....	17
2.6 Cavitación de descarga.....	17
2.7 Plantas.....	18
2.8 Clasificación de las bombas.....	18
2.9 Bombas Centrífugas.....	18
2.10 Aplicaciones de las Bombas Centrífugas.....	19
2.11 Bombas Rotatorias.....	19
2.12 Bombas Reciprocantes	21

2.13 Bombas de Desplazamiento positivo.....	23
2.14 Bombas centrífugas .Principios y Selección.....	24
2.14.1 Aplicación.....	24
2.15 Sistema.....	25
2.16 Principios Fundamentales.....	28
2.17 Selección.....	31

CAPITULO III. FUNDAMENTOS DE MODELACION

3.1 Introducción.....	39
3.2 Modelo Icónico.....	43
3.3 Modelo Analógico.....	43
3.4 Modelo Teórico.....	43
3.5 Característica de los Modelos.....	44
3.6 Modelación de Procesos.....	45
3.7 Concepto de Procesos.....	45
3.8 Definiciones y características de un Modelo.....	48
3.9 Importancia de modelar un negocio.....	49
3.10 Fases de la modelación.....	50
3.11 Lenguajes y herramientas de la modelación.....	51
3.12 Sistemas de información.....	56

CAPITULO IV. MODELACIÓN DE LA BOMBA P 100 A/B

4.1 Desarrollo del modelo.....	60
4.2 Suministro de agua cruda.....	60
4.3 Estudio de la bomba centrífuga.....	60
4.4 Método experimental.....	61
4.5 Fórmulas Aplicadas.....	61
4.6 Datos Experimentales.....	63

4.7 Datos del Fabricante.....	64
4.8 Metodología y resultados de la Simulación en HYSYS de la bomba P 100A/B.....	64
4.9 Resultados obtenidos.....	70
4.10 Gráficos obtenidos.....	71
4.11 Modelo Matemático obtenido.....	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFIA.....	75

INTRODUCCIÓN

Es de vital importancia para PEMEX PETROQUIMICA reducir los costos de operación de las Plantas de Proceso en los Centros de Trabajo y para lograr esto se requiere hacer un uso eficiente de la energía y de la materia prima, sin embargo estas acciones tienen un límite establecido por la tecnología utilizada y por el tiempo que las plantas llevan operando, esto nos lleva a mirar hacia el suministro de energía, los Servicios Auxiliares y la pregunta es:

¿Se hace un uso eficiente de las bombas centrífugas?, ¿Se evalúa adecuadamente?

Para contestar adecuadamente las preguntas expuestas se requiere una metodología que considere el uso eficiente de la energía, que detecte las ineficiencias del proceso como áreas de oportunidad y evalúe los beneficios a obtener al desarrollar proyectos de mejora y que determine los costos de las corrientes portadoras de energía.

Como es del conocimiento de la industria entre mayor sea la presión y temperatura del vapor mayor es la cantidad de energía que se requiere, específicamente gas combustible en las calderas, por lo que el costo de producción del vapor está directamente relacionado con su presión y su temperatura, en otras palabras a su contenido energético.

Con la finalidad de evaluar el desempeño de las bombas centrífugas se propone un modelo que ayuda a identificar las áreas donde se presentan las mayores deficiencias de un proceso (áreas de oportunidad), que permitirá determinar en sus diferentes niveles de presión y temperatura, las eficiencias.

En el capítulo uno se hace una breve descripción del complejo Petroquímico Cangrejera donde se llevo a cabo este trabajo y que en la actualidad gracias al apoyo del personal de la planta de Servicios Auxiliares está operando con gran satisfacción del personal directivo pues de una rápida mirada pueden conocer en términos económicos como opera en ese día la planta.

El capítulo dos nos ayuda a recordar algunos de los principios de las bombas y la cavitación. En el capítulo tres se muestra el desarrollo de la metodología. Para que en el siguiente capítulo se presenten las imágenes que presenta el programa realizado en HYSYS y los resultados.

El objetivo de la presente Tesis es Desarrollar una metodología en HYSYS que permita evaluar el comportamiento energético de una bomba centrífuga a diferentes cargas de sustancia.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DEL COMPLEJO

PETROQUÍMICO CANGREJERA

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO CANGREJERA.

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.

PEMEX es la empresa más grande de México y una de las diez más grandes del mundo. PEMEX está integrado por un corporativo y ocho centros de trabajo.

El Complejo Petroquímico Cangrejera depende directamente de PEMEX Petroquímica. Es un complejo integrado cuyo propósito es elaborar, distribuir y comercializar productos petroquímicos secundarios de calidad (4).

Inició su construcción en el año de 1973 y su operación comenzó en 1980 con una infraestructura original de 20 plantas de proceso. El área que ocupa el complejo es de 305 hectáreas y se localiza a 8 kilómetros de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz.

1.2. LOCALIZACIÓN.

La zona industrial donde opera el Complejo Petroquímico Cangrejera es denominada “El Emporio Petroquímico de Latinoamérica”, se ubica al sur del Estado de Veracruz en la cuenca del Istmo de Tehuantepec a 18° 09' latitud norte y 94° 26' longitud oeste, al este de la ciudad de Coatzacoalcos, a 10 metros de altura sobre el nivel del mar

1.3. DISTRIBUCIÓN DE PROCESOS.

Las plantas de proceso se dividen en tres sectores

- 1.3.1. Etileno y derivados.
- 1.3.2. Aromáticos.
- 1.3.3. Plantas químicas.

La operación de estas plantas depende del funcionamiento de servicios auxiliares, tratamiento de efluentes, talleres de mantenimiento, laboratorios, bodegas así como instalaciones de servicios administrativos y contraincendio.

La cadena del Etileno y sus derivados está formada por las plantas de Etileno, Polietileno de Baja Densidad y Silos de Polietileno.

La cadena de aromáticos comprende las plantas Reformadora B.T.X., Fraccionadora de Aromáticos, Transformadora de Aromáticos y Cristalización de Paraxilenos. Los principales productos son Benceno, Tolueno, Paraxileno, Ortóxileno y Xilenos 5°, Pentanos, Gasolinas, Isohexano y Gas Nafta

La cadena de plantas químicas la conforman la planta de Óxido de Etileno, la planta de Etilbenceno-Estireno y la planta de Oxígeno. Los productos principales son Óxido de Etileno, Estireno, Oxígeno y Nitrógeno. El Oxígeno se consume en la planta de Óxido de Etileno y el Nitrógeno se envía a plantas para su consumo.

Para proporcionar energía a los procesos antes mencionados se cuenta con un área de servicios auxiliares el cual suministra la energía eléctrica, vapor en sus distintos niveles de presión y temperatura, dependiendo de la necesidad del proceso y agua de enfriamiento principalmente.

1.4. VISIÓN.

La visión del Complejo Petroquímico Cangrejera, consiste en consolidarse como empresa rentable, flexible, competitiva y líder de la industria petroquímica nacional. Incrementando nuestra participación en el mercado como proveedor confiable con una arraigada cultura de calidad y la seguridad. Promoviendo el desarrollo integral de nuestro personal así como la actualización continua de los procesos e instalaciones con tecnología de punta y la preservación de la comunidad.

1.5. MISIÓN

Nuestra misión consiste en elaborar, distribuir y comercializar productos petroquímicos para generar el máximo valor económico, garantizando la demanda y satisfacción de nuestros clientes, mediante los activos y el personal que nos conforma, con el firme compromiso de mantener y mejorar la cultura de seguridad

establecida, con el absoluto respeto al medio ambiente y promoviendo el desarrollo integral de nuestros trabajadores.

1.6. POLÍTICA

La política del Sistema de Gestión Integral del Complejo Petroquímico Cangrejera, empresa líder en elaboración de productos petroquímicos, fundamenta sus operaciones con el compromiso de todo su personal; asegurando el cumplimiento de requisitos y la satisfacción de nuestros clientes a través de nuestro sistema de gestión integral, con el firme propósito de mejorar continuamente su eficacia, estableciendo objetivos y metas.

Para lograr lo anterior nos comprometemos a:

- El cumplimiento a la legislación y otros ordenamientos aplicables.
- El uso racional de los recursos naturales.
- La prevención y control de los impactos ambientales.
- La atención de los requerimientos de seguridad y salud ocupacional, derivados de nuestros procesos.
- Crear un ambiente laboral propicio, con la responsabilidad de mantener la integridad del personal, de las instalaciones y el cuidado de la comunidad.

1.7. COMERCIALIZACIÓN DE PRODUCTOS.

La distribución de los productos del Complejo Petroquímico Cangrejera se realiza a través de auto tanques y tolvas en 45%, ductos en 40%, buque tanques en 8% y de carro tanques en 7%.

La Empresa tiene una amplia capacidad de almacenamiento de sus productos, los volúmenes son los siguientes:

- Benceno 30,000 barriles
- Estireno 30,000 barriles
- Heptano – Hexano 13,000 barriles
- Óxido de Etileno 24,000 barriles

- Polietileno B. D. 13,000 toneladas
- Tolueno 40,000 barriles

Los principales usos de los productos elaborados en el Complejo Petroquímico Cangrejera son para la elaboración de los siguiente productos, entre ellos destacan los pesticidas, fibras sintéticas, cosméticos, extracción de aceites, industria llantera, elastómeros, teléfonos, resinas epóxicas, resinas poliéster, bolsas, juguetes, farmacéuticos, detergentes entre otros.

1.8.– PLANTA DE SERVICIOS AUXILIARES.

La planta de Servicios Auxiliares esta conformada por tres grandes bloques, el primero es el de tratamiento de agua cruda, cuyo proceso se inicia en la presa cangrejera la cual tiene una capacidad de captación de 18.5 millones de metros cúbicos, el agua se envía a través de bombeo a los vasos de captación a razón de 84,000 metros cúbicos por día para llegar al área de pretratamiento de agua con un flujo de 54,000 metros cúbicos por día, después de recibir pretratamiento el flujo de agua se divide en dos partes, de las cuales una parte se envía a las torres de enfriamiento las cuales proporcionan 23,000 m³ de agua de enfriamiento a procesos. La otra parte del flujo se canaliza a la unidad desmineralizadora, cuya función es eliminar los minerales para que estos no dañen las calderas. Para iniciar el siguiente proceso que es el de generación de vapor, el agua proveniente de la unidad desmineralizadora se divide en tres caudales uno de 5000 m³ por día entra a las calderas de alta para producir 19,000 toneladas por día de vapor a 60 kg/cm². Otro caudal de 5,600 m³ por día entra a las calderas de baja para generar 27,000 toneladas por día de vapor a 45 kg/cm², por último un caudal de 5,400 m³ por día es enviado a proceso. El vapor generado por las calderas de alta es enviado a la planta de generación eléctrica donde los turbogeneradores se encargan de transformar las 19,000 toneladas de vapor en 144 Mw/hr. de energía eléctrica la cual se distribuye a todo el complejo.

La figura 1. representa de manera general todo el proceso que representa el obtener energía eléctrica y vapor, y la figura 1. Representa de manera esquemática la planta de generación de energía eléctrica.(16)

Petroquímica Cangrejera: servicios esenciales

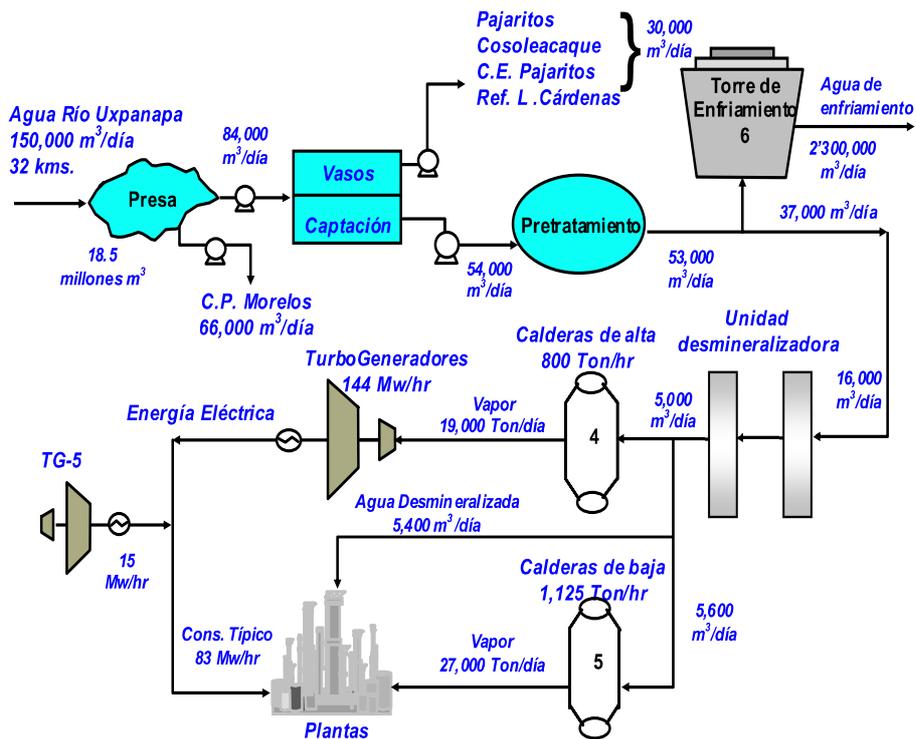


Figura 1. Diagrama esquemático de Servicios Auxiliares.

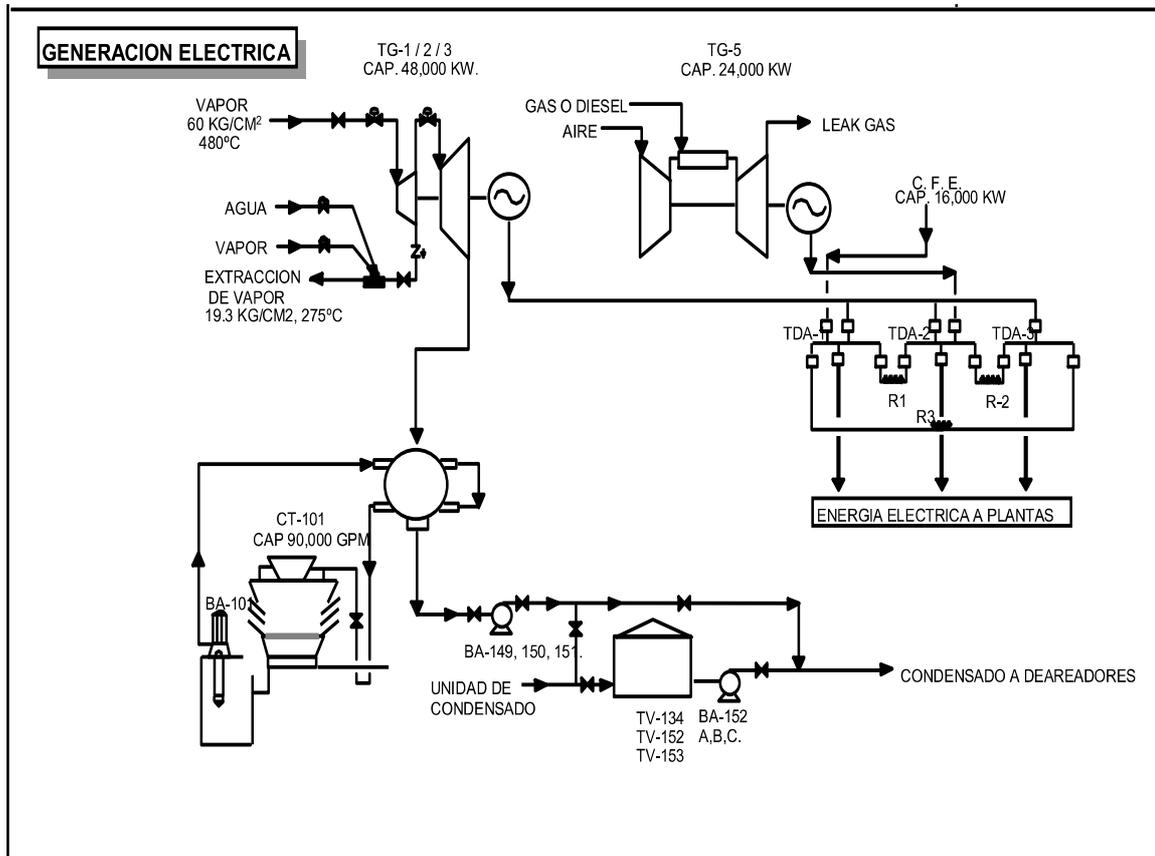


Figura 2 Planta de Generación Eléctrica.

El presente estudio se centra en el análisis de los Servicios Auxiliares con la finalidad de conocer cómo se van formando los costos en las corrientes de energía. Una vez determinados los costos de las corrientes de energía, se procederá a analizar otras alternativas tecnológicas como son los sistemas de cogeneración para ver como varían los costos dependiendo del sistema empleado.

Una vez evaluadas las diferentes alternativas tecnológicas es posible seleccionar la más adecuada que represente mejores costos de energía y generar proyectos rentables desde el punto de vista de eficiencia energética.

CAPÍTULO II
TEORIA SOBRE CAVITACIÓN
Y BOMBAS

CAPITULO II. TEORIA SOBRE CAVITACION Y BOMBAS

2.1 NPSH

NPSH es un acrónimo de NET POSITIVE SUCTION HEAD, también conocido como ANPA (Altura Neta Positiva en la Aspiración) y CNPA (Carga Neta Positiva en Aspiración). Es la diferencia, en cualquier punto de un circuito hidráulico, entre la presión en ese punto y la presión de vapor del líquido en ese punto.

La NPSH es un parámetro importante en el diseño de un circuito: si la presión en el circuito es menor que la presión de vapor del líquido, éste entrará en algo parecido a la ebullición: se vaporiza, produciéndose el fenómeno de cavitación, que puede dificultar o impedir la circulación de líquido, y causar daños en los elementos del circuito.

En las instalaciones de bombeo se debe tener en cuenta la NPSH referida a la aspiración de la bomba, distinguiéndose dos tipos de NPSH:

2.2 NPSH REQUERIDA

Es la NPSH mínima que se necesita para evitar la cavitación. Depende de las características de la bomba, por lo que es un dato que debe proporcionar el fabricante en sus curvas de operación.

$$NPSHr = Hz + \frac{Va^2}{2g}$$

donde

Hz es la presión mínima necesaria a la entrada del rodete, en m.c.a..

$$\frac{Va^2}{2g}$$

Es la presión cinética correspondiente a la velocidad de entrada del líquido en la boca de aspiración, en m.c.a. (para Va en m/s).

2.3 NPSH DISPONIBLE

Depende de las características de la instalación y del líquido a bombear.

$$NPSHd = \frac{Pa}{\gamma} - Ha - Pca - \frac{Pv}{\gamma}$$

donde

γ es el peso específico del líquido (adimensional).

Pa es la presión en el nivel de aspiración, en Pa

Ha es la altura geométrica de aspiración en m.c.a.

Pca es la pérdida de carga en la línea de aspiración, en m.c.a.

Pv es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, en Pa

LA NPSH DISPONIBLE DEBE SER MAYOR QUE LA NPSH REQUERIDA PARA EVITAR LA CAVITACIÓN.

Las causas más frecuentes de que esta condición no se cumpla son dos:

- Aumento de la pérdida de carga en la línea de aspiración, bien por obstrucción de la tubería o filtro de aspiración, bien por funcionamiento de la bomba con la válvula de aspiración semicerrada.
- Aumento de la presión de vapor del líquido al aumentar su temperatura, por ejemplo si el líquido a bombear se refrigera previamente, y esta refrigeración falla.

2.4 CAVITACION

La **cavitación** o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli (Principio de Bernoulli). Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más

correctamente, *cavidades*. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un arranque de metal de la superficie en la que origina este fenómeno.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido. Estas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando implosionan, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida.

El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea en las diferentes partes de la máquina.

Se puede presentar también cavitación en otros procesos como, por ejemplo, en hélices de barcos y aviones, bombas y tejidos vascularizados de algunas plantas.

Se suele llamar **corrosión por cavitación** al fenómeno por el que la cavitación arranca la capa de óxido (resultado de la pasivación) que cubre el metal y lo protege, de tal forma que entre esta zona (ánodo) y la que permanece pasivada (cubierta por óxido) se forma un par galvánico en el que el ánodo (el que se corroe) que es la zona que ha perdido su capa de óxido y la que lo mantiene (cátodo).

El proceso físico de la cavitación es casi exactamente igual que el que ocurre durante la ebullición. La mayor diferencia entre ambos consiste en cómo se efectúa el cambio de fase. La ebullición eleva la presión de vapor del líquido por encima de la presión ambiente local para producir el cambio a fase gaseosa, mientras que la cavitación es causada por una caída de la presión local por debajo de la presión de vapor.

Para que la cavitación se produzca, las "burbujas" necesitan una superficie donde nuclearse. Esta superficie puede ser la pared de un contenedor o depósito, impurezas del líquido o cualquier otra irregularidad.

El factor determinante en la cavitación es la temperatura del líquido. Al variar la temperatura del líquido varía también la presión de vapor de forma importante, haciendo más fácil o difícil que para una presión local ambiente dada la presión de vapor caiga a un valor que provoque cavitación.



Figura 3 Daño por cavitación de una turbina Francis.

La cavitación es, en la mayoría de los casos, un suceso indeseable. En dispositivos como hélices y bombas, la cavitación puede causar mucho ruido, daño en los componentes y una pérdida de rendimiento.

Este fenómeno es muy estudiado en ingeniería naval durante el diseño de todo tipo de barcos debido a que acorta la vida útil de algunas partes tales como las hélices y los timones.

En el caso de los submarinos este efecto es todavía más estudiado, evitado e indeseado, puesto que imposibilita a estos navíos de guerra mantener sus características operativas de silencio e indetectabilidad por las vibraciones y ruidos que la cavitación provoca en el casco y las hélices.

El colapso de las cavidades supone la presencia de gran cantidad de energía que puede causar enorme daño. La cavitación puede dañar casi cualquier material. Las picaduras causadas por el colapso de las cavidades producen un enorme desgaste en los diferentes componentes y pueden acortar enormemente la vida de las bombas o hélices.

Además de todo lo anterior, la creación y posterior colapso de las burbujas crea fricción y turbulencias en el líquido. Esto contribuye a una pérdida adicional de rendimiento en los dispositivos sometidos a cavitación.

La cavitación se presenta también en el fondo de los ríos donde se genera a partir de irregularidades del lecho disociando el agua y el aire. Ambos son sometidos a presiones, dando lugar, este último, a burbujas que, con la fuerza del agua, se descomponen en tamaños microscópicos, saliendo disparadas a gran velocidad. Esto provoca un fuerte impacto en el lecho que puede ser de hasta 60 t/m². Su importancia radica en la constancia y repetición del fenómeno, lo que favorece su actuación. La cavitación es un proceso erosivo frecuente en los pilares de los puentes.

Aunque la cavitación es un fenómeno indeseable en la mayoría de las circunstancias, esto no siempre es así. Por ejemplo, la supercavitación tiene aplicaciones militares como por ejemplo en los torpedos de supercavitación en los cuales una burbuja rodea al torpedo eliminando de esta manera toda fricción con el agua. Estos torpedos se pueden desplazar a altas velocidades bajo el agua, incluso hasta a velocidades supersónicas. La cavitación puede ser también un fenómeno positivo en los dispositivos de limpieza ultrasónica. Estos dispositivos hacen uso de ondas sonoras ultrasónicas y se aprovechan del colapso de las burbujas durante la cavitación para la limpieza de las superficies.



Figura 4 Desgaste producido por la cavitación en un rodete de una bomba centrífuga.



Figura 5 Ejemplo de desgaste producido por la cavitación en un rodete de una bomba centrífuga.

Los álabes de un rodete de una bomba o de la hélice de un barco se mueven dentro de un fluido. Cuando el fluido se acelera a través de los álabes se forman regiones de bajas presiones. Cuanto más rápido se mueven los álabes menor es la

presión alrededor de los mismos. Cuando se alcanza la presión de vapor, el fluido se vaporiza y forma pequeñas burbujas de vapor que al colapsarse causan ondas de presión audibles y desgaste en los álabes.

La cavitación en bombas puede producirse de dos formas diferentes:

2.5 CAVITACIÓN DE SUCCIÓN

La cavitación de succión ocurre cuando la succión de la bomba se encuentra en unas condiciones de baja presión/alto vacío que hace que el líquido se transforme en vapor a la entrada del rodete. Este vapor es transportado hasta la zona de descarga de la bomba donde el vacío desaparece y el vapor del líquido es nuevamente comprimido debido a la presión de descarga. Se produce en ese momento una violenta implosión sobre la superficie del rodete. Un rodete que ha trabajado bajo condiciones de cavitación de succión presenta grandes cavidades producidas por los trozos de material arrancados por el fenómeno. Esto origina el fallo prematuro de la bomba.

2.6 CAVITACIÓN DE DESCARGA

La cavitación de descarga sucede cuando la descarga de la bomba está muy alta. Esto ocurre normalmente en una bomba que está funcionando a menos del 10% de su punto de eficiencia óptima. La elevada presión de descarga provoca que la mayor parte del fluido circule por dentro de la bomba en vez de salir por la zona de descarga. A este fenómeno se le conoce como "slippage". A medida que el líquido fluye alrededor del rodete debe de pasar a una velocidad muy elevada a través de una pequeña apertura entre el rodete y el tajamar de la bomba. Esta velocidad provoca el vacío en el tajamar (fenómeno similar al que ocurre en un venturi) lo que provoca que el líquido se transforme en vapor. Una bomba funcionando bajo estas condiciones muestra un desgaste prematuro del rodete, tajamar y álabes. Además y debido a la alta presión de funcionamiento es de esperar un fallo prematuro de las juntas de estanqueidad y rodamientos de la bomba. Bajo condiciones extremas puede llegar a romperse el eje del rodete.

2.7 PLANTAS

La cavitación puede aparecer en el xilema de las plantas cuando el potencial del agua se hace tan grande que el aire disuelto dentro del agua se expande hasta llenar la célula de la planta. Las plantas generalmente son capaces de reparar los daños producidos por la cavitación, por ejemplo con la presión de bombeo de las raíces. En otros tipo de plantas como las vides la cavitación puede llevarlas a la muerte. En algunos árboles la cavitación es claramente audible.

2.8 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS

Las bombas se clasifican según las consideraciones generales diferentes:

- La que toma en consideración la características de movimiento de los líquidos.
- La que se basa en el tipo de aplicación específica para los cuales se ha diseñado la bomba.

Clases y tipos.- Hay tres clases de bombas en uso común del presente: centrífuga, rotatoria y reciprocante. Nótese estos términos se aplican solamente a la mecánica del movimiento de líquido y no al servicio para el que se a diseñado una bomba.

2.9 BOMBAS CENTRÍFUGAS

Bombas de tipo Voluta.- El impulsor descarga en una caja espiral que se expande progresivamente, proporcionada en tal forma que la velocidad del líquido se reduce en forma gradual. Por este medio, parte de la energía de velocidad del líquido se convierte en presión estática.

Bombas de Tipo Difusor.- Los álabes direccionales estacionarios rodean al rotor o impulsor en. una bomba del tipo de difusor. Esos pasajes con expansión gradual cambian la dirección del flujo del líquido y convierten la energía de velocidad a columna de presión.

Bombas de Tipo Turbina.- También se conocen como bombas de vértice, periféricas y regenerativas; en este tipo se producen remolinos en el líquido por medio de los álabes a velocidades muy altas dentro del canal anular en el que gira el

impulsor. El líquido va recibiendo impulsos de energía. Las bombas del tipo difusor de pozo profundo, se llaman frecuentemente bombas turbinas.

Tipos de Flujo

El flujo puede ser mixto o axial, las bombas de flujo mixto desarrollan su columna parcialmente por fuerza centrífuga y parcialmente por el impulsor de los álabes sobre el líquido. El diámetro de descarga de los impulsores es mayor que el de entrada. Las bombas de flujo axial desarrollan su columna por la acción de impulso o elevación de las paletas sobre el líquido.

2.10 APLICACIONES DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS

La mayor parte de las bombas rotatorias son autocebantes y pueden, de ser necesario, trabajar con gas o aire. Las aplicaciones típicas incluyen el paso de líquido de todas las viscosidades, procesos químicos, alimento, descarga de barcos, lubricación a presión, pintura a presión, sistemas de enfriamiento, servicio de quemadores de aceite, manejos de grasa, gases licuados (propano, butano, amonio, freón, etc.), y un gran número de otros servicios industriales. Cuando han de bombearse líquidos a temperaturas arriba de 82 grados C, debe consultarse al fabricante para obtener sus recomendaciones.

2.11 BOMBAS ROTATORIAS

Las bombas rotatorias que generalmente son unidades de desplazamiento positivo, consisten de una caja fija que contiene engranes, aspas, pistones, levas, segmentos, tornillos, etc., que operan con un claro mínimo. En lugar de "aventar" el líquido como en una bomba centrífuga, una bomba rota y a diferencia de una bomba de pistón, la bomba rotatoria descarga un flujo continuo. Aunque generalmente se les considera como bombas para líquidos viscosos, las bombas rotatorias no se limitan a este servicio sólo. Pueden manejar casi cualquier líquido que esté libre de sólidos abrasivos. Incluso puede existir la presencia de sólidos duros en el líquido si una chaqueta de vapor alrededor de la caja de la bomba los puede mantener en condición fluida. Las bombas rotatorias se clasifican en:

Bombas de Leva y Pistón.- También se llaman bombas de émbolo rotatorio, y consisten de un excéntrico con un brazo ranurado en la parte superior. La rotación de la flecha hace que el excéntrico atrape el líquido contra la caja. Conforme continúa la rotación el líquido se fuerza de la caja a través de la ranura a la salida de la bomba.

Bombas de Engranés Externos.- Éstas constituyen el tipo rotatorio más simple. Conforme los dientes de los engranes se separan en el lado el líquido llena el espacio, entre ellos. Éste se conduce en trayectoria circular hacia afuera y es exprimido al engranar nuevamente los dientes. Los engranes pueden tener dientes simples, dobles, o de involuta. Algunos diseños tienen agujeros de flujo radiales en el engrane loco, que van de la corona y del fondo de los dientes a la perforación interna. Éstos permiten que el líquido se comuniquen de un diente al siguiente, evitando la formación de presiones excesivas que pudiesen sobrecargar las chumaceras y causar una operación ruidosa.

Bombas de Engrane Interno.- Estas tienen un rotor con dientes cortados internamente y que encajan en un engrane loco, cortado externamente. Puede usarse una partición en forma de luna creciente para evitar que el líquido pase de nuevo al lado de succión de la bomba.

Bombas Lobulares .- Éstas se asemejan a las bombas del tipo de engranes en su forma de acción, tienen dos o más rotores cortados con tres, cuatro, o más lóbulos en cada rotor. Los rotores se Sincronizan para obtener una rotación positiva por medio de engranes externos, Debido a que el líquido se descarga en un número más reducido de cantidades mayores que en el caso de la bomba de engranes, el flujo del tipo lobular no es tan constante como en la bomba del tipo de engranes. Existen también combinaciones de bombas de engrane y lóbulo.

Bombas de Tornillo. Estas bombas tienen de uno a tres tornillos roscados convenientemente que giran en una caja fija. Existe un gran número de diseños apropiados para varias aplicaciones. Las bombas de un solo tornillo tienen un rotor en forma espiral que gira excéntricamente en un estator de hélice interna o cubierta. El rotor es de metal y la hélice es generalmente de hule duro o blando, dependiendo

del líquido que se maneje. Las bombas de dos y tres tornillos tienen uno o dos engranes locos, respectivamente, el flujo se establece entre las roscas de los tornillos, y a lo largo del eje de los mismos. Pueden usarse tornillos con roscas opuestas para eliminar el empuje axial en la bomba.

Bombas de Aspas.- Tienen una serie de aspas articuladas que se balancean conforme gira el rotor, atrapando al líquido y forzándolo en el tubo de descarga de la bomba. Las bombas de aspas deslizantes usan aspas que se presionan contra la carcasa por la fuerza centrífuga cuando gira el rotor. El líquido atrapado entre las dos aspas se conduce y fuerza hacia la descarga de la bomba.

Bombas de junta universal.- Tienen un pequeño tramo de flecha en el extremo libre del rotor, soportado en una chumacera y a 80 grados con la horizontal. El extremo opuesto del rotor se encuentra unido al motor. Cuando el rotor gira, cuatro grupos de superficies planas se abren y cierran para producir una acción de bombeo o cuatro descargas por revolución.

Un excéntrico en una cámara flexible produce la acción de bombeo exprimiendo al miembro flexible contra la envoltura de la bomba para forzar el líquido hacia la descarga.

Bombas de tubo flexible.- Tienen un tubo de hule que se exprime por medio de un anillo de compresión sobre un excéntrico ajustable. La flecha de la bomba, unida al excéntrico, lo hace girar. Las bombas de este diseño se construyen con uno o dos pasos. Existen otros diseños de bombas de tubo flexible.

2.12 BOMBAS RECIPROCANTES

Las bombas reciprocantes son unidades de desplazamiento positivo descargan una cantidad definida de líquido durante el movimiento del pistón o émbolo a través de la distancia de carrera. Sin embargo, no todo el líquido llega necesariamente al tubo de descarga debido a escapes o arreglo de pasos de alivio que puedan evitarlo. Despreciando éstos, el volumen del líquido desplazado en una carrera del pistón o émbolo es igual al producto del área del pistón por la longitud de la carrera.

Existen básicamente dos tipos de bombas reciprocantes las de acción directa, movidas por vapor y las bombas de potencia. Pero existen muchas modificaciones de los diseños básicos, construidas para servicios específicos en diferentes campos. Algunas Se clasifican como bombas rotatorias por los fabricantes, aunque en realidad utilizan movimiento recíprocante de pistones o émbolos para asegurar la acción de bombeo.

Bombas de Acción Directa.- En este tipo, una varilla común de pistón conecta un pistón de vapor y uno de líquido o émbolo. Las bombas de acción directa se constituyen de simplex (un pistón de vapor y un pistón de líquido, respectivamente) y duplex (dos pistones de vapor y dos de líquido). Los extremos compuestos y de triple expansión, que fueron usados en alguna época no se fabrican ya como unidades normales.

Bombas de Potencia.- Estas tienen un cigüeñal movido por una fuente externa generalmente un motor eléctrico, banda o cadena. Frecuentemente se usan engranes entre el motor y el cigüeñal para reducir la velocidad de salida del elemento motor. Cuando se mueve a velocidad constante, las bombas de potencia proporcionan un gasto casi constante para una amplia variación de columna, y tienen buena eficiencia. El extremo líquido, que puede ser del tipo de pistón o émbolo, desarrollará una presión elevada cuando se cierra la válvula de descarga. Por esta razón, es práctica común el proporcionar una válvula de alivio para descarga, con objeto de proteger la bomba y su tubería. Las bombas de acción directa, se detienen cuando la fuerza total en el pistón del agua iguala a la del pistón de vapor; las bombas de potencia desarrollan una presión muy elevada antes de detenerse. La presión de parado es varias veces la presión de descarga normal de las bombas de potencia. Las bombas de potencia se encuentran particularmente bien adaptadas para servicios de alta presión y tienen algunos usos en la alimentación de calderas, bombeo en líneas de tuberías, proceso de petróleos y aplicaciones similares.

Bombas del Tipo Potencia de Baja Capacidad.- Estas unidades se conocen también como bombas de capacidad variable, volumen controlado y de "proporción". Su uso principal es para controlar el flujo de pequeñas cantidades de líquido para

alimentar calderas, equipos de proceso y unidades similares. Como tales ocupan un lugar muy importante en muchas operaciones industriales en todo tipo de plantas. La capacidad de estas bombas puede variarse cambiando la longitud de la carrera. Puede usarse un diafragma para bombear el líquido que se maneja, accionado por un émbolo que desplaza aceite dentro de la cámara de la bomba. Cambiando la longitud de la carrera del émbolo se varía el desplazamiento del diafragma.

Bombas del Tipo de Diafragma. La bomba combinada de diafragma y pistón generalmente se usa sólo para capacidades pequeñas. Las bombas de diafragma se usan para gastos elevados de líquidos, ya sea claros o conteniendo sólidos. También son apropiados para pulpas gruesas, drenajes, lodos, soluciones ácidas y alcalinas, así como mezclas de agua con sólidos que puedan ocasionar erosión. Un diafragma de material flexible no metálico, puede soportar mejor la acción corrosiva o erosiva que las partes metálicas de algunas bombas reciprocantes.

2.13 BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Las bombas de desplazamiento positivo abarcan dos de los grupos principales, a saber:

- Las alternativas
- Las rotativas o rotoestáticas

Aunque mientras que las bombas alternativas tienen características esencialmente de desplazamiento positivo, no todas las bombas rotativas son máquinas de desplazamiento verdaderamente positivo. También hay algunas máquinas no rotativas o dispositivos que dan flujos positivos cuya modalidad de funcionamiento se sale del campo abarcado por las dos clasificaciones principales. Las características principales de todas las bombas de desplazamiento positivo son:

- a) Que la capacidad la determinan específicamente las dimensiones de la bomba y su velocidad de funcionamiento.
- b) Que la capacidad o descarga logradas dependen muy poco de la altura desarrollada.

2.14 BOMBAS CENTRÍFUGAS. PRINCIPIOS Y SELECCIÓN.

Dada la constante necesidad de transportar grandes cantidades de fluidos por largas distancias, las bombas centrífugas, han tomado un papel protagónico en procesos asociados a todo tipo de industrias, inclusive en aplicaciones domesticas simples. Por esta razón es importante tener un conocimiento muy somero sobre dicha máquinas.

2.14.1 APLICACIÓN.

Las bombas centrífugas hacen parte de un grupo de máquinas denominadas bombas rotodinámicas, las cuales están caracterizadas por la existencia de un elemento impulsor (o impeller) el cual es movido por un eje que le transmite la potencia a dicho elemento.

Dentro de este grupo se encuentran las bombas de flujo axial, mixto y radial estas últimas, de interés para el desarrollo de estas líneas.

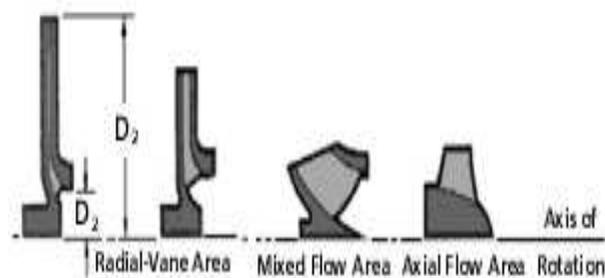


Figura 6 Clasificación según tipo de flujo.

Las características principales para el tipo axial son el manejo de un gran caudal, pero una baja cabeza de presión desarrollada; mientras que las de tipo radial, el comportamiento es al contrario.

Dichas bombas centrífugas (ó radiales), al caracterizarse por su alta cabeza, y su bajo caudal (respecto a las axiales), aunque importante, son ampliamente utilizadas en procesos donde se requiere el transporte de una cantidad significativa

de flujo a un alto nivel de cabeza para así poder vencer grandes alturas y distancias muy largas.

Se estima que aproximadamente el 70% de la producción total de las bombas corresponde a bombas centrífugas. Esta es una medida de la importancia de este tipo de bombas.

Son ampliamente usadas en aplicaciones mineras (por su facilidad para manejar sólidos), en acueductos, industrias químicas, oleoductos y aplicaciones domésticas.

2.15 SISTEMA.

En muchas ocasiones el sistema al cual se necesita acoplar una bomba existe con anterioridad, y el trabajo se reduce a conocer y entender bien las características del mismo, para así poder determinar satisfactoriamente la bomba necesaria para poder cumplir con los requerimientos del proceso.

Asumiendo que se debe concebir el sistema para que satisfaga las necesidades del proceso, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Caudal requerido.
- Cabeza requerida (este aspecto está fuertemente influenciado por las características del sistema).
- Fluido a bombear.
- Temperatura del fluido.

La característica de un sistema está dada por la curva de cabeza-caudal, la cual está dada por dos componentes; la cabeza estática total, TSH, (Fija. Independiente del caudal manejado) y la Cabeza Dinámica, CD, (Variable. Dependiente del caudal manejado).

Esta Cabeza Estática Total (TSH) se determina físicamente sobre el sistema, y generalmente se dan las dos configuraciones siguientes:

- La bomba se encuentra por encima del nivel de succión.
- La bomba se encuentra por debajo del nivel de succión.

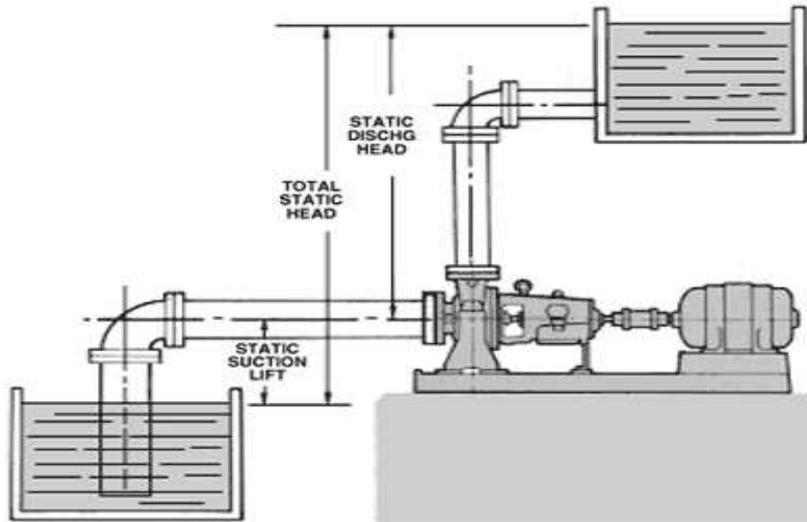


Figura 7. Bomba por encima de la succión.

En este caso la Cabeza Estática Total (TSH) es la suma de la Elevación de Succión Estática (SSL), más la Cabeza Estática de Descarga (SDH).

$$TSH = SSL + SDH.$$

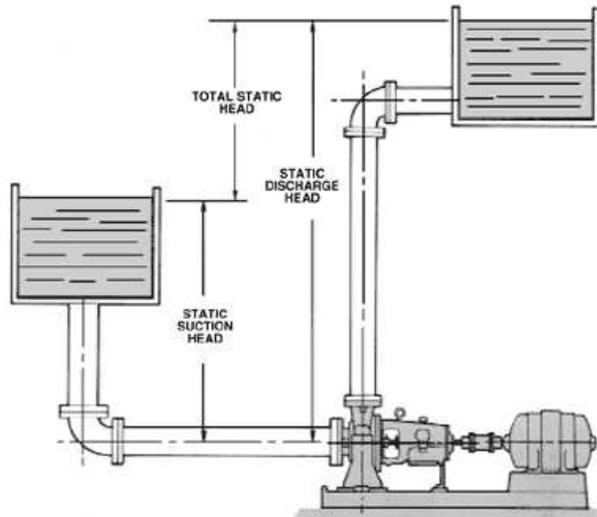


Figura 8. Bomba por debajo de la succión.

En este caso la Cabeza Estática Total (TSH) es la diferencia entre la Cabeza

Estática de Descarga (SDH), menos la Cabeza Estática de Succión (SSH).

$$TSH = SDH - SSH.$$

La Cabeza Dinámica es variable, ya que depende de varios factores, como son; caudal manejado por el sistema (velocidad de flujo), las características físicas de la tubería (diámetro y rugosidad) y la viscosidad del fluido (es función de la temperatura), forma general de la línea (accesorios y válvulas).

Dicha cabeza cuantifica las pérdidas de energía que se generan por fricción en la tubería, y cambios de dirección (o obstrucciones) producto de las válvulas y los accesorios.

- Para calcular las pérdidas por fricción en la tubería se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = \zeta \left(\frac{l}{d} \right) \frac{V^2}{2g}$$

Donde: ζ = Factor de fricción.

- Para calcular las pérdidas por accesorios y válvulas se utiliza el método de Coeficiente de Resistencia K. Con la siguiente ecuación:

$$h_a = K \frac{V^2}{2g}$$

Donde: K= Factor de fricción.

Así la cabeza dinámica es igual a la suma de las dos expresiones anteriores.

$$CD = h_f + h_a = \zeta \left(\frac{l}{d} \right) \frac{V^2}{2g} + K \frac{V^2}{2g}$$

$$CD = \left[\zeta \left(\frac{l}{d} \right) + K \right] \frac{V^2}{2g}$$

Ahora, la característica total del sistema está dada por (observe la siguiente figura):

$$H - Q_{Sist} = TSH + CD$$

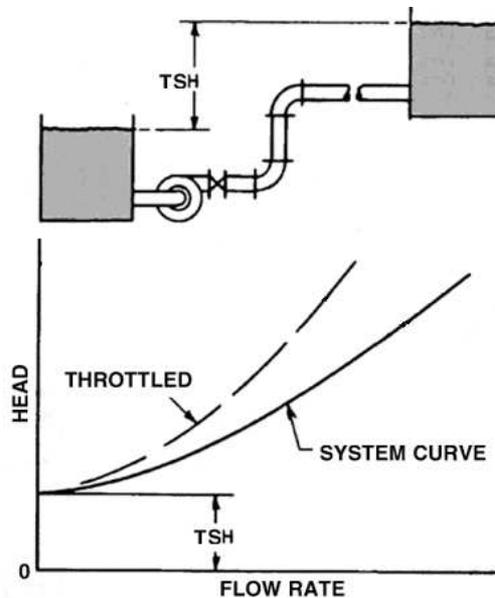


Figura 9. Característica H-Q del Sistema.

Ahora, ya que está determinado el comportamiento del sistema dependiendo del caudal manejado, revisaremos las características de la bomba, para así elegir la bomba más apropiada.

2.16 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.

Una bomba centrífuga es una maquina que convierte la potencia de entrada (rotativa, motor) en energía cinética en el fluido por medio de un mecanismo giratorio, el impulsor.

El principal fenómeno físico de transferencia de energía es el efecto centrífugo ejercido sobre el fluido. Adicionalmente, el efecto de la forma de la voluta o carcaza sobre el fluido es la transformación de energía (de cabeza de velocidad a cabeza de presión) por el fenómeno de continuidad, también contribuye al aumento del nivel energético del fluido en la descarga de la bomba.

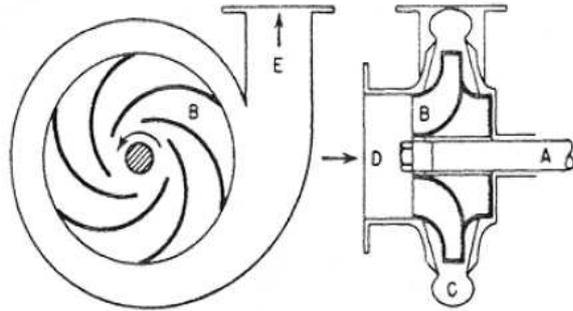


Figura 10. Arreglo Impulsor-Voluta.

El nivel energético del fluido en cualquier punto (*) esta dado por la expresión:

$$E_* = \frac{p_*}{\rho g} + \frac{V_*^2}{2g} + z_*$$

Considerando que la bomba transfiere energía al fluido, se puede hacer un balance energético entre la succión y la descarga de la bomba; puntos 1 y 2, respectivamente.

$$H = \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_2 - \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_1$$

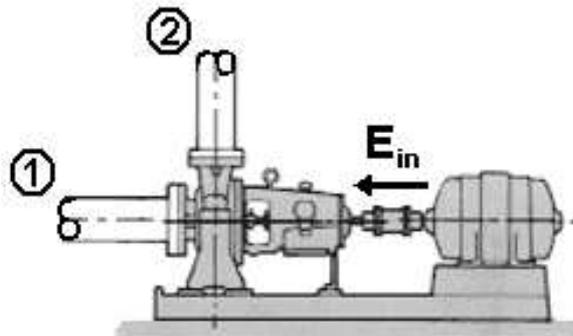


Figura 11. Balance energético de la bomba.

La energía entregada por la bomba al fluido, despreciando la transferencia de calor y el trabajo viscoso está dada por H, (en términos de cabeza).

Dado que existen pérdidas internas en las bombas de tipo hidráulica, volumétrica y mecánica; cobra sentido definir la eficiencia de la bomba.

En función de la potencia transferida al fluido y la potencia entregada a la bomba por el eje del motor, se define la eficiencia así:

$$\eta = \frac{P_w}{bhp} = \frac{\rho g Q H}{\omega T}$$

El movimiento del impulsor genera una baja presión en la succión de la bomba, lo cual hace que el fluido se mueva hacia el ojo del impulsor (Fig.7).

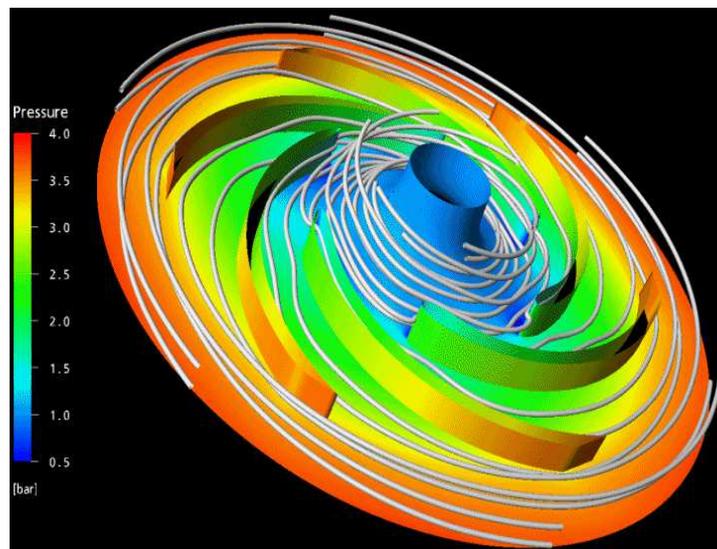


Figura 12. Distribución de presión en el impulsor de una bomba centrífuga radial.

En la figura anterior se muestra la generación de la presión en la medida en que el líquido va abandonando el impulsor. Adicionalmente se muestra claramente la diferencial de presión entre el lado convexo con relación al cóncavo del alabe.

Ahora, después de entender el funcionamiento de una bomba, es momento de ver como se comporta una bomba centrífuga radial, en función de sus variables de operación.

Los fabricantes de bombas proveen las curvas características de la bomba, las cuales muestran la cabeza, la eficiencia, potencia y NPSH-R, versus el caudal

manejado por la bomba

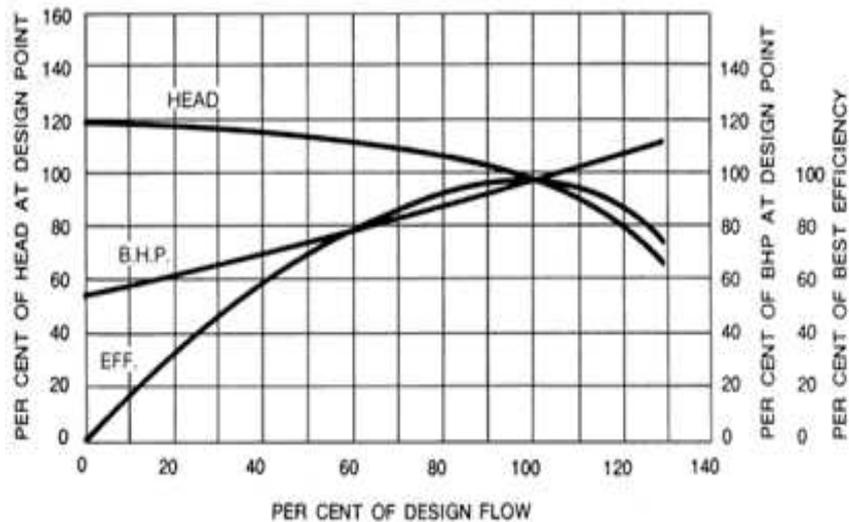


Figura 13. Curvas características de la bomba.

En este momento es importante definir el *BEP*, (siglas en inglés de Punto de Mejor Eficiencia); este punto como su nombre lo dice, está asociado a los parámetros de operación de la bomba en la cual su eficiencia es máxima. Así, entonces hay un valor de caudal y de cabeza relacionados al BEP (Q_{BEP} y H_{BEP}). Lo ideal es trabajar la bomba en este punto (o en su vecindad), para suplir las necesidades del proceso.

2.17 SELECCIÓN.

En este momento, ya es claro el comportamiento individual y por separado, del sistema y de la bomba. Ahora el trabajo consiste en hacer una buena selección de la bomba, según los requerimientos del proceso (principalmente, cabeza y caudal requerido).

Hay que hacer especial claridad y énfasis en que: una bomba centrífuga siempre tratará de operar en el punto donde su curva característica se intercepte con la curva característica del sistema .

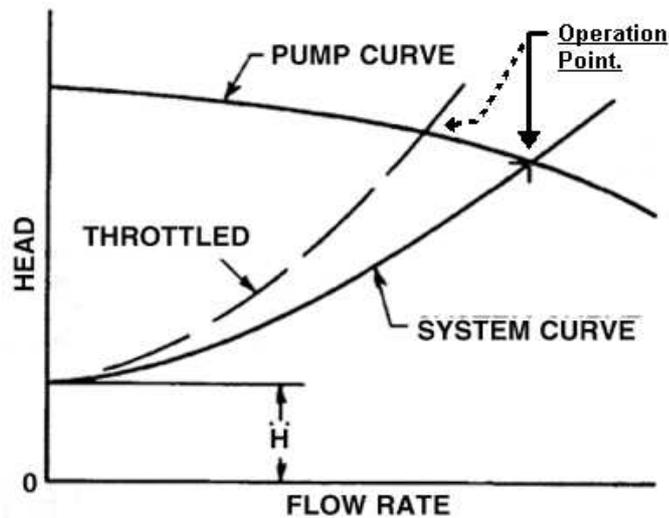


Figura 14. Comportamiento conjunto Sistema - bomba.

El paso siguiente es la selección de la bomba, para esto se debe tener en cuenta dos aspectos primordiales:

1. Buscar una bomba que los valores de cabeza y caudal en su BEP, coincidan ó sean similares a la cabeza y caudal requeridos por el proceso. Así:

$$H_{\text{Requerido}} \approx H_{\text{BEP}} \text{ y } Q_{\text{Requerido}} \approx Q_{\text{BEP}}$$

2. Buscar una bomba la cual tenga una curva cabeza-caudal (H-Q), cuya característica pueda cumplir los posibles rangos de operación para satisfacer el proceso.

El primer punto anterior no es mucho lo que nos puede decir sobre el tipo de bomba a utilizar dado que varias bombas, de varios tipos, pueden tener un BEP que se acerque al requerido por el proceso. Pero al tener conocimiento sobre el rango de trabajo que requiere el proceso, toma sentido el segundo punto anterior, dado que buscaríamos una bomba que satisfaga las necesidades pertinentes.

A continuación se presentaran tres curvas con características H-Q muy diferentes, con los mismos valores de cabeza y caudal para el BEP.

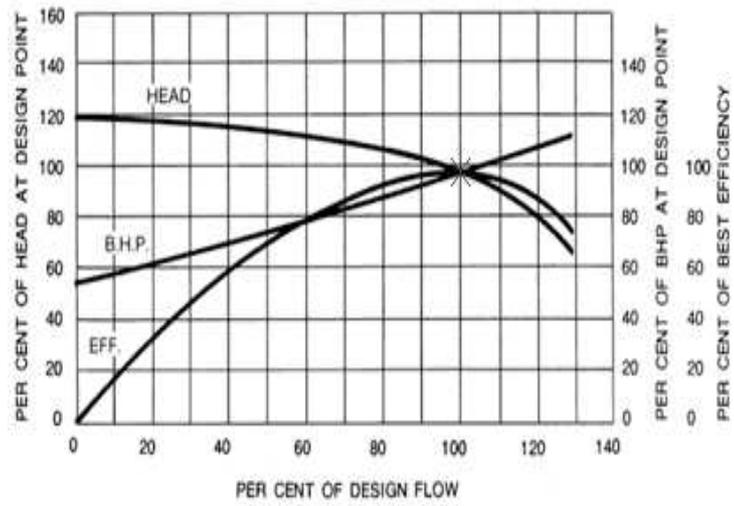


Figura 15. Curvas características – bomba flujo Radial.

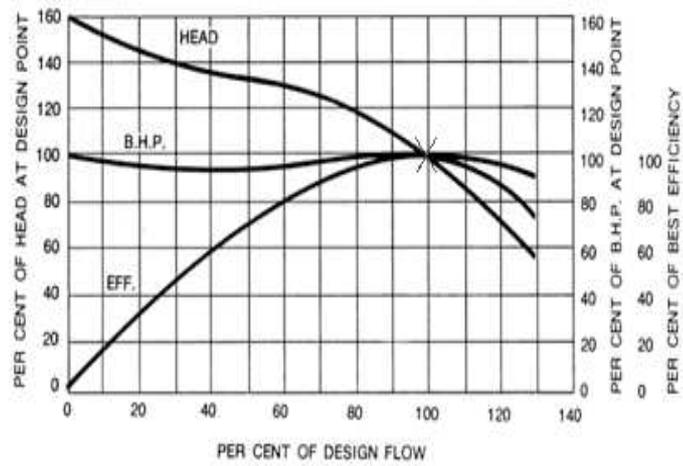


Figura 16. Curvas características – bomba flujo Mixto.

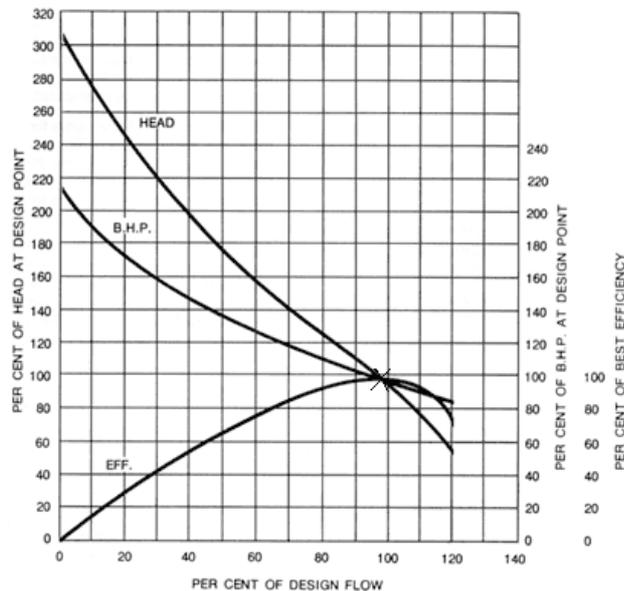


Figura 17. Curvas características – bomba flujo Axial.

Cada una de las tres bombas anteriores cumplen a cabalidad el primer aspecto a tener en cuenta en la selección de la bomba. Como se mencionó anteriormente, para poder satisfacer el segundo punto es necesario conocer el rango de operación del proceso para así elegir una bomba cuya curva H-Q satisfaga dichos requerimientos, sin alejarse significativamente del punto de mejor eficiencia de la bomba.

Además de la cabeza y el caudal, también están asociados al BEP, un valor de potencia (bhp) y un valor de $NPSH_R$ (siglas en ingles de Cabeza Neta de Succión Positiva Requerida).

La potencia requerida en el BEP puede ser conseguida dependiendo del motor seleccionado, por lo general esto no genera mucho inconveniente dada la amplia gama de motores desarrollados en la industria.

El termino $NPSH_R$ es una medida de la energía mínima requerida en el ojo de succión de la bomba, para garantizar el buen funcionamiento de la bomba.

El $NPSH_R$ es un parámetro de la bomba y es determinado y suministrado por el fabricante de la bomba.

Este parámetro debe ser comparado contra el $NPSH_A$ (siglas en ingles de

Cabeza Neta de Succión Positiva Disponible), el cual está determinado por las características del tramo de succión del sistema, y se puede mejorar aumentando el diámetro de la tubería de succión, mejorando la calidad de dicha tubería, reduciendo la distancia de la tubería de succión y la cantidad de accesorios en la línea. Todo lo anterior con el fin de garantizar que:

$$NPSH_{Disponible} > NPSH_{Requerido}$$

Muchos autores y la práctica aconseja que:

$$NPSH_{Disponible} + 5m \geq NPSH_{Requerido}$$

Con la intención de tener un factor de seguridad para evitar el negativo fenómeno de cavitación, el cual aqueja frecuentemente los sistemas de bombeo.

Teniendo en cuenta los aspectos tratados, seguramente se concebirán sistemas de bombeo óptimo y eficiente, que garantizarán las mejores condiciones de funcionamiento teniendo en cuenta el aspecto económico desde el punto de vista de inversión inicial y de operación a lo largo de la vida útil de todo el sistema de bombeo.

A continuación se muestran diferentes opciones para el cálculo del NPSH disponible en bombas centrífugas:

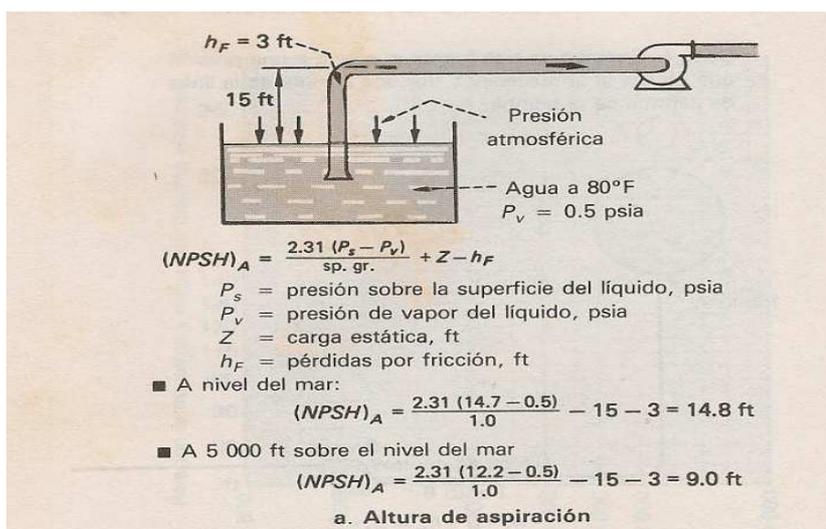


Figura 17 a NPSH disponible con altura de aspiración.

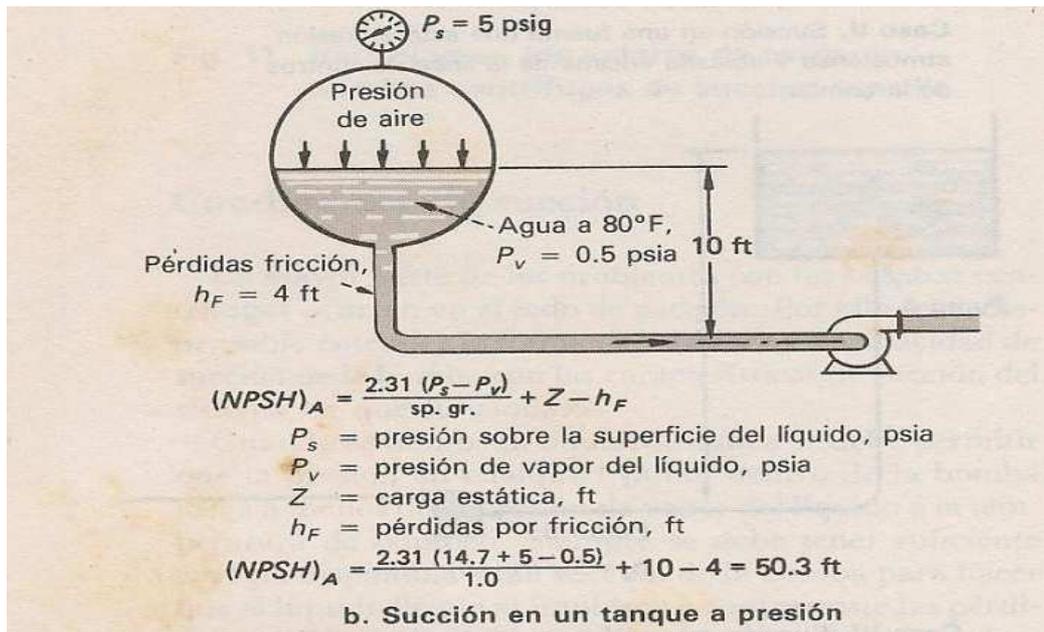


Figura 17 b NPSH disponible con succión de un tanque a presión.

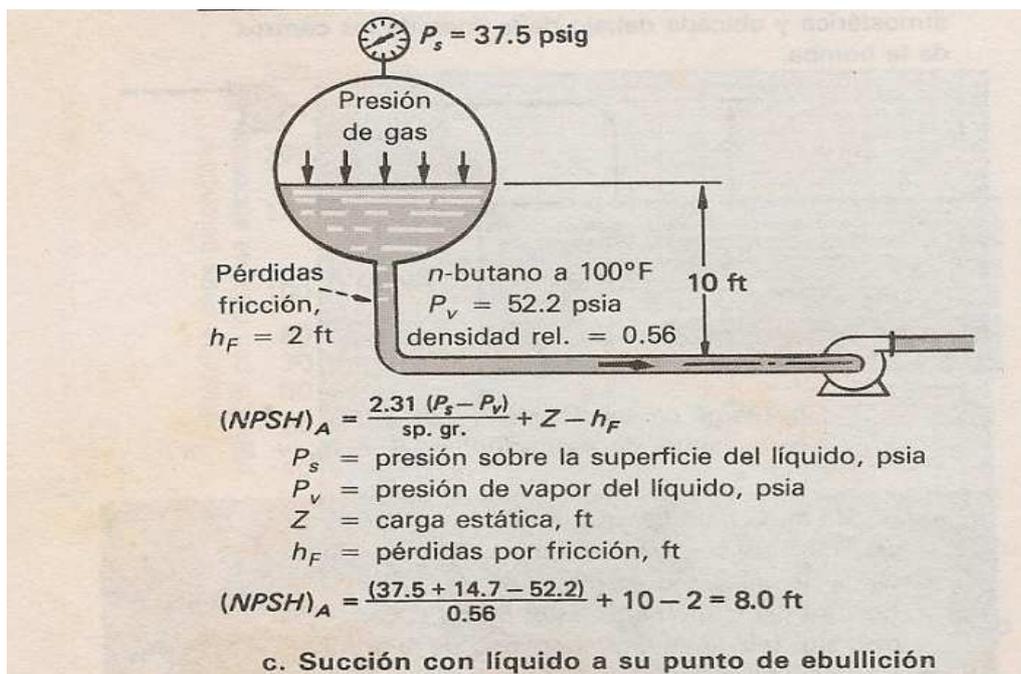


Figura 17 c NPSH disponible con succión de líquido en su punto de ebullición.

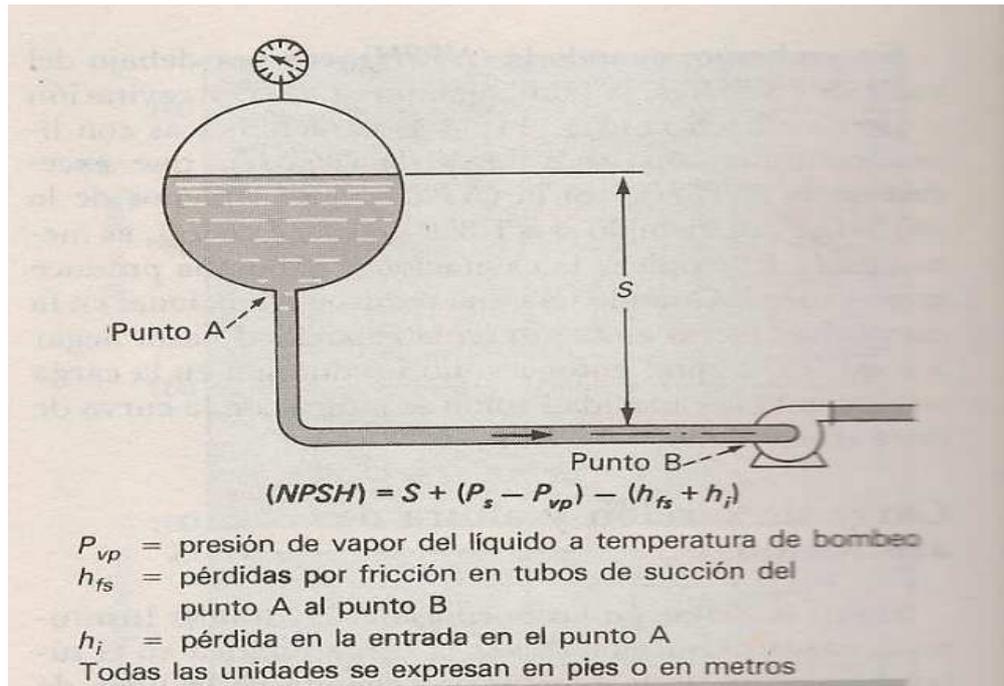


Figura 17 d NPSH disponible con succión positiva.

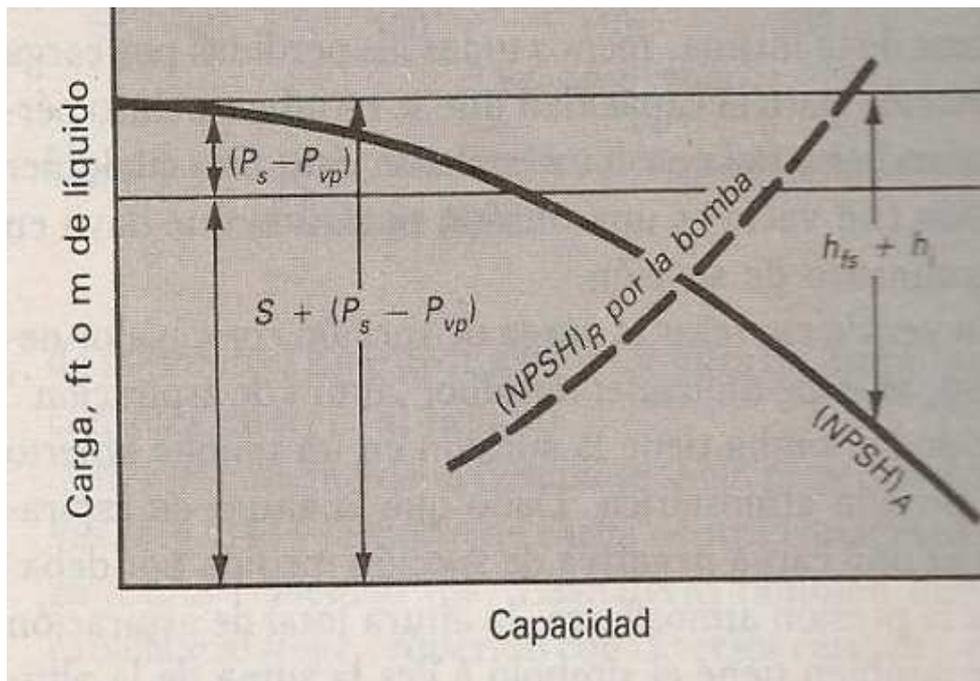


Figura 17 e NPSH disponible en función del caudal en la bomba.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS DE MODELACIÓN

CAPÍTULO III. FUNDAMENTOS DE MODELACION

3.1 INTRODUCCION

La elaboración de la teoría, es decir, la explicación de los fenómenos y la revelación de sus regularidades internas, no se logra únicamente a partir de la acumulación de los hechos obtenidos mediante la aplicación de los métodos empíricos de investigación. Para develar las causas de los fenómenos o los efectos de determinada acción ; para que los hechos empíricos se eleven al nivel de las generalizaciones teóricas, se hace necesario someterlos a un proceso de ordenamiento, selección, clasificación, generalización y comparación.

Los métodos empíricos de investigación hacen factible seleccionar, acumular y realizar un análisis preliminar de la información obtenida pero, además, posibilitan verificar y comprobar las concepciones teóricas. Por ello no podemos hablar, en forma desvinculada, de investigación empírica e investigación teórica; la continua interacción de lo empírico y lo teórico conduce a la ampliación y el enriquecimiento del conocimiento científico.

En este sentido se hace necesario destacar que toda investigación empírica está precedida de una búsqueda teórica que, de hecho, se plasma en la hipótesis que se formula, en la que se expresan hipotéticamente las bases teóricas que asume en calidad de referentes el investigador. Además, al finalizar toda la investigación empírica, se requiere hacer un análisis teórico de la información obtenida, se precisa llegar a conclusiones, a generalizaciones que enriquezcan la teoría.

En los últimos años, la mayoría de los autores destacan la modelación como método fundamental de carácter teórico. La modelación se considera un poderoso recurso auxiliar de la búsqueda teórica; ella permite caracterizar el fenómeno que se estudia en forma de imágenes visuales, de esquemas, de diseños. En algunos casos se llega a la descripción en término de fórmulas matemáticas, símbolos, matrices.

La búsqueda de un modelo teórico del proceso, y su utilización en la determinación de las formas concretas en que este proceso transcurre, constituye

un elemento sustancial de la investigación teórica.

La temática referida a la modelación y la elaboración de modelos, resulta de gran importancia para las ciencias que participan en la comprensión y la transformación del hombre, pero también se caracteriza por una indiscutible complejidad.

Si nos preguntáramos qué significa modelar, pudieran surgir numerosas respuestas a esta interrogante:

Modelar significa...

- Crear una representación explícita del entendimiento que una persona tiene de una situación, o simplemente de las ideas que se tienen acerca de una situación.
- Reproducir de manera simplificada la realidad, para descubrir y estudiar nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio.
- La habilidad para describir la situación problemática que confronta un analista
- Utilizar una abstracción que sirve para explicar la realidad.
- Elaborar un modelo para interpretar la realidad objetiva y transformarla en beneficio propio.

La modelación, como uno de los métodos teóricos más importantes para la ciencia, es justamente el proceso mediante el cual creamos modelos con vistas a investigar la realidad. Es el método que opera en forma práctica o teórica con un objeto, no en forma directa, sino utilizando cierto sistema intermedio, auxiliar, natural o artificial. El modelo viene siendo como un sustituto del objeto de investigación.

Desde el inicio, en el análisis del método de la modelación se observa que, entre nosotros y el objeto que interesa se sitúa un eslabón intermedio: el modelo. La modelación es una forma especial de mediación. En el proceso de modelación, el eslabón mediato, el modelo, actúa como representante-sustituto del objeto. El fundamento objetivo de la mediación del modelo lo constituye cierta semejanza del modelo - eslabón mediato- y el objeto sobre el cual se orientan los intereses del sujeto. El modelo se nos muestra como algo semejante al propio objeto investigado, como algo que lo copia en una determinada relación.

¿Qué se entiende, entonces, por modelo?

- Un modelo es una representación de un objeto real que en el plano abstracto el hombre concibe para caracterizarlo y poder, sobre esa base, darle solución al problema planteado, es decir, satisfacer una necesidad
- Los modelos son un medio del pensamiento científico, una forma peculiar de abstracción de la realidad.
- Es un instrumento para predecir acontecimientos que no han sido observados aún.
- Es un sistema de representación. El conocimiento humano tiene lugar como modelo de nuestra experiencia del mundo.
- Es un cuasi-objeto intermedio auxiliar mediante el cual el conocimiento parece ser trasladado temporalmente del objeto que nos interesa a la investigación .
- El modelo científico es un instrumento de la investigación de carácter material o teórico, creado por los científicos para reproducir el fenómeno que se está estudiando.
- El modelo es una reproducción simplificada de la realidad, que cumple una función heurística, ya que permite descubrir y estudiar nuevas relaciones y cualidades del objeto de estudio .
- Es una construcción teórico formal que fundamentada científica e ideológicamente interpreta, diseña y ajusta la realidad que responde a una necesidad histórica concreta.
- Un modelo puede ser definido como una herramienta conceptual para entender algún evento.

Javier Arlegui de Pablos, profesor de la Universidad Pública de Navarra, destaca las siguientes ideas en torno a los modelos, aplicados estos al estudio y comprensión de los fenómenos físicos

- Son símbolos de nuestra experiencia, con los que elaboramos una representación formal sistemática de la misma, con el objetivo de comprenderla y de comunicarla a los demás.

- Un modelo se elabora con un propósito, y en ese sentido, recoge sólo ciertas propiedades "relevantes" del objeto o proceso modelizado (el modelo "aprende"[aprehende] sólo determinados aspectos de la realidad, y es necesariamente más "simple" y "limitado").
- En el marco de las ciencias experimentales, un modelo se construye en relación dialéctica con los datos experimentales medidos.
- La primacía en el estudio de los datos está en relación con el carácter "descriptivo" del modelo; la primacía en el estudio del modelo está en relación con su carácter "explicativo" de los datos de la experiencia.
- Los fenómenos se modelizan habitualmente mediante una representación sistémica de estados y de transiciones entre los mismos.
- Un problema frecuente en la construcción del modelo es el de determinar las eventuales relaciones existentes entre las propiedades (variables) de estado.
- La utilidad de un modelo puede tener los siguientes matices, entre otros:
 1. Ayuda para aclarar el pensamiento acerca de un área de interés.
 2. Sirve como una ilustración del concepto.
 3. Ofrece una contribución para definir estructura y lógica.
 4. Se constituye en un prerrequisito al diseño.
 5. Refleja los aspectos esenciales del objeto o fenómeno de forma simplificada.
 6. Optimiza la actividad práctica mediante la transformación de la realidad.

La expresión de un modelo puede asumir diversas variantes. El modelo puede expresarse a través de matemáticas, símbolos o palabras, pero es esencialmente una descripción de entidades y de las relaciones entre ellas. Esta idea explica la relación entre los métodos teóricos de la modelación y el enfoque sistémico, este último dirigido a modelar el objeto mediante la determinación de sus componentes, así como las relaciones entre ellos. Esas relaciones determinan por un lado la estructura del objeto y por el otro su dinámica.

Un modelo puede ser prescriptivo, explicativo o ilustrativo, pero sobre todo tiene que resultar útil para la comprensión y mejoramiento de la realidad.

Existen tres formas de modelos principales: los icónicos, los analógicos y los teóricos.

3.2 MODELO ICÓNICO

Es una reproducción a escala del objeto real y sus propiedades relevantes. El modelo muestra la misma figura, proporciones y características que el objeto original.

Por ejemplo, se puede construir un modelo a escala de la estructura de un compresor o una turbina. Inclusive estos modelos los podemos someter a determinadas transformaciones para estudiar la funcionalidad del equipo.

3.3 MODELO ANALÓGICO

Es un modelo con apariencia física distinta al original, pero con comportamiento representativo. El modelo analógico no es una reproducción detallada de todas las cualidades del sistema real, sino que refleja solamente la estructura de relaciones y determinadas propiedades fundamentales de la realidad. Se establece una analogía entre el sistema real y el modelo, estudiándose el primero, utilizando como herramienta auxiliar el segundo.

Por ejemplo, lo encontramos en las computadoras electrónicas, las que han servido como modelos materiales de las operaciones intelectuales del hombre.

3.4 MODELO TEÓRICO

El modelo teórico (también denominado por algunos autores, analítico) utiliza símbolos para designar las propiedades del sistema real que se desea estudiar. Tiene la capacidad de representar las características y relaciones fundamentales del fenómeno, proporcionar explicaciones y sirve como guía para generar hipótesis teóricas. Generalmente se considera que revelan relaciones matemáticas o lógicas que representan leyes físicas que se cree gobiernan el comportamiento de la situación bajo investigación.

Un ejemplo de modelo teórico, son los símbolos y fórmulas de la Matemática y la Lógica son utilizados para la elaboración de los modelos teóricos, como lo encontramos en la teoría del pensamiento de Jean Piaget.

3.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS

1. El modelo es una reproducción que esquematiza las características de la realidad, las refleja, lo cual posibilita su investigación. El modelo debe cumplir determinado nivel de similitud estructural y funcional con la realidad, de manera que nos permita extrapolar los datos obtenidos en el modelo al objeto o fenómeno estudiado.
2. El modelo debe ser operativo y mucho más fácil de estudiar que el fenómeno real. El modelo se puede transformar y someter a estímulos diversos con vistas a su estudio, lo que debe resultar más económico que estudiar el sistema real.
3. Un mismo fenómeno de la realidad puede ser representado por varios modelos, inclusive rivales entre sí. Así pues, las diferentes concepciones teóricas pueden dar lugar a diferentes explicaciones y modelos sobre el mismo fenómeno real. Con frecuencia en la ciencia, cada modelo refleja algunas de las relaciones del fenómeno, quedando otras características importantes sin ser representadas. Esto hace necesario que se recurra a diversos modelos sobre el mismo fenómeno para poder abarcar todo el conjunto de sus relaciones y características importantes. Por supuesto, que el objetivo último del investigador es encontrar el modelo más general e integral, aquel que permita explicar el mayor número de propiedades y relaciones fundamentales del sistema.
4. El modelo se interpreta en la teoría científica. La teoría establece el significado de las variables, relaciones y constantes del modelo. Además, la teoría hace explícita y desarrolla todas las propiedades y relaciones implícitas en el modelo, representándolas de manera sistematizada e ideal y destacando la estructura, dinámica y leyes de desarrollo del fenómeno.
5. Un modelo permite construir, ilustrar y optimizar la actividad teórico-práctica y valorativa del hombre. Es un recurso eficaz para predecir acontecimientos, para anticipar hechos aún no observados.

3.6 LA MODELACIÓN DE PROCESOS

La modelación de procesos es la documentación, el análisis y diseño de la estructura de procesos de negocios, sus relaciones con los recursos necesarios para implementarlos y el ambiente en el cual van a ser usados. En este trabajo se habla sobre la importancia de modelar un Negocio y se mencionan lenguajes y herramientas para ello. Además, de la necesidad de identificación y uso de los sistemas de información en los procesos de negocios.

Hasta hace pocos años, la alternativa utilizada para medir la eficiencia de una empresa se basaba en el análisis exhaustivo de su Balance y Estado de Resultados; o lo que es lo mismo, de su información financiera. Sin embargo, actualmente, ante los retos que se plantean en el ámbito empresarial tan dinámico e impredecible, con tecnologías informativas emergentes y variables, resulta indispensable equilibrar la gestión financiera con otras variables significativas de la empresa (personas, procesos, calidad, clientes, entre otras), si se quiere llegar a implantar una estrategia de negocio competitiva.

Dentro de esta estrategia juega un papel fundamental el enfoque hacia la Gerencia o Administración de Procesos. Dicho enfoque, en la actualidad, se ha abierto paso junto al conocido Cuadro de Mando Integral para complementar los indicadores del sistema de control financiero con los indicadores de proceso, de forma tal que la organización logre alcanzar sus objetivos estratégicos.

3.7 CONCEPTO DE PROCESOS.

Existen varias definiciones del término “procesos” dadas por diferentes autores de las cuales se citan algunas a continuación:

- Dybå y Moe lo plantean como la “Secuencia de tareas o el conjunto de actividades y decisiones para producir un producto final”.
- D. Nogueira, A. Medina y C. Nogueira resumen la definición de proceso de varios autores como una “Secuencia ordenada y lógica de actividades repetitivas que se realizan en la organización por una persona, grupo o departamento, con la capacidad de transformar unas entradas (*inputs*) en

salidas o resultados programados (*ouputs*) para un destinatario (dentro o fuera de la empresa que lo ha solicitado y que son los clientes de cada proceso) con un valor agregado. Los procesos, generalmente, cruzan repetidamente las fronteras funcionales, fuerzan a la cooperación y crean una cultura de empresa distinta (más abierta, menos jerárquica, más orientada a obtener resultados que a mantener privilegios)”

- Cualquier actividad o grupo de actividades que emplee un insumo, le agregue valor a este y suministre un producto a un cliente externo o interno .
- Una valoración similar la emite la ISO 9000 donde refiere que un Proceso puede definirse como un “Conjunto de actividades interrelacionadas que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados”. Estas actividades requieren de la asignación de recursos tales como personal y material. En la figura 18 se muestra el proceso genérico descrito por la ISO.

A grandes rasgos se hace alusión a que los elementos de entrada y los resultados previstos pueden ser tangibles (tal como equipos, materiales o componentes) o intangibles (tal como energía o información). Además de que, los resultados también pueden ser no intencionados o no deseados.

La norma ISO explica que cada proceso tiene clientes y otras partes (quienes pueden ser internos o externos a la organización) que son afectados por el proceso y quienes definen los resultados requeridos de acuerdo con sus necesidades y expectativas.

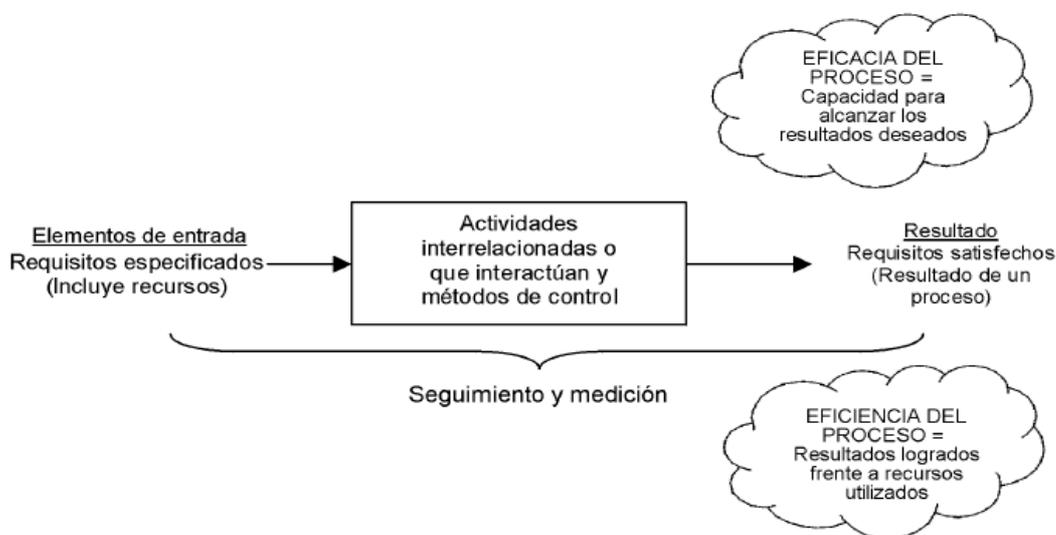


Figura 18 Proceso Genérico descrito por la ISO.

Los procesos describen cómo es realizado el trabajo en una empresa y se caracterizan por ser observables, medibles, mejorables y repetitivos.

Existe un consenso en centrar los esfuerzos en los procesos clave; o sea, aquellos que inciden de manera significativa en los objetivos estratégicos y tienen un fuerte impacto sobre las expectativas del cliente o consumen una parte importante de los recursos de la empresa.

Por ello al involucrarse en el perfeccionamiento de un proceso, se debe aprender acerca de qué sucede en ellos, y en el uso de la tecnología para mejorar tanto el proceso como los servicios y productos resultantes.

A finales de los 80s y principios de los 90s varios negocios tradicionales comenzaron a pasar por un período de cambios dramáticos. Varios de ellos tuvieron que cambiar la forma de operar y quizás por primera vez, pensar continuamente sobre sus procesos de negocios. Esto conllevó el crecimiento de la Reingeniería del Proceso de Negocio o *Business Process Reengineering* (BPR). En aquel entonces existieron varios *gurus* de BPR, todos con sus propios métodos, pero con un tema común, que para la reingeniería era necesario, entender los procesos existentes. Esto conllevó el crecimiento de la Modelación del Proceso de Negocios *Business*

Process Modelling (BPM): la captura, documentación y análisis del proceso de negocio.

Aunque muy similar a los conceptos de proceso antes mencionados, en la literatura se suele dar una especificación acerca de Procesos de negocio, a la cual se le refiere como la definición de tareas y secuencias de esas tareas necesarias para entregar una función de negocio. De la misma forma se deriva que la Modelación de Procesos es la documentación, análisis y diseño de la estructura de procesos de negocios, sus relaciones con los recursos necesitados para implementarlo y el ambiente en el cual van a ser usados.

La modelación de procesos tiene como objetivos: alcanzar un entendimiento común de los procesos con el menor esfuerzo posible, poder realizar un análisis económico y un análisis de costos de procesos individuales, mejorar la calidad de los procesos y optimizar la producción.

Luego, para entender cómo operan los negocios modernos se precisa entender no solo los procesos de negocios, sino también los datos, sistemas, organizaciones, objetivos de negocios, productos, métricas, riesgos, regulaciones, interfases, experiencias e incluso cultura y entorno. Además, entenderlos aisladamente no es suficiente, lo importante son sus relaciones e interacciones. A esto se le suele llamar Modelación de Negocios.

Idealmente, lo primero en una empresa son los objetivos de negocios; que para lograrlos se diseñan los procesos, los sistemas, organizaciones, datos, etc. que deben soportar el proceso. Pero se debe tener bien claro que esto solo pudiera lograrse con compañías de nuevo comienzo, ya que en las compañías existentes se consta de complejos sistemas y modelos de datos, y muchas veces los procesos tienen que ser diseñados en torno a las complejidades de los sistemas ya existentes.

3.8 DEFINICIONES Y CARACTERÍSTICAS DE UN MODELO.

Para la modelación de un proceso o un negocio Scheer define los siguientes aspectos como características clave :

- Una representación de algo real

- Construido a cierta escala y cierto nivel de detalle para mostrar puntos de vista
- Representativo de una foto fija en el tiempo
- Construido para un propósito

Los Modelos son representaciones justas de cosas reales, modeladas para un propósito en particular y por tanto con puntos de vistas particulares. Algunas de las partes del negocio serán modeladas superficialmente mientras que otras necesitan ser exactamente definidas en aras de automatizarlas.

3.9 IMPORTANCIA DE MODELAR UN NEGOCIO.

Varias compañías acostumbran a invertir mucho tiempo en hablar respecto a objetivos y estructuras organizativas y muy poco en reflexionar acerca de la modelación e identificación de procesos, como si esta etapa del desarrollo administrativo hubiese caído en desuso. Pero resulta muy difícil automatizar un negocio si no se entiende cómo funciona. Una compañía no puede tener interfases de negocio sofisticadas con otros negocios si no se entiende qué hace su propio negocio. Aún más, no puede sobrevivir a los rápidos cambios en el mercado si no tiene la visión de qué necesita su negocio para desarrollarse. Por último, no puede tener un negocio electrónico exitoso si no tiene sus procesos, datos y sistemas bajo control . Algunos aciertos acerca de la importancia que representa modelar un modelo se relacionan a continuación:

- Introduce rigor y métodos
- Provee un record único y consistente
- Integra procesos, sistemas, organización, información y datos
- Permite ver y analizar las relaciones
- Provee múltiples puntos de vista
- Soporta validación y prueba
- Provee un medio ideal para la evaluación de escenarios
- Provee una plataforma para ingeniería rápida de procesos.

3.10 FASES DE LA MODELACIÓN.

Típicamente, un proyecto de modelación incluye varias fases:

- La materia de modelación
¿Qué Modelar? (la empresa o áreas de la empresa)
- La perspectiva
¿Para qué propósito Modelar? (certificación, selección de Software o rediseño organizacional)
- Métodos y herramientas de modelación
¿Cómo Modelar? (métodos y herramientas)

Los requerimientos esenciales de las técnicas de modelación están basados en la identificación de los propósitos y en los modeladores o usuarios involucrados en la modelación del proceso. A diferencia de los modelos de datos, aún no se ha establecido un estándar único para la modelación de procesos. Una muestra de los estándares de modelos de BPM y especificaciones, incluye: *Business Process Execution Language* (BPMEEL); el *Business Process Modeling Initiative* (BPMI); el *Workflow Management Coalition* (WfMC); el *World Wide Web Consortium* (W3C) .

A continuación se listan requerimientos típicos para técnicas de modelación de procesos, centrándose sobre la modelación para la documentación y mejoramiento de procesos:

- Presentar claramente la secuencia de funciones incluyendo conexiones y divisiones. Permitir diferentes jerarquías de modelos además de enlazar modelos de procesos en el mismo nivel a través de interfases.
- Describir el modelo de proceso en modelos de datos, modelos de organización, diagramas de descomposición funcional y además que sea competente.
- Definir las técnicas de modelación en un formato suficientemente formal para que sea capaz de proveer al menos una solución básica provechosa para aplicaciones extendidas, tales como simulación, diseño de software o gestión de flujo de trabajo también llamados *workflow*.

- Finalmente, es vital que exista una herramienta que soporte estas técnicas de modelación. De hecho, las ventajas de las técnicas de modelación, así como aquellas herramientas de modelación, siempre estarán a la vez evaluadas.

El análisis de los modelos de procesos de negocios está enfocado principalmente a la completitud de estos, es decir, qué elementos de la realidad que va a ser modelada pueden ser representados. El ámbito de la modelación considera aspectos inherentes a los procesos de negocios y aspectos de la relación proceso de negocios-sistemas informáticos.

3.11 LENGUAJES Y HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN.

El punto perfecto de modelación de negocio es tener una forma consistente de documentar y analizar su negocio completo. Por ello es esencial que cada uno modele su proceso de negocio usando el mismo enfoque o método. Luego los modelos pueden ser conectados o al menos conciliados con otros y pueden ser entendidos.

Cada vez más, se hace necesario compartir partes de un modelo de negocio determinado con otros negocios, con suministradores, u organizaciones de evaluación de calidad y reguladores. Gracias al uso de métodos se asegura la estandarización dentro del negocio, construido con experiencias y buenas prácticas, además de hacer modelos entendibles para otros.

Es habitual distinguir entre técnicas de modelado y herramientas de modelado. Las técnicas se refieren a los símbolos y diagramas empleados para analizar el sistema, las cuales pueden, o no, estar soportadas por aplicaciones *software* (herramientas) que ayudan en el proceso de modelado y permiten la construcción de un repositorio de modelos. Para una descripción detallada de técnicas y herramientas de modelado, ver por ejemplo el trabajo realizado por Kettinger en .

Para la modelación de procesos se pueden encontrar disímiles lenguajes, cada uno con ventajas y usos diferentes, entre ellos se puede citar el UML (*Unified Modeling Language*), IDEFX (*Integrated Computer Aided Manufacturing Definition*), EPC

(Event-driven Process Chain), BAM (*Business Activity Model*), RSD (*Relation System Diagram*), POSD (*Process Oriented System Design*), DFD (*Data Flow Diagram*) .

Los modelos o lenguajes de modelación antes mencionados, según la literatura consultada no permiten la representación de: tipo de proceso, tipo de sistema, nivel de importancia, y capacidad de automatización de actividades. Tampoco es representable la relación de orden entre actividades y recursos.

La gran mayoría de estos modelos no tienen elementos específicos que permitan representar la relación entre las actividades de los procesos y los sistemas informáticos.

Muchos modelos permiten representar la presencia de sistemas informáticos asociados a los procesos, mediante notaciones de flujo.

Un aspecto importante es que los modelos deben ser comprensibles por los no-especialistas en modelado, siendo esto un requisito en cualquier proyecto de BPM . Por lo anterior se pretende que a mediano/largo plazo los actores en el proceso sean capaces de modelar. Por otra parte, dada la especificidad de los procesos, las mejoras deben ser propuestas por los actores del proceso.

Como ya se ha comentado, se pretende que algunas de las funciones descritas en el modelo sean implementadas mediante Tecnologías Informáticas, por lo que es preciso proporcionar una descripción de las mismas en términos de un lenguaje formal para el desarrollo de software. En este trabajo en particular se escoge el EPC, por ser un estándar de desarrollo de sistemas software. Aunque es conocido que la integración de modelos de procesos con modelos de desarrollo de software no es una cuestión cerrada , se pretende la elección de una técnica donde al menos algunas de estas cuestiones ya hayan sido abordadas.

Es sabido que no es imprescindible el uso de un software para la modelación del negocio, pero claramente existe un gran número de ventajas al usar una herramienta para ello, tales como :

- Incitar a la estandarización.
- Mejora la calidad y el rigor del diseño del proceso.
- Provee un registro único, consistente a través de un repositorio único.

- Impulsa el uso de un vocabulario de procesos común y bien concebido.
- Permite múltiples puntos de vista.
- Provee una herramienta de análisis.
- Soporta la reutilización.
- Beneficia la validación *walk-through* y la experimentación.
- Es el punto de partida para el desarrollo de sistemas de software o sistemas *workflow*.
- Proporciona accesibilidad ubicua a todos los usuarios de procesos.
- Permite la publicación WWW.
- Soporta talleres virtuales.
- Facilita la retroalimentación desde los usuarios finales.

Usar un método de modelación proporciona un marco de trabajo para la estandarización, y usar una herramienta ayuda a reforzar este estándar. Los métodos pueden usarse sin la ayuda de una herramienta, pero el hecho de usarla los hace mucho más fácil. Las herramientas proveen símbolos, tipos de diagramas y relaciones bien definidos los cuales ayudan a los usuarios a seguir los métodos.

Las diferencias más significativas entre los métodos basados en papel y el uso de herramientas, según Scheer en , es que los modelos no son sólo diagramas en una ficha de papel. Los modelos son construidos de objetos y ambos residen en un repositorio electrónico o base de datos. La herramienta puede interrogar estos objetos y modelos; sus atributos y relaciones pueden ser analizados y presentados en un reporte. Los objetos que representan entidades de negocios comunes pueden ser reutilizados en varios modelos llevando consigo sus atributos. Los modelos pueden ser analizados, simulados y probados.

Realizando un análisis del panorama en cuanto a las herramientas disponibles para llevar a cabo la representación y análisis de los modelos que se desean desarrollar en este trabajo se pudieron encontrar los siguientes :

- FirstSTEP (Interfacing Technologies)
- Metis (NCR)
- PACE (IBE Simulation Engineering)

- MooGo/IEM (IPK Berlin)
- CimTool (RGCP)
- GraiTools 1.0 (GraiSoft)
- ARIS Web Designer (IDS Scheer)

FIRSTSTEP.

El FirstSTEP es una tecnología de interconexión, su *kernel* fue desarrollado por NRC en Ottawa Canadá, básicamente es una herramienta de modelación y de soporte a la toma de decisiones. Está adecuadamente ajustado a escenarios *What-If*. *Embebed simulation capabilities* .

METIS.

Metis, también desarrollada por NCR y Computas, es una herramienta para la adquisición y visualización del conocimiento de la empresa, mayormente usada para la definición de la arquitectura empresarial, presenta además bondades para la organización, el análisis y el diseño.

PACE.

PACE, de origen alemán, de 1994, soporta la modelación, simulación, visualización y optimización de técnicas y procesos de negocios. Su lenguaje MSL de modelación semigráfico está basado en las conocidas Redes de Petri, lo cual le atribuye modelos de red jerárquicos. Posee además varias características de integración avanzada como técnicas Fuzzy, procedimiento de redes, métodos de optimización, distribuciones probabilísticas, etc. .

MooGo/IEM.

MooGo/IEM, comercializado por PSI, también alemán, es desarrollado en Berlín por IPK en el 1994, basado en modelos SADT (*Structured Analysis and Design Technique*) posee una fuerte orientación a objeto con tres tipos fundamentales, Órdenes, Productos y Recursos .

CimTool.

CimTool, fue desarrollado por Rene Gaches en 1995 basado en estructuras CIMOSA, limitado a la modelación de funciones y vistas de informaciones mayormente, es catalogado como muy fácil de aprender y usar .

GraiTools.

GraiTools, desarrollada por GraiSoft en el 2003, está específicamente basada en el método GRAI y su mayor fortaleza es el centro de análisis de decisión que posee .

ARIS.

ARIS Web Designer, su nombre se deriva del método *Architecture of Integrated Information Systems* desarrollado por el Profesor August-Wilhelm Scheer en el Instituto de *Business Informatics* de la Universidad de Saarlandes en colaboración con SAP AG .

ARIS es la metodología número uno en ventas en todo el mundo y su principal uso ha sido el modelado de procesos descomponiendo el mismo en una serie de aspectos o vistas, como la vista de funciones, datos, o recursos. Estas vistas están interrelacionadas a través de la llamada “vista de control”, que describe el proceso en términos de una cadena de procesos controlada por eventos (*Event-driven Process Chain* o EPC). El EPC, es un conjunto de eventos y funciones que siguen un flujo lógico controlado por operadores de tipo OR, AND, y XOR. Para una descripción más detallada de las EPC, se puede consultar a Scheer en aunque se profundizará durante el empleo de la misma en el Capítulo II del presente trabajo.

Algunas de las muchas razones para usar ARIS son :

- Tiene un fuerte enfoque a la modelación de las relaciones de negocios sofisticados.
- Es una herramienta de diseño de procesos multiusuario basado en PC.
- Es un software fiable y estable.
- Tiene abundantes funcionalidades y es configurable a los requerimientos de los usuarios.
- Tiene buenas herramientas para la navegación entre modelos.
- Es consecuente con *Microsoft Windows* y de fácil uso.
- Tiene una estrategia jerárquica para la descomposición funcional.
- Soporta la fusión de variantes y modelos.
- Proporciona animación y simulación de procesos.

- Comprende soporte para objetivos de negocio, medidas y *Balanced Scorecard*.
- Provee un generador HTML y escritores de reportes.

La herramienta ARIS cumple los requisitos como técnica de modelación en cuanto a la facilidad de comprensión por no especialistas, así como una vista multi-nivel del proceso. Respecto a su integración con UML, se conoce de la realización de algunos trabajos previos.

Por lo que respecta a los productos de IDS Scheer, se trata de herramientas líder en su sector y que cuentan con más de 40 000 implantaciones. Respecto a los requisitos, este conjunto de herramientas permiten el desarrollo de modelos de forma colaborativa a través de un servidor (repositorio) de modelos accesible vía Internet, así como de suficientes capacidades de simulación de los modelos estáticos.

3.12 SISTEMAS DE INFORMACIÓN

El desarrollo de los sistemas de información (SI) es un proceso fundamental en muchas organizaciones. Las entradas principales de este proceso son los recursos TIC, los recursos humanos de desarrollo y la información de sistemas existentes (comerciales o desarrollados en otras organizaciones). Las salidas principales son el nuevo SI propiamente (software, hardware y procesos computacionales) y los procesos administrativos asociados.

Algunas de las actividades pueden considerar la compra de “paquetes comerciales de software”, tanto para el desarrollo del SI como para ser adaptados y utilizados como parte del producto final. También algunas o todas estas actividades pueden ser externalizadas (*outsourcing*), contratándose los servicios especializados de empresas de tecnologías.

Las ventajas de utilizar paquetes comerciales de software incluyen :

- incorporarse a un estándar que representa la mejor “práctica” del negocio.
- ofrece mayor compatibilidad con los SI de las cadenas de proveedores y clientes.
- es confiable, probado y exitoso.

- puede abaratar los costos de desarrollo (pero puede aumentar los de mantenimiento si es que se incorporan adaptaciones a los procesos, estructura y cultura organizacional).

Los beneficios (tangibles e intangibles) que aporta un Sistema de Información se refieren al valor que gana una organización al introducir estos sistemas. Inicialmente los SI se medían exclusivamente en cuanto a su capacidad de reducir costos por medio de mejoras a la productividad y reducción de personal. Sin embargo, el aumento de los costos de desarrollo, operación y mantenimiento ha provocado un cuestionamiento de este último tipo de beneficio. Hoy en día se consideran beneficios (algunos más intangibles) tales como incrementos en la satisfacción del usuario, ganancia de ventajas competitivas, y fortalecimiento de la relación con proveedores y clientes, entre otros .

Algunos de los beneficios típicos que se pueden observar en un proyecto de SI son los siguientes:

- Precisión de la información (de procesos, clientes, proveedores, mercado, etc.)
- Calidad de la información
- Usabilidad de la información (facilidad de acceso, manipulación y aprendizaje)
- Flexibilidad y adaptabilidad del sistema y sus procesos
- Satisfacción del usuario
- Funcionalidad
- Confiabilidad
- Volumen, utilización y relevancia (más información que puede ser utilizada en forma focalizada)
- Productividad
- Rentabilidad
- Seguridad
- Rapidez y oportunidad

En la fase de planificación o concepción del SI se debe decidir si se desarrollará internamente, se comprará el sistema completo o partes de él, o se externalizarán algunas o todas las actividades del desarrollo .

La toma de decisión en este sentido considera aspectos de estrategia organizacional, análisis de costos/beneficios (desarrollo, operación y mantenimiento) y oportunidad. Con respecto a la estrategia, la organización puede decidir tener un equipo técnico de alto nivel (y alto costo) para desarrollar y mantener sus propios SI que generen ventajas competitivas pero por muy consolidado que sea el equipo técnico interno, siempre es bueno desarrollar alianzas con empresas tecnológicas para asegurar un desarrollo alineado, sostenido y sustentable, alineado con los estándares, tendencias e innovaciones de la industria de las TIC.

CAPÍTULO IV
MODELACIÓN DE LA
BOMBA P 100 A/B

CAPITULO IV. MODELACIÓN DE LA BOMBA P 100 A/B.

4.1 DESARROLLO DEL MODELO.

El modelo que se presenta para evaluar la operación de La bomba y determinar sus indicadores de energía en sus diferentes niveles de presión, temperatura y flujo, se basa en la capacidad que tiene cada corriente de desarrollar un trabajo ó entregar energía tomando como punto de partida la energía que suministra el consumo de la misma. El modelo se basa en determinar la eficiencia y el NPSH de la bomba a diferentes cargas es posible considerar además los costos de operación, mantenimiento y servicios diversos, como laboratorio y tratamiento de efluentes, así como el costo del equipo que interviene en la generación de energía.

4.2 SUMINISTRO DE AGUA CRUDA

El agua que se recibe del exterior requiere ser bombeada al sistema de pre tratamiento de agua por lo que su costo únicamente se incrementa por el consumo de la energía utilizada, la cual puede ser energía eléctrica o vapor para el caso de turbo bombas.

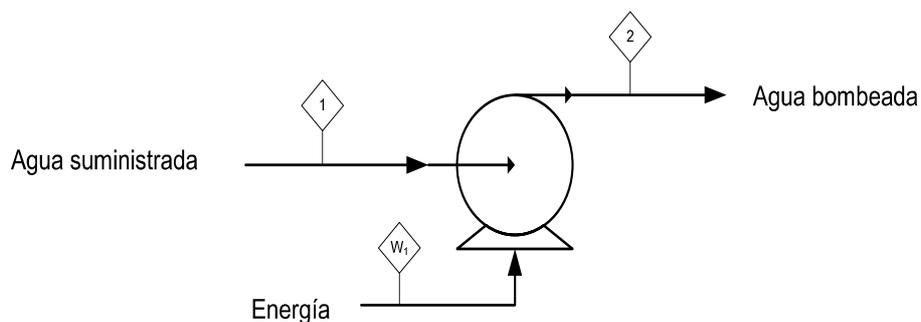


Figura 19 Sistema de bombeo

4.3 ESTUDIO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

La presente experiencia ha tenido como objetivo principal la modelación de una bomba centrífuga. A partir de esta experiencia y de la toma de datos, es posible

la confección de las curvas características para la misma; dentro de éstas, la energía suministrada por la bomba (en metros), la potencia de eje y la de eficiencia.

4.4 MÉTODO EXPERIMENTAL

La experiencia, como fue señalado en el inciso anterior, consistió en realizar mediciones de:

- Caudal: mediante un sistema conectado a un Venturímetro.
- Presiones a la entrada y a la salida de la bomba mediante un manómetro.
- Rpm de la bomba en forma directa mediante un sistema digital.
- Temperatura de entrada de agua en la bomba

Para ello fue necesario variar el caudal mediante una válvula dispuesta a la salida de la bomba, de forma que se realizaran siete mediciones pasando desde la válvula completamente abierta hasta la misma cerrada. Se espera que la variación del caudal provoque un cambio en los valores de las presiones a la entrada y a la salida de la bomba como así mismo, un cambio en sus rpm, y de variación de la fuerza.

Estos datos servirán para calcular, mediante determinadas relaciones (que se indicarán más adelante), la altura, eficiencia y potencia de la bomba, como contamos con un set de caudales, contaremos también con un set de datos que entraremos a graficar.

4.5 FÓRMULAS APLICADAS

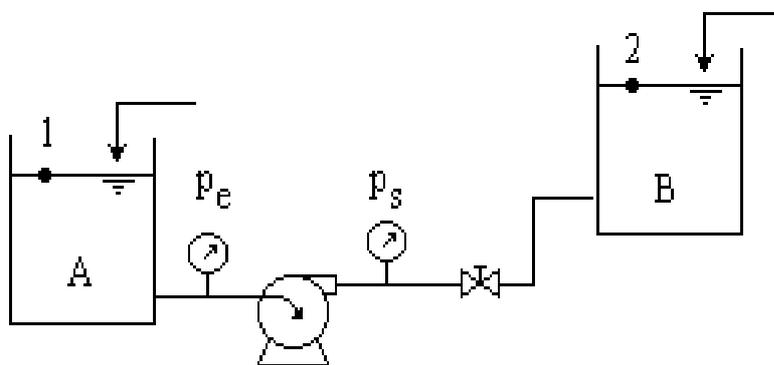


Figura 20 Esquema de instalación.

Si se analiza el caso presentado en la figura 20, aplicando la ecuación Bernoulli se obtiene:

$$B_e + H_b = B_s$$

Donde

C: velocidad del fluido.
 p: presión (el subíndice e indica entrada y s salida).
 $\frac{p_e}{\gamma} + \frac{C_e^2}{2g} + Z_e + H_b = \frac{p_s}{\gamma} + \frac{C_s^2}{2g} + Z_s$

Z: altura.

g: aceleración de gravedad.

Como $C_e \approx C_s$ y $Z_e \approx Z_s$, así el término para la energía entregada por la bomba al fluido, expresada en altura es:

$$H_b = \frac{p_s - p_e}{\gamma}$$

Esta bomba está acoplada a un motor eléctrico monofásico, al cual se le suministra una potencia, N_{elec} dada por:

$$N_{elec} = V \cdot I$$

Para calcular la potencia eje del motor eléctrico se dispone de un sistema de freno, mediante el cual se registra la fuerza del motor a una distancia, b, del eje de giro, de esta forma la calculamos mediante la expresión:

$$N_{ejeMotor} = \tau \cdot \omega = F \times b \cdot \omega$$

Conocidas estas dos potencias podemos calcular la eficiencia del motor eléctrico:

$$\eta_{motor} = \frac{N_{elec}}{N_{ejeMotor}}$$

Continuando, con las características de la bomba. Como el motor está

conectado con un sistema de transmisión por correa a la bomba, la potencia eje de la bomba se ve afectada por el rendimiento mecánico de dicha transmisión,

$\eta_{transmisión}$, así tenemos:

$$N_{eje\ bomba} = N_{eje\ motor} \cdot \eta_{transmisión}$$

Por último la potencia útil, es decir la potencia suministrada al fluido es:

$$N_{fluido} = \gamma \cdot \dot{V}_s \cdot H$$

Así la eficiencia d la bomba es:

$$\eta_{bomba} = \frac{N_{util}}{N_{eje\ bomba}} = \frac{\gamma \cdot \dot{V}_s \cdot H}{N_{eje\ bomba}}$$

4.6 DATOS EXPERIMENTALES

Se tomaron muestras diarias durante el mes de mayo de 2011 obteniéndose los valores promedio de la Tabla 1:

Tabla 1: Variables obtenidas experimentalmente.

CAUDAL (GPM)	Pe (KG/CM ²)	Ps (KG/CM ²)	RPM	TEMPERATURA (°C)	VOLTAJE (VOLT)
60	-0.18	4.1	1750	32	440
80	-0.16	3.9	1750	33	440
100	-0.13	3.6	1750	35	440
120	-0.10	3.1	1750	37	440
140	-0.06	2.7	1750	33	440

4.7 DATOS DEL FABRICANTE

Tabla 2. Datos del fabricante de la bomba

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD
FLUIDO	AGUA	-
TEMPERATURA	35	°C
ALTURA DE LIQUIDO SOBRE EL OJO IMPULSOR	2	M
FLUJO	120	GPM
PRESION DE ENTRADA	0	Kg/cm ²
PRESION DE ENTRADA	3	Kg/cm ²
VELOCIDAD	1750	RPM

4.8 METOLOGIA Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN HYSYS DE LA BOMBA CENTRIFUGA P 100 A/B.

A continuación se expone la secuencia de la simulación en HYSYS de la bomba centrífuga P 100 A/B, aparecen en pantalla tanto la entrada de todos los datos de operación como los resultados obtenidos:

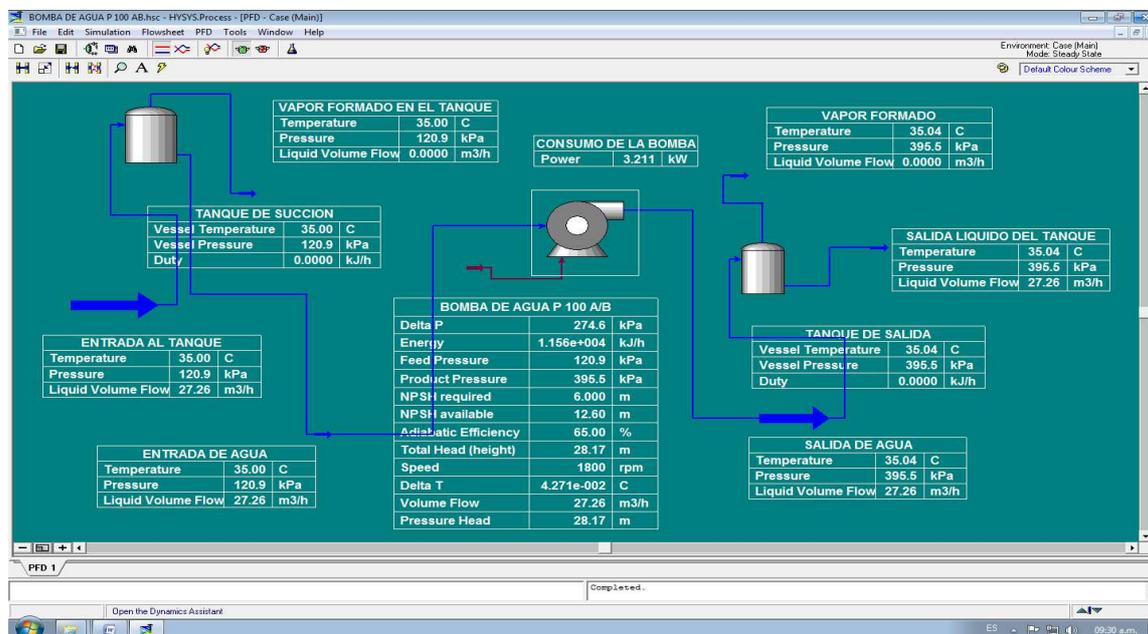


Figura 21. Pantalla de instalación de la bomba centrífuga P 100 A/B en el simulador HYSYS

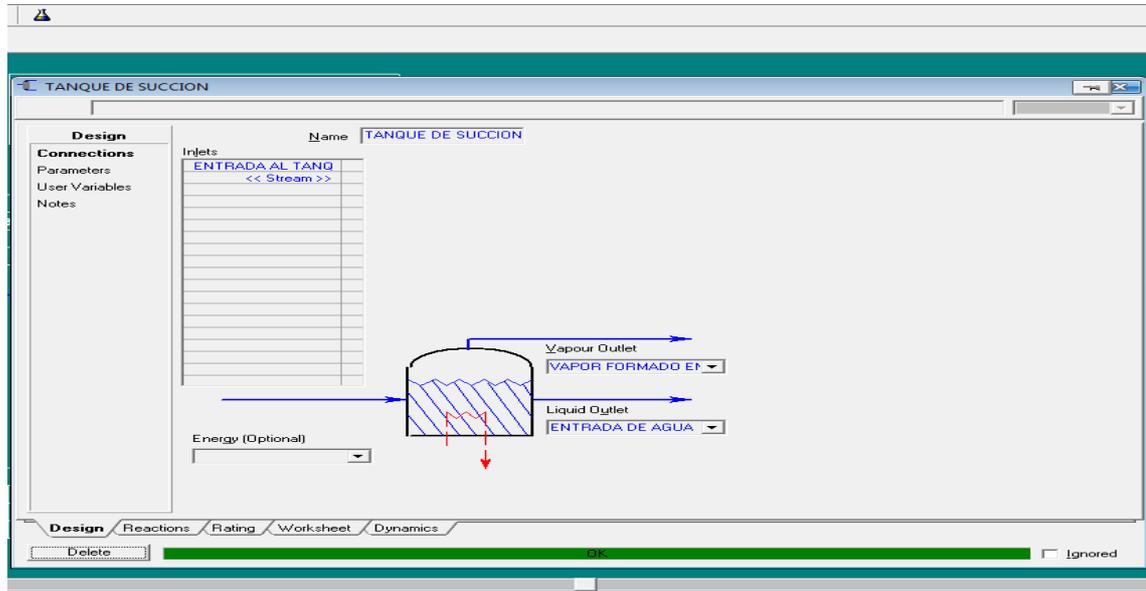


Figura 22. Pantalla del tanque de succión de la bomba centrífuga P 100 A/B en el simulador HYSYS

Stream Name	ENTRADA AL TAN	Aqueous Phase
Vapour / Phase Fraction	0.00000	1.00000
Temperature [C]	35.000	35.000
Pressure [kPa]	120.94	120.94
Molar Flow [kgmole/h]	1509.9	1509.9
Mass Flow [kg/h]	27200	27200
Liquid Volume Flow [m3/h]	27.26	27.26
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.843e+005	-2.843e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	9.0969	9.0969
Heat Flow [kJ/h]	-4.2919e+08	-4.2919e+08
Std Liq Vol Flow [m3/h]	27.23	27.23

Figura 23. Pantalla de los datos del tanque de succión de la bomba centrífuga P 100 A/B en el simulador HYSYS

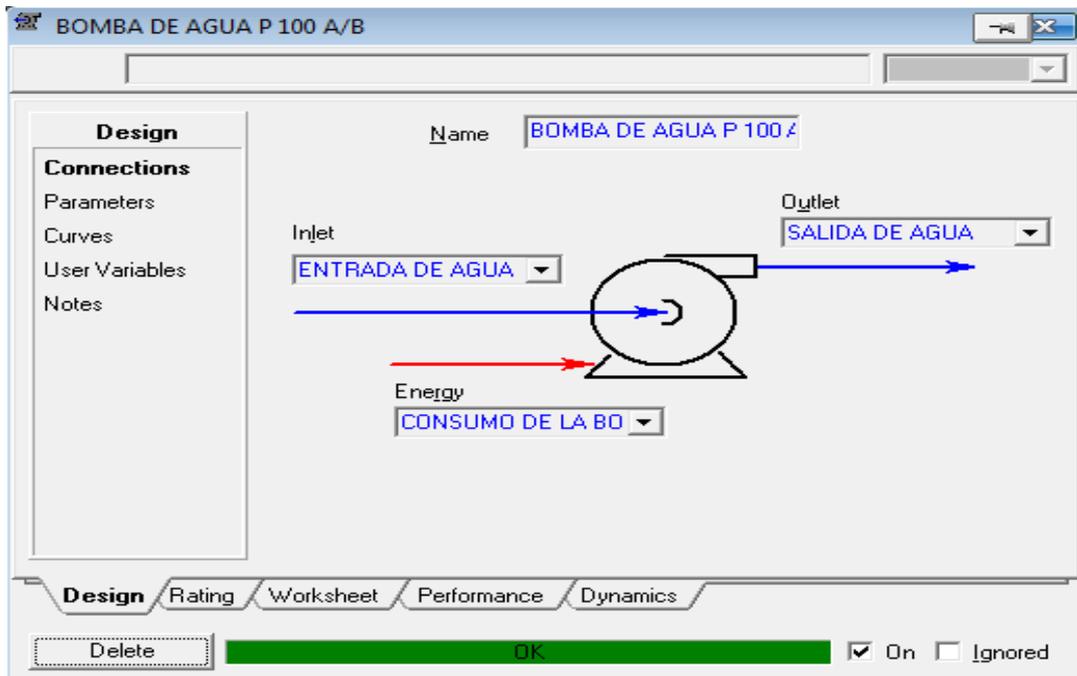


Figura 24. Pantalla de la instalación de la bomba centrífuga de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

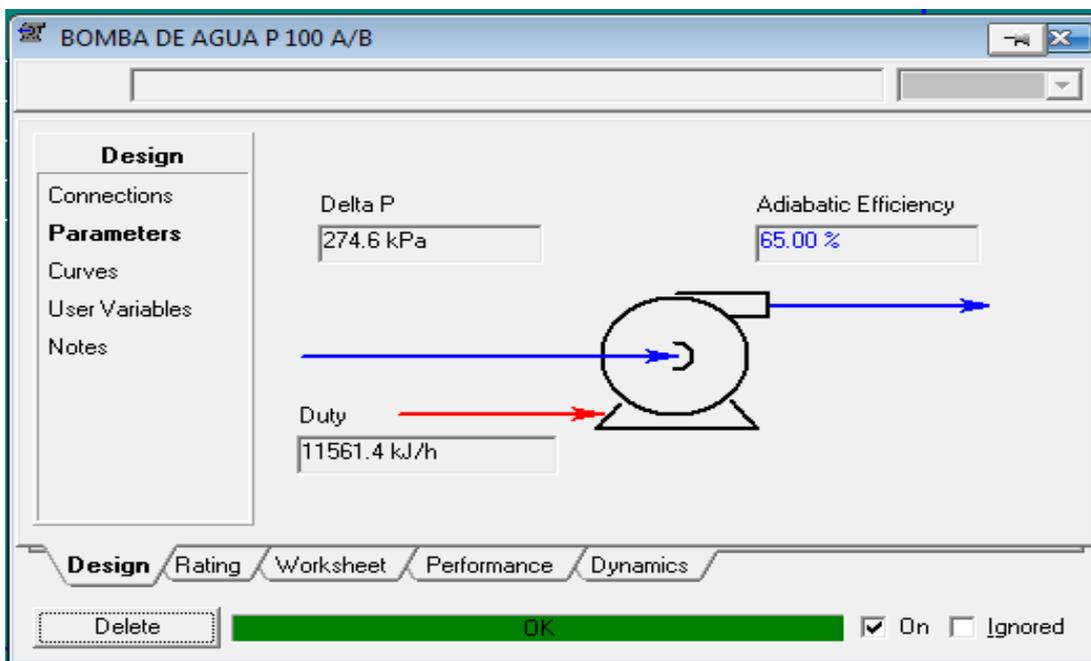


Figura 25. Pantalla de los parámetros calculados (DELTA P, DUTY Y EFICIENCIA) de la bomba centrífuga de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

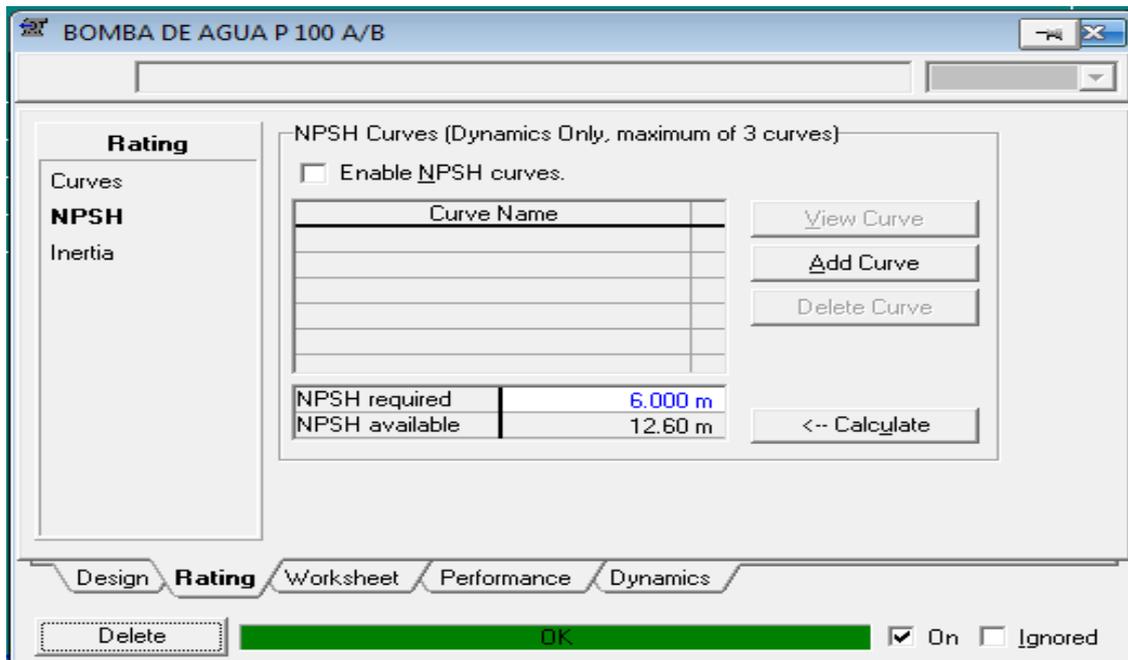


Figura 26. Pantalla de los parámetros calculados (NPSH DISPONIBLE Y NPSH REQUERIDO) de la bomba centrífuga de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

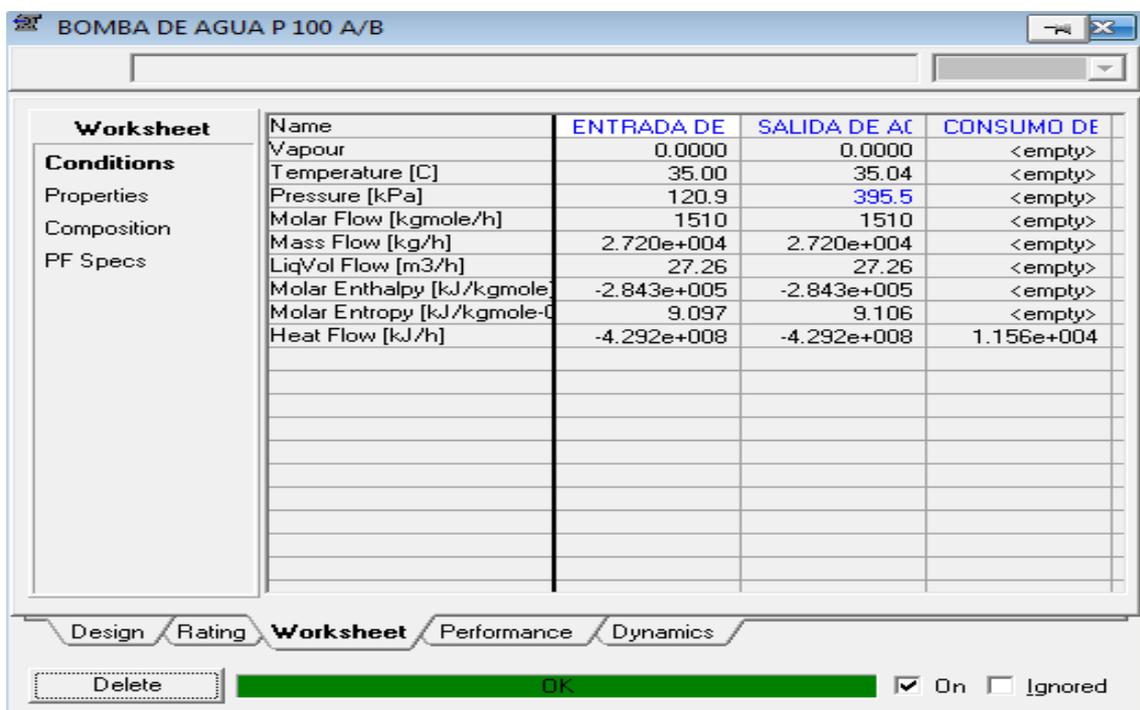


Figura 27. Pantalla de las condiciones de trabajo de la bomba centrífuga de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

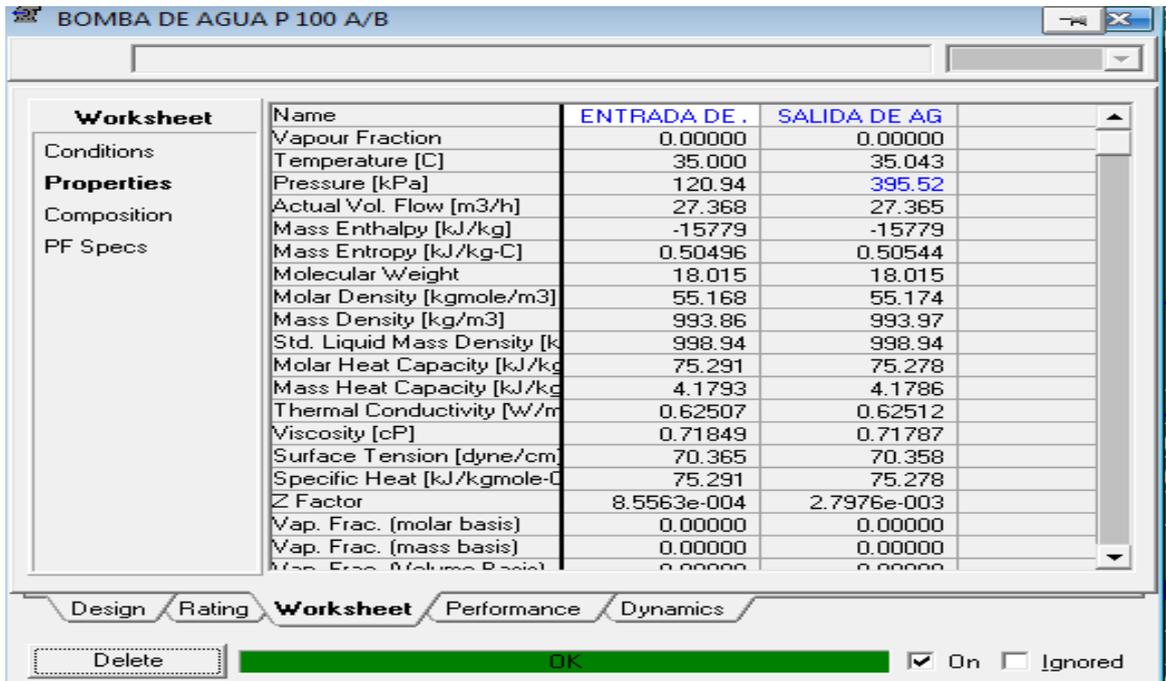


Figura 28. Pantalla de las propiedades de las corrientes de entrada y salida de agua de la bomba centrífuga de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

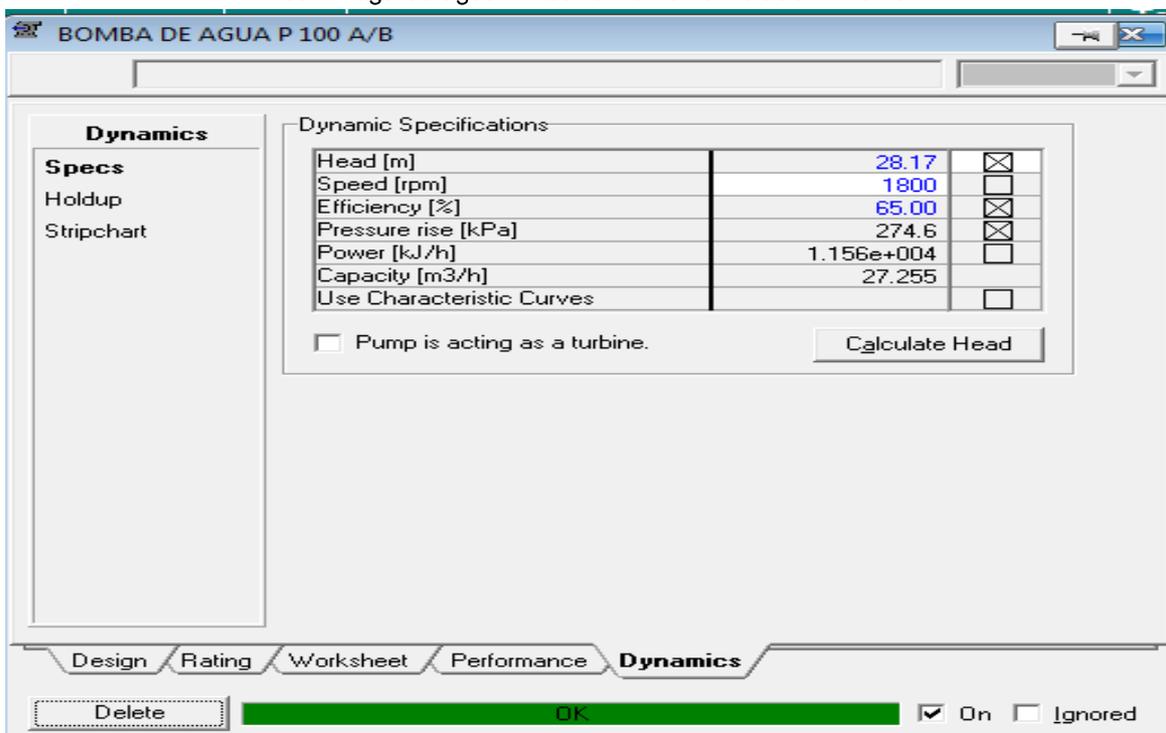


Figura 29. Pantalla de los resultados del cálculo de la bomba centrífuga de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

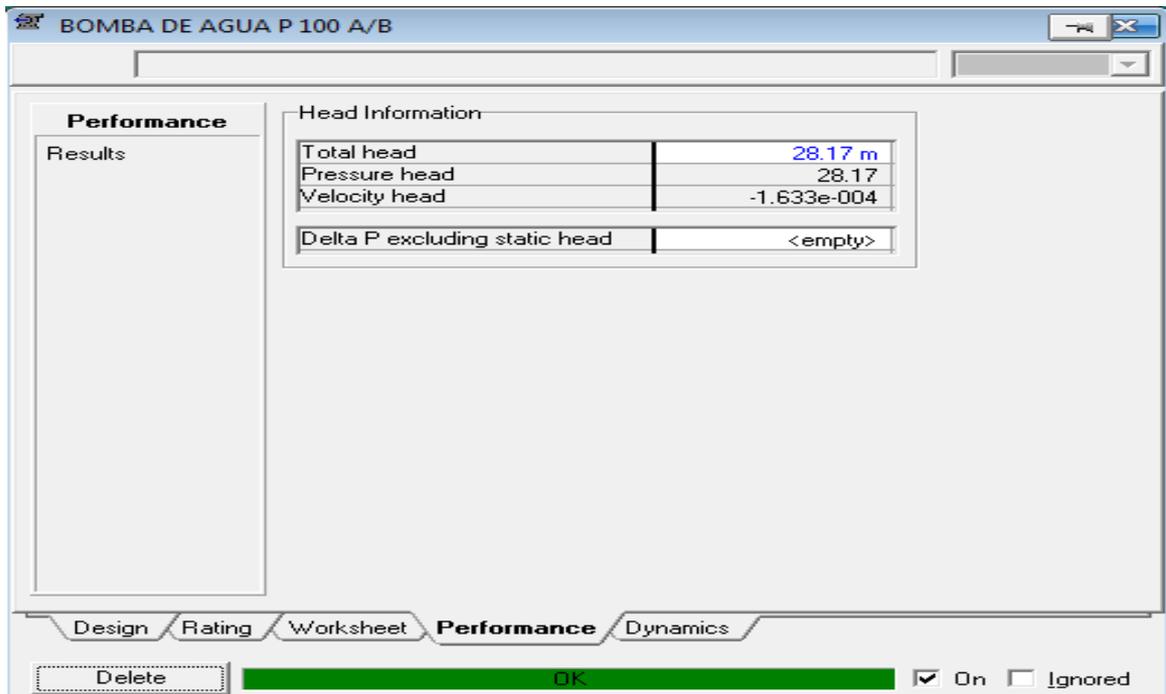


Figura 30. Pantalla de los resultados del cálculo de la bomba centrífuga de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

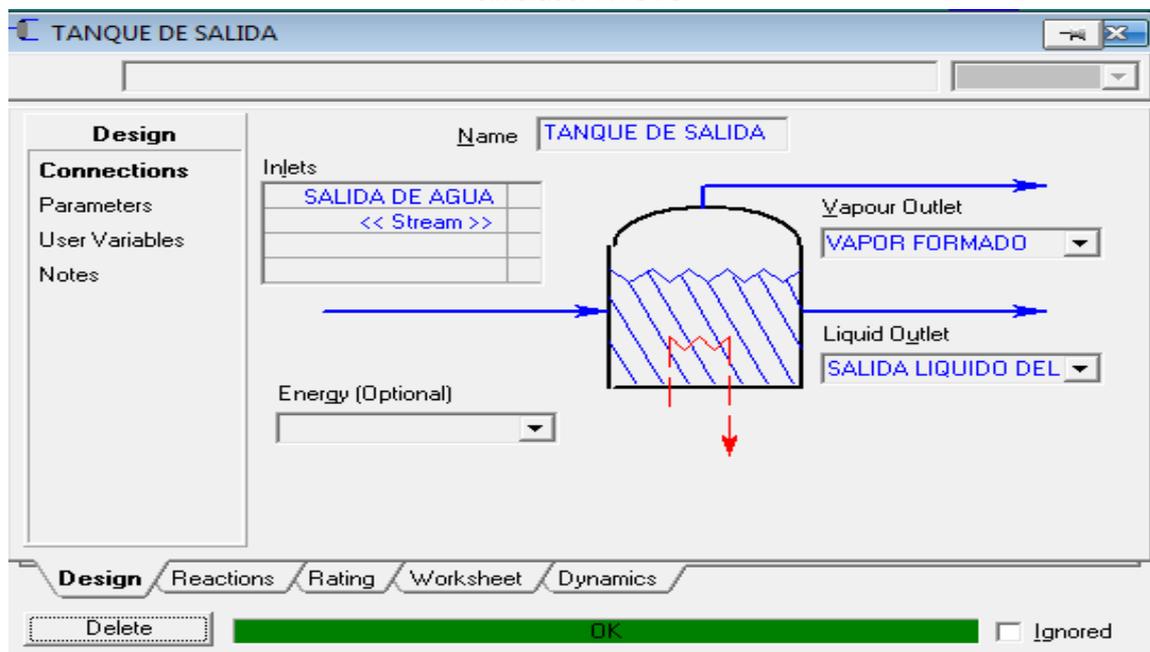


Figura 31. Pantalla del tanque de descarga de la bomba centrífuga P 100 A/B en el simulador HYSYS

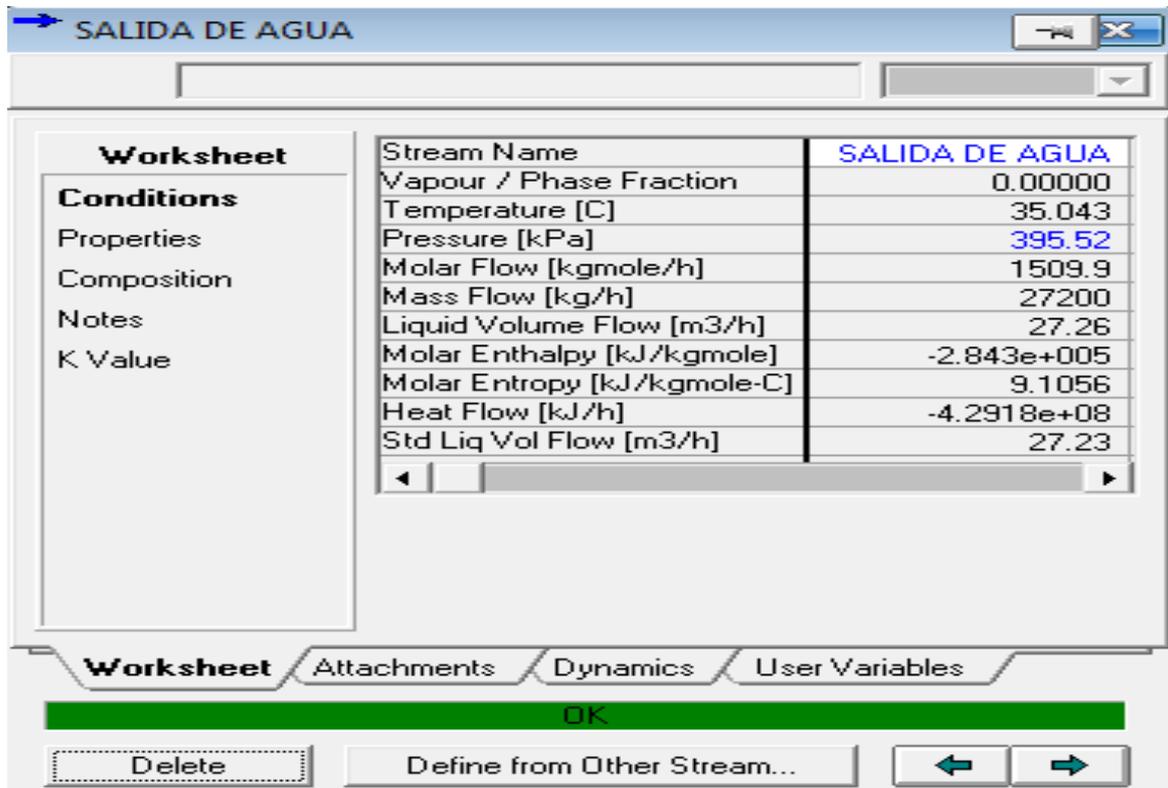


Figura 32. Pantalla de las condiciones de trabajo de la corriente de salida de la bomba de agua P 100 A/B en el simulador HYSYS

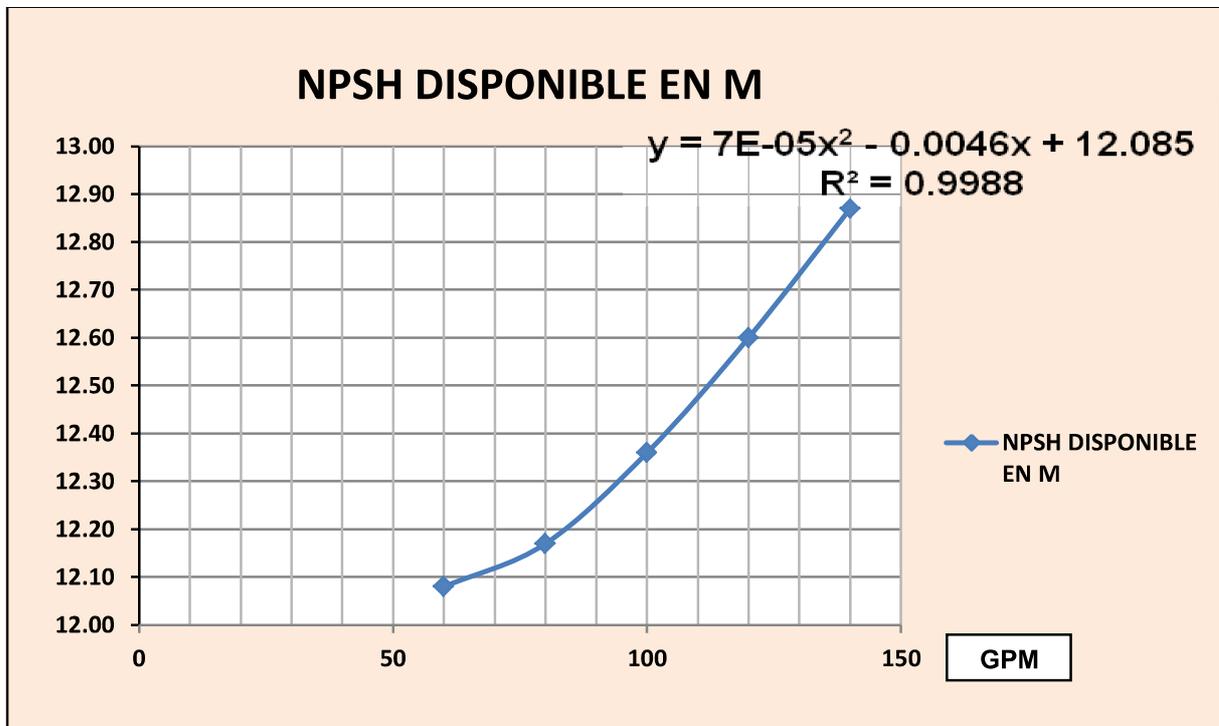
4.9 RESULTADOS OBTENIDOS.

Se realizó la secuencia mostrada desde las Figura 21 a la Figura 32 en HYSYS obteniéndose finalmente los valores que se muestran en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2 Datos obtenidos tras la simulación en HYSYS para varias corridas flujos de agua en GPM.

CAUDAL (GPM)	NPSH DISPONIBLE EN M
60	12.08
80	12.17
100	12.36
120	12.60
140	12.87

4.10 GRÁFICOS OBTENIDOS



4.11 MODELO MATEMATICO OBTENIDO.

El modelo matemático se determinó en Excel y es:

$$\text{NPSH d} = 7E-05 (\text{mH}_2\text{O})^2 - 0.0046 (\text{mH}_2\text{O}) + 12.085, \text{ m}$$

Donde

mH₂O - Es el flujo de agua en GPM.

Con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9988$

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El primer análisis que podemos realizar es el de la curva obtenida del NPSH disponible de la bomba en el simulador HYSYS es de gran importancia ya que permite predecir cuál será el valor del NPSH en función de la carga de la misma. Estas muestran una tendencia muy similar a la descrita en la literatura, por lo que podemos concluir que los resultados obtenidos concuerdan con la teoría vista acerca de las bombas centrífugas.
2. El modelo matemático obtenido del $NPSH = f(mH_2O)$ permite calcular de forma rápida la peligrosidad por cavitación en la bomba.
3. La metodología presentada se puede extrapolar a otras bombas centrífugas instaladas en servicios auxiliares de la misma Planta
4. Es posible confiar en los datos entregados por el fabricante para el uso de estas bombas, pero que se debe tener en cuenta pequeñas discrepancias producidas por estos o otros factores.
5. Con la metodología propuesta en HYSYS es posible evaluar el la bomba antes y después del mantenimiento para así de esta forma evaluar la efectividad, eficacia y calidad del mismo

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. "Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe". CRANE. Technical Paper No. 410.
2. "Pump Handbook". Karassik – Messina – Cooper – Heald. Third Edition. McGraw - Hill.
3. "Bombas Rotodinámicas y de Desplazamiento Positivo". Burton – Loboguerrero. Edición Julio 1999. UNIANDÉS.
4. "Engineer's Guide to Rotating Equipment – The Pocket Reference". Matthews. Professional Engineering Publishing.
5. Goulds Pumps. ITT Industries. http://www.gouldspumps.com/cat_pf_0001.html
6. Seminario Bombas Centrifugas. Selección, Operación, y Funcionamiento. ASME International. Bogotá, Agosto/05.
7. Bejan Adrian "Advanced Engineering Thermodynamics" Second Edition, JOHN WILEY & SON, INC 1997.
8. Bejan Adrian, Tsatsaronis George, Mor
9. an Michael "Thermal Design & Optimization", JOHN WILEY & SON, INC, 1996.^{1,4}
10. Boletín Informativo Cangrejera 2000 Pág. 7 y 8. Folleto editado por Petroquímica Cangrejera S.A. de C.V.
11. C. Espinoza, D. Rodríguez y R Muñoz, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, CI41B Ingeniería Ambiental Contaminación Antrópica, Tema 1.4, Semestre Primavera 2003, pp. 1.
12. Cengel Yunus A., Boles Michael a. "Termodinámica" Cuarta Edición, Mc Graw-Hill Latinoamericana, 2003.
13. Desmond E Winterbone, "Advanced Thermodynamics for Engineers" JOHN WILEY & SON, INC, 1997.
14. G. G Stavropoulos¹ and G. Skodras^{1,2,3}. "The Use of Exergy for Evaluating Environmental Impact of Processes", ¹Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece. ²Laboratory of Environmental and Energy Process,

- Chemical Process Engineering Research Institute, Thessaloniki, Greece.
- ³Institute for Solid Fuels Technology and Applications, Ptolemais, Greece.
15. Giaggoli, R.A. & El-Sayed, Y.M. "A Critical Review of Second Law Costing Methods". Second Law Analysis of Thermal Systems, pp 59-73. ASME, New York 1987.
 16. Howell John R., Buckius Richard O. Principios de Termodinámica para Ingeniería. McGraw-Hill Interamericana de México S.A. de C.V. 1990.
 17. Leucona Newmann Antonio, "Análisis Energético y Exergético, Introducción a la Termoeconomía" Área de Ingeniería Térmica, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III.
 18. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Seventh Edition McGraw-Hill Company, 1997.
 19. Reinerus Louwrentius Cornelissen, Thermodynamics and sustainable development. The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. FEBODRUK BV, Enschede, 1997.
 20. Richard E. Balzhizer, Michael R. Samuels & John D. Eliassen Termodinámica Química para Ingenieros. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. de C.V. 1986.
 21. Roth Steve, "Emissions", Energy Markets, ISSN: 1090-8706, Vol. 8, No. 11, November 2003, pp. 24.
 22. Tsatsaronis George and Moran Michael J. "Exergy-Aided Cost Minimization" 1997 Elsevier Science Ltd., pág. 1535 – 1542.
 23. Tsatsaronis George, "A Review of Exergoeconomic Methodologies". Second Law Analysis of Thermal Systems, pp. 81-87.
 24. Tsatsaronis George, "Thermoeconomic Analysis And Optimization Of Energy Systems" Prog. Energy Combust. Sci. 1993. Vol. 19, pp. 227-257.³
 25. Wall Göran and Gong Mei, "Exergy Analysis versus Pinch Technology" Presented at ECOS'96, published in P. Alvfors, et al., eds. "Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems," Stockholm (1996).
 26. La Modelación. <http://www.geocities.com/Eureka/Office/4595/modelo.html>

27. Dr. Luis A. Corona Martínez, Dra. Mercedes Fonseca Hernández, Dr. Benigno Figueiras Ramos, Dr. Yoel Hernández Rodríguez (2002). Vinculación de los fundamentos filosóficos del método de simulación con la modelación como método científico general de investigación, Pág. 206.
28. La representación, modelización y simulación de fenómenos físico-naturales. Javier Arlegui de Pablos.
29. El proceso de investigación científica desde el modelo holístico configuracional. Capítulo II. El proceso de investigación científica. Dr. Homero Fuentes. El proceso de investigación científica desde el modelo holístico configuracional. Homero Fuentes, Marcos de Jesús Cortina, Alejandro Estrabao. Centro de Estudios de Educación Superior "Manuel F. Gran", Universidad de Oriente.
30. Enfoque sistémico y nuevo paradigma. Comportamiento humano. Capítulo 4. M. Martínez, Editorial Trillas, 1997.
31. El método hermenéutico-dialéctico. Comportamiento humano. Capítulo 7. M. Martínez, Editorial Trillas, 1997.
32. El proceso de investigación científica desde el modelo holístico configuracional. Capítulo II. El proceso de investigación científica. Dr. Homero Fuentes.
33. La Modelación. <http://www.geocities.com/Eureka/Office/4595/modelo.html>
34. La representación, modelización y simulación de fenómenos físico-naturales. Javier Arlegui de Pablos. Universidad Pública de Navarra, <http://www.xtec.es/logo/ponencia/javier1.htm>
35. - Parés, J.A. , "Máquinas y equipos para la introducción de energía en los procesos", Depto. de Ingeniería Química, Universidad de Concepción, 1984.
36. Franquini b. Joseph / fincmore e. John. Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería. Mcgraw – Hill, España 1997
37. Tylerg Hicks. Bme, bombas, su elección y aplicación. Compañía editorial continental, s.a., México. 1979.

38. Dr. Ing. Cisneros Martínez Luis. Manual de bombas. Blume. Barcelona; España, 1977.
39. Karassik Igor i. Carter Roy. Bombas centrífugas, continental, s.a. México. México 1978
40. Menaughton Kenneth. Bombas: selección y mantenimiento. McGraw – hill. Mexico 1890.