

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROTOR DE BOMBA
CENTRÍFUGA EN EL CENTRO DE MECANIZADO**

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE
VENEZUELA POR EL BACHILLER
SILVA PACHECO DANIEL DE JESÚS
PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROTOR DE BOMBA
CENTRÍFUGA EN EL CENTRO DE MECANIZADO**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Rodolfo Berrios

PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD CENTRAL DE
VENEZUELA POR EL BACHILLER
SILVA PACHECO DANIEL DE JESÚS
PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO

Caracas, 2001

Caracas, julio de 2001

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar e Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Daniel de J. Silva P., titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROTOR DE BOMBA CENTRÍFUGA EN EL
CENTRO DE MECANIZADO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ellos signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. César Ferrer
Jurado

Prof. Jose G. La Riva
Jurado

Prof. Rodolfo Berrios
Tutor

RESUMEN

Silva P., Daniel de J.
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROTOR DE BOMBA
CENTRÍFUGA EN EL CENTRO DE MECANIZADO.

Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berrios. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Mecánica. Año 2001, 86 p.

Palabras Claves: Rodete, Impulsor, Control Numérico, Bomba Centrífuga, Flujo Potencial, Álabes, Turbomáquinas, Función de Corriente, Circulación, Superposición de flujos simples.

Resumen. En este trabajo se comprueba la teoría de flujo potencial como medio para diseñar álabes de impulsores de bombas centrífugas. Para esto se utiliza la superposición de dos flujos simples como lo son el sumidero y el vórtice libre.

Para la comprobación de este diseño, se utilizó la tecnología asistida por computador, tanto para el diseño como para la fabricación como en el caso del uso del Centro de Mecanizado. Como se puede constatar en este trabajo, el Control Numérico es una herramienta útil para la fabricación de rodetes y poder evaluar de esta forma la presión, caudal, eficiencia, etc. que pueden desarrollar los diferentes diseños. Por el tiempo que tarda en mecanizarse el rodete, se sabe que no es un proceso apto para la producción de grandes volúmenes de piezas pero, con la ayuda de programas del tipo CAM se puede lograr fabricar ejemplares de muestra en poco tiempo y con la precisión requerida.

La presión, el caudal y la eficiencia del rodete construido, se evaluaron en el banco de ensayos del laboratorio de Energética de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Dando como resultados eficiencias y alturas de presión mayores que las obtenidas para el mismo caudal, utilizando otro rodete similar calculado de otra forma.

INDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	5
RESEÑA HISTÓRICA	9
CAP. I FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
I.1 Tecnologías CAD, CAM y CAE.	16
I.2 Bombas Centrífugas	22
I.3 Teoría de flujo Potencial y ecuación de Euler	24
I.4 Procesos de fabricación	36
CAP. II METODOLOGÍA	39
II.1 Diseño de los álabes.....	40
II.2 Elaboración del rodete	48
II.3 Pruebas.....	57
CAP. III ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
III.1 Características del mecanizado	64
III.2 Curva característica de la bomba	65
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	73

BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	77
A Tablas de datos tomados y resultados (sistema inglés)	78
B Programa del Control Numérico	80
C Secuencia de pasos en la fabricación del rodete	82
D Curva característica de la bomba Armfield	84
E Curva de calibración de la placa orificio.....	85
F Plano del rodete	86

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Actualmente en el mundo, el uso de bombas y especialmente las centrífugas se han venido haciendo de uso cada vez más generalizado. Prácticamente en cada hogar hay una bomba hidráulica bien sea en la pecera para purificar el agua o en el hidroneumático para llevar el agua del tanque de almacenamiento al tanque que impulsará el agua. En un edificio cualquiera, por ejemplo, a parte de las bombas del hidroneumático, están las que utilizan los sistemas contra incendios, las que expulsan el agua del nivel freático, las del sistema de refrigeración de agua helada y algunas otras dependiendo del tipo de edificio. Ni hablar de las industrias y fábricas que necesitan una gran variedad de bombas de todos los tipos y tamaños desde las de 1/2 HP hasta las de 100 HP o más, que son usadas muy frecuentemente y que hacen la vida posible en cualquier ciudad del mundo.

Debido a este uso tan masificado de los sistemas de bombeo, con su respectivo consumo de energía, la ingeniería se ha visto siempre en la necesidad de procurar aumentar el rendimiento de las mismas lo mejor posible, para la optimización de costos. El impulsor es la parte esencial de estas maquinas giratorias. Un buen diseño en el que el fluido no forme turbulencias y salga suavemente, puede disminuir significativamente las pérdidas de energía. Por esta razón es muy importante tener claro los conceptos básicos del movimiento del fluido (la cinemática) y su comportamiento al pasar dentro de una máquina. Por otro lado es de especial interés, e influyente en la disminución de los costos, el proceso de fabricación de estas máquinas, de tal forma que sea posible producir muchas de ellas, con sus complicadas formas, a un bajo costo.

Este trabajo utiliza una de las teorías básicas de la mecánica de fluidos como es la teoría de flujo potencial, y demuestra su utilidad en el diseño de los álabes de las bombas centrífugas, mediante la superposición de las funciones simples como la de corriente de un sumidero con la de un vórtice libre. Una curva calculada de esa forma, podría ser la trayectoria relativa con respecto al impulsor seguida por el fluido y por lo tanto la trayectoria del álabe, para ser bombeado de forma óptima.

Uno de los medios utilizados para la comprobación de esta teoría será el uso del Centro de Mecanizado y su programación por control Numérico como posible instrumento para fabricar el rodete y probar su utilidad como herramienta para la futura producción de impulsores, si no como medio para producirlos en serie, por lo menos comprobar su utilidad para producir muestras, o los negativos para los moldes de fundición, evaluando su eficiencia, rapidez con que los produce, facilidad de programación, acabado superficial, etc.

El uso de programas de computación es un factor clave para el diseño y producción de elementos complicados como es la rueda de la bomba centrífuga. Las tecnologías CAD, CAM y CAE, explicadas más adelante, son el camino que está siguiendo la ingeniería para el diseño y fabricación de piezas mecánicas por medio del uso de la computación, ahorrando así tiempo y dinero, factores claves tanto en la industria manufacturera como en la investigación, a través de construcciones y puestas en funcionamiento de prototipos. En este trabajo se hablará y aplicará algo de estas nuevas tendencias.

Finalmente se harán mediciones en un banco de ensayos para bombas hidráulicas del laboratorio de turbomáquinas de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el

comportamiento del nuevo rodete comparado con uno similar instalado en el banco de pruebas.

Ya que se comprueba la eficiencia de ambos rodetes, se mantienen fijos los parámetros característicos del banco, como por ejemplo la carcasa, el diámetro del rodete, las tuberías, etc.

RESEÑA HISTÓRICA

RESEÑA HISTÓRICA

Antes de empezar con las explicaciones más profundas acerca de los flujos potenciales, las turbomáquinas y las máquinas de Control Numérico, se dará un breve recorrido por los comienzos de estas ciencias y los avances tecnológicos que han ayudado al desarrollo y avance de la investigación.

El hombre en su afán de sabiduría y búsqueda del bienestar, desde épocas muy remotas como la prehistoria, ya usaba instrumentos hechos de piedra para facilitar la caza y por lo tanto su alimentación. Desde estas épocas se puede decir que el hombre utilizaba las máquinas herramientas, ya que para dar formas afiladas y cortantes a los instrumentos que utilizaba, necesitaría de otros utensilios más fuertes o más apropiados que sus manos, para obtener la forma deseada, tal como cuchillos, lanzas, etc. En esos momentos ni siquiera pensaba en estudiar los movimientos de los fluidos salvo por aprovechar mejor los ríos y tal vez almacenar agua para su uso y consumo.

Se puede decir de las máquinas herramientas que tienen sus comienzos en el siglo XVIII cuando un inventor británico John Wilkinson construyó la primera máquina taladradora para realizar agujeros cilíndricos en el año 1774. Quince años después Henry Maudslay desarrolló el primer torno mecánico. Pocos años después ya se había mejorado notablemente la precisión en las piezas elaboradas con estas máquinas, característica que fue muy importante para la época, ya que hasta el momento no se podía fabricar objetos con piezas intercambiables, por la dificultad en repetirlas del mismo tamaño. En cuanto a la producción

en serie se puede decir que la primera a gran escala que se hizo fue en el año 1798, cuando Eli Whitney fabricó 10.000 mosquetes con piezas intercambiables para el gobierno de Estados Unidos. Esta tecnología de las piezas intercambiables representó un avance muy importante en la industria que para ese entonces era prácticamente artesanal.

El desarrollo de las máquinas herramientas se debe principalmente a la revolución industrial, especialmente con la construcción de la máquina de vapor de Watt que necesitaba de piezas precisas y de gran dureza, características dominantes de los elementos construidos mediante las mismas. La primera máquina fresadora se debe a Eli Whitney quien la desarrolló en Estados Unidos. El cepillo y el perfilador también tienen su origen en los comienzos del siglo XIX con el fin de proveer las partes necesarias de la máquina de vapor. Las máquinas herramientas actuales conservan los mismos principios básicos que las de esa época, con pequeñas diferencias que están dirigidas más bien, al modo de operarlas, usando las tecnologías de la computación, y no tanto al modo en que ellas operan.

En cuanto a la tecnología del Control Numérico tiene sus orígenes a fines de la década de los cuarenta. John Parsons la ideó para fabricar piezas complejas de aeronaves a la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Esto era introducir datos alfanuméricos para mover la mesa de trabajo de una máquina fresadora. Este proyecto fue subcontratado por el laboratorio de servomecanismos en el Massachusetts Institute of Technology (M. I. T.) con la idea de crear prototipos que utilizaran el principio de datos numéricos. Este prototipo se realizó en 1952: una fresadora vertical de tres ejes usando controles combinados analógicos digitales. Al principio estos prototipos eran muy costosos pero a medida que se daban cuenta de su importancia y sus ventajas en cuanto a tiempo, precisión, etc., se fueron haciendo más

populares y económicos por lo que su uso se ha extendido hasta el día de hoy en el que ya son de uso prácticamente corriente³.

Actualmente la tecnología del Control Numérico va muy unida a las tecnologías computarizadas CAD, CAM y CAE, por sus siglas en inglés y de las cuales se hablará más adelante, que permiten una interacción entre las computadoras y las máquinas herramientas. Esto permite diseñar, copiar y fabricar una pieza, todo desde una computadora que facilita mucho el trabajo y mejora las calidades del producto deseado.

La historia de las bombas hidráulicas también data de muchos años atrás. “Las bombas de estructuras primitivas se empleaban ya en los tiempos de Aristóteles (siglo IV a. de n. e.). Las máquinas elevadoras de agua, accionadas por la fuerza de personas y animales, se utilizaban en Egipto varios milenios antes de nuestra era. De las obras del arquitecto italiano Vitruvio se deduce que las bombas de émbolo se empleaban en el Imperio romano ya en los tiempos de reinado de Cesar Augusto (siglo I a. de n. e.). Las bombas con cadena sin fin funcionaban en El Cairo para elevar el agua desde una profundidad de 91,5 m en los siglos V-IV antes de nuestra era. En Alejandría, en los siglos V – IV a. de n. e. se construyó una bomba de émbolo de incendios, fundida de bronce.

Aproximadamente en el año 1805, Newcomen (Inglaterra) creó una bomba de émbolo para elevar el agua en una mina, empleando para su accionamiento un cilindro de vapor con la condensación del vapor, que utilizaba la presión atmosférica para crear la fuerza necesaria en el vástago.

En los años 1840...1850 el norteamericano Worthington propuso una bomba de vapor, en cuya estructura los émbolos de la bomba y del motor de vapor estaban dispuestos en un vástago común; el movimiento de los émbolos era dirigido por un sistema especial de distribución del vapor.

A partir de la segunda mitad del siglo XIX comenzó el desarrollo de las bombas centrífugas. Es imposible establecer a ciencia cierta quién fue su inventor. Se conocen dibujos de Leonardo de Vinci pertenecientes al siglo XV en los cuales el gran sabio explicaba la posibilidad de la utilización de la fuerza centrífuga del agua, que gira en un canal curvilíneo, para suministrarla a cierta altura. Es posible que la bomba centrífuga haya sido inventada por el italiano Jordan, que a últimos del siglo XVII hizo un dibujo de semejante bomba. A principios del siglo XVIII el físico francés Papin confeccionó una bomba centrífuga de estructura primitiva.

La primera máquina, utilizada en la práctica, para el suministro de líquido por la acción de la fuerza centrífuga fue la bomba de Ledemour (Francia, 1732). En esta estructura el agua, que se encontraba en un tubo inclinado, el cual giraba alrededor del eje vertical, se desplazaba desde el nivel inferior hasta el superior bajo la acción de la fuerza centrífuga de la propia agua. De este modo, se lograba el suministro del agua a cierta altura.

El esquema clásico y la estructura de la bomba centrífuga de una rueda, que se emplea en distintas modificaciones también hoy día, fue realizado por Andreus (EE.UU.) en el año 1818 y esencialmente mejorada por él en 1846. Las investigaciones de Andreus llevaron a la

creación de la bomba centrífuga multietapa, sin embargo, su estructura era bastante imperfecta, patentada en el año 1851.

La amplia divulgación de las bombas centrífugas ha sido posible únicamente a base del empleo de la energía eléctrica y, en particular, al utilizar el motor eléctrico de corriente alterna trifásica elaborado por el ingeniero V. O. Dolivo-Dobrovoski (Rusia, 1888...1889). A este tiempo se refiere también la bomba especial de pequeñas dimensiones para elevar las aguas subterráneas desde grandes profundidades, inventada por el ingeniero ruso V. A. Púshechnikov.”²

CAP. I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAP. I FUNDAMENTOS TEÓRICOS

I.1 Tecnología CAD, CAM y CAE.

La introducción en las industrias de las máquinas herramientas de control numérico, los robots, los almacenes automáticos, etc., está provocando importantes ventajas sobre los métodos de producción tradicionales. Como resultado directo de ello se consigue fabricar series intermedias de piezas a costos comparables a los de las grandes series.

Es por esto que se hace cada vez más necesario estar actualizados con la tecnología de vanguardia CAD, CAM y CAE por sus siglas en ingles de: diseño, manufactura e ingeniería asistida por computadora.

CAD, CAM CAE; son los procesos en los cuales se utilizan las computadoras para mejorar la fabricación, desarrollo y diseño de los productos. Esto permite fabricarlos más rápido, con mayor precisión y/o a menor precio, con la aplicación adecuada de tecnología informática. Las tecnologías CAD, CAM, CAE se encuentran ya en una fase de madurez en el mercado donde su uso se está haciendo cada vez mayor. Su utilidad es indiscutible y han abierto posibilidades para el rediseño y fabricación, impensables sin estas herramientas, unos pocos años atrás.

Cuando los sistemas CAD se conectan a equipos de fabricación también controlados por computadora, conforman un sistema integrado CAD-CAM. La fabricación asistida por

ordenador ofrece significativas ventajas con respecto a los métodos más tradicionales de control de equipos de fabricación. Por lo general, los equipos CAM conllevan la eliminación de los errores del operador y la reducción de los costos de mano de obra. Sin embargo, la precisión constante y el uso óptimo previsto del equipo representan ventajas aún mayores. Por ejemplo, las cuchillas y herramientas de corte se desgastarán más lentamente y se estropearían con menos frecuencia, lo que reduciría todavía más los costos de fabricación.

Las características de los sistemas CAD-CAM son aprovechadas por los diseñadores, ingenieros y fabricantes para adaptarlas a las necesidades específicas de sus situaciones. Por ejemplo, un diseñador puede utilizar el sistema para crear rápidamente un primer prototipo y analizar la viabilidad de un producto, mientras que un fabricante quizá emplee el sistema porque es el único modo de poder fabricar con precisión un componente complejo. La gama de ventajas que se ofrecen a los usuarios de CAD/CAM está en constante expansión. Los fabricantes de indumentaria pueden diseñar el patrón de una prenda en un sistema CAD, patrón que se sitúa de forma automática sobre la tela para reducir al máximo el derroche de material al ser cortado con una sierra o un láser CNC. Además de la información de CAD que describe el contorno de un componente de ingeniería, es posible elegir el material más adecuado para su fabricación en la base de datos informática, y emplear una variedad de máquinas CNC combinadas para producirlo. La Fabricación Integrada por Computadora (CIM) aprovecha plenamente el potencial de esta tecnología al combinar una amplia gama de actividades asistidas por ordenador, que pueden incluir el control de existencias, el cálculo de costes de materiales y el control total de cada proceso de producción. Esto ofrece una mayor flexibilidad al fabricante, permitiendo a la empresa responder con mayor agilidad a las demandas del mercado y al desarrollo de nuevos productos.

La futura evolución incluirá la integración aún mayor de sistemas de realidad virtual, que permitirá a los diseñadores interactuar con los prototipos virtuales de los productos mediante la computadora, en lugar de tener que construir costosos modelos o simuladores para comprobar su viabilidad. También el área de prototipos rápidos es una evolución de las técnicas de CAD/CAM, en la que las imágenes informatizadas tridimensionales se convierten en modelos reales empleando equipos de fabricación especializado, como por ejemplo un sistema de estereolitografía.

CAD (Computer Aided Design): Los sistemas de diseño asistido por ordenador pueden utilizarse para generar modelos con muchas, si no todas, de las características de un determinado producto. Estas características podrían ser el tamaño, el contorno y la forma de cada componente, almacenados como dibujos bi y tridimensionales. Una vez que estos datos dimensionales han sido introducidos y almacenados en el sistema informático, el diseñador puede manipularlos o modificar las ideas del diseño con mayor facilidad para avanzar en el desarrollo del producto. Además, pueden compartirse e integrarse las ideas combinadas de varios diseñadores, ya que es posible mover los datos dentro de redes informáticas, con lo que los diseñadores e ingenieros situados en lugares distantes entre sí pueden trabajar como un equipo. Los sistemas CAD también permiten simular el funcionamiento de un producto. Hacen posible verificar si un circuito electrónico propuesto funcionará tal y como está previsto, si un puente será capaz de soportar las cargas pronosticadas sin peligros e incluso si una salsa de tomate fluirá adecuadamente desde un envase de nuevo diseño.

Un buen programa CAD no sólo dispone de herramientas de creación de superficies, sino también de posibilidades de análisis y verificación de las mismas, entendiendo por

superficies correctas aquellas cuyos enlaces entre ellas son continuos en cuanto a tangencia y curvatura, y sin contener zonas donde se ha perdido continuidad de curvatura. Para ello, en un primer nivel de análisis es suficiente con realizar cortes en las superficies por planos paralelos o radiales, en distintas direcciones se consigue una malla de curvas que ponen de manifiesto los errores antes mencionados. En un segundo nivel, se pueden crear curvas de isotangencia según cualquier dirección. En caso de existir defectos, estas curvas los exageran y pueden observarse fácilmente. Por último, se puede recurrir a la visualización realista de la superficie, sin crear ni una sola curva. La visualización realista destacará los defectos como zonas de sombras, tal como si se observara el objeto real. Incluso se pueden mostrar las superficies coloreándolas según la curvatura, con lo que las posibles discontinuidades aparecen de inmediato. Estos métodos expuestos corrigen alrededor del 90% de los defectos que puedan existir.

Ya que no es posible detectar todos los defectos, en muchos casos es aconsejable fabricar un modelo real de la pieza a fin de poder analizar mejor el resultado obtenido, sobre todo en aquellos casos en que a partir de las superficies creadas en el CAD se diseña el molde. Para fabricar dichos modelos se utilizan tecnologías de fabricación rápida de prototipos. Además de la verificación de las superficies, un programa CAD avanzado permite trazar superficies paralelas a las creadas, por ejemplo, generando la piel interna de la pieza a partir de la piel externa en el caso de piezas con un espesor uniforme conocido, y debe tener los elementos necesarios para conseguir realizar sobre el modelo CAD todas las actividades de ingeniería de diseño necesarias (nerviado, fijaciones, centradores, elementos rigidizadores).

CAM (Computer Aided Manufacturing): La manufactura asistida por computadora hace referencia concretamente a aquellos sistemas informáticos que ayudan a generar los programas de Control Numérico (CN) necesarios para fabricar las piezas en máquinas Controladas por Control Numérico (CNC). A partir de la información de la geometría de la pieza, del tipo de operación deseada, de la herramienta escogida y de las condiciones de corte definidas, el sistema calcula las trayectorias de la herramienta para conseguir el mecanizado correcto, y a través de un posprocesado genera los correspondientes programas de CN con la codificación específica del CNC donde se ejecutarán. En general, la información geométrica de la pieza proviene de un sistema CAD, que puede estar o no integrado con el sistema CAM. Si no está integrado, dicha información geométrica se pasa a través de un formato común de intercambio gráfico, por ejemplo, el formato IGES. Como alternativa, algunos sistemas CAM disponen de herramientas CAD que permiten al usuario introducir directamente la geometría de la pieza, si bien en general no son tan ágiles como las herramientas de un sistema propiamente de CAD.

Algunos sistemas CAM permiten introducir la información geométrica de la pieza partiendo de una nube de puntos correspondientes a la superficie de la misma, obtenidos mediante un proceso de digitalizado previo. La calidad de las superficies mecanizadas depende de la densidad de puntos digitalizados. Si bien este método acorta el tiempo necesario para fabricar el prototipo, en principio no permite el rediseño de la pieza inicial.

La utilización más inmediata del CAM en un proceso de ingeniería es para obtener prototipos, los cuales se utilizan básicamente para verificar la bondad de las superficies creadas cuando éstas son críticas. Desde el punto de vista de la ingeniería concurrente, es

posible, por ejemplo, empezar el diseño y fabricación de parte del molde simultáneamente al diseño de la pieza que se quiere obtener con el molde, partiendo de la superficie externa de la pieza mientras aún se está diseñando la parte interna de la misma.

CAE (Computer Aided Engineering): Para realizar la ingeniería asistida por computador, se dispone de programas que permiten calcular cómo va a comportarse la pieza en la realidad, en aspectos tan diversos como deformaciones, resistencias, características térmicas, vibraciones, etc.

Es necesario pasar la geometría creada en el entorno CAD al sistema CAE. En el caso en que los dos sistemas no estén integrados, ello se lleva a término mediante la conversión a un formato común de intercambio de información gráfica, como puede ser el formato IGES.

Usualmente se trabaja con el método de los elementos finitos, siendo necesario mallar la pieza en pequeños elementos y el cálculo que se lleva a término sirve para determinar las interacciones entre estos elementos. Este método permite, en un computador, la búsqueda de una solución aproximada suficientemente válida, a costa de despreciar la continuidad de la materia que obligaría a integrar ecuaciones diferenciales de difícil resolución.

Mediante este método, por ejemplo, se podrá determinar qué grosor de material es necesario para resistir cargas de impacto especificadas en normas, o bien conservando un grosor, analizar el comportamiento de materiales con distinto límite de rotura. También se podrán hacer cálculos iterativos automáticos, parametrizando un nervio y averiguando qué valor de longitud y altura son necesarios para garantizar una determinada rigidez. Es posible,

además, determinar las frecuencias propias de la pieza, dada una determinada forma de fijarla. Si estos modos propios de vibración son demasiado bajos, facilitando una entrada en resonancia, se actuará sobre el diseño para elevar el valor de estas frecuencias, alejándolas de las zonas de riesgo. Otra aplicación importante de estos sistemas en el diseño de moldes es la simulación del llenado del molde a partir de unas dimensiones de éste dadas, y el análisis del gradiente de temperaturas durante el llenado del mismo. La realización de todas estas actividades CAE dependerá de las exigencias del diseño, y suponen siempre un valor añadido al diseño al detectar y eliminar problemas que retrasarían el lanzamiento del producto

Los sistemas CAE proporcionan una posibilidad de prueba de los productos diseñados previa a su fabricación, lo que conlleva un enorme ahorro en los costos. Pueden realizarse análisis estáticos a partir del modelo de elementos finitos, análisis de fatiga, análisis modal, etc. Además, debido a la todavía reciente introducción del PC como plataforma de utilización del software de diseño en Ingeniería, se ha producido un abaratamiento importante en el costo por puesto de trabajo de diseñador y, por tanto, puede ser posible en mayor medida su utilización en la mediana empresa

I.2 Bombas Centrífugas

Turbomáquinas: son máquinas que aportan o reciben energía en forma de presión de los fluidos. El rodete es su componente principal, el cual está provisto de álabes que forman canales por los que circula un flujo de forma continua y que cambia su momento de la cantidad de movimiento.

Bombas Centrifugas: son turbomáquinas generadoras rotativas, que utilizan la energía de un motor para aumentar la presión de los fluidos, específicamente líquidos, para elevarlos, transportarlos de un lugar a otro, etc.

El líquido entra en la bomba cerca del eje del rotor, y las paletas lo arrastran hacia sus extremos a alta presión. El rotor también proporciona al líquido una velocidad relativamente alta que puede transformarse en presión en una parte estacionaria de la bomba, conocida como difusor.

Principio de funcionamiento: Básicamente consiste en la transferencia de energía, a través de un árbol, desde un elemento motriz, hasta el fluido. El árbol transmite la energía a el rotor que es el elemento principal de las bombas. El rotor, rodete o impulsor esta constituido por dos discos separados en el medio por los álabes, que son paletas curvas o no, que van desde el exterior de los discos hasta un punto en el interior, tal que pueda entrar el fluido entre el eje y los álabes. Al girar el impulsor, debido a la acción de la fuerza centrífuga, el fluido es desplazado, por los canales existentes entre los discos y los álabes, hacia la parte exterior del rodete con mayor energía.

Una vez que el líquido es expulsado fuera del rotor, es guiado por unos canales en la carcasa que lo conducen hasta la tubería de salida con mayor energía, que le ha sido transmitida por el trabajo realizado en el impulsor.

El rotor también proporciona al líquido una velocidad relativamente alta que puede transformarse en presión en una parte estacionaria de la bomba, conocida como difusor. En

bombas de alta presión pueden emplearse varios rotores en serie, y los difusores posteriores a cada rotor pueden contener aletas de guía para reducir poco a poco la velocidad del fluido. En las bombas de baja presión, el difusor suele ser un canal en espiral cuya superficie transversal aumenta de forma gradual para reducir la velocidad. El rotor debe ser cebado antes de empezar a operar, es decir, debe estar rodeado de líquido cuando se arranca la bomba. Esto puede lograrse colocando una válvula de retención en el conducto de succión, que mantiene el líquido en la bomba cuando el rotor no gira. Si esta válvula no cierra bien, puede ser necesario cebar la bomba introduciendo líquido desde una fuente externa, como el depósito de salida. Por lo general, las bombas centrífugas tienen una válvula en el conducto de salida para controlar el flujo y la presión.

En el caso de flujos bajos y altas presiones, la acción del rotor es en gran medida radial. En flujos más elevados y presiones de salida menores, la dirección de flujo en el interior de la bomba es más paralela al eje del rotor (flujo axial). En ese caso, el rotor actúa como una hélice. La transición de un tipo de condiciones a otro es gradual, y cuando las condiciones son intermedias se habla de flujo mixto.

I.3 Teoría de flujo potencial y ecuación de Euler.

Para la elaboración del diseño del perfil del álabe del rodete, que en este caso se va a diseñar, es necesario dar una breve explicación de la teoría de flujo potencial que será la base para el desarrollo de las ecuaciones que definirán la trayectoria que seguirán los mencionados álabes.

Suposiciones: Para poder usar las matemáticas en el estudio de los flujos de forma más sencilla, es necesario recurrir a ciertas idealizaciones, que no aparten significativamente la solución de la realidad:

La primera suposición es la de incompresibilidad: Se dice que un flujo es incompresible si posee densidad y peso específico constantes a través del tiempo. Como el fluido de trabajo es el agua, se puede considerar que la compresibilidad es casi nula. También se supondrá que el flujo es irrotacional; para evitar la turbulencia se hará lo posible por evitar el movimiento angular relativo entre dos partículas. Y en tercer lugar se supondrá que el flujo es permanente, esto quiere decir que no cambiarán sus propiedades a través del tiempo.

Para entender la teoría de flujo potencial, primero hay que conocer algunos conceptos básicos que se explican a continuación:

Líneas de corriente: Este concepto se rige por el sistema Euleriano de descripción de los fluidos, en el cual se toma en cuenta las características de las partículas que pasan por un punto dado y no el recorrido de las mismas, como en el sistema Lagrangiano. Las líneas de corriente son aquellas trazadas en el campo de flujo de tal forma que para un instante dado, el vector velocidad de cada partícula es tangente a la dirección del flujo en cada uno de sus puntos.

La ecuación que describe a la velocidad como tangente a la línea de corriente, donde \vec{V} es el vector velocidad y \vec{dr} la dirección, se muestra a continuación:

$$\vec{V} \times \vec{dr} = 0$$

Por otro lado si \vec{V} se descompone en sus componentes horizontal y vertical $\hat{i}u + \hat{j}v$ y el radio en $\hat{i}dx + \hat{j}dy$:

$$\vec{V} \times \vec{dr} = (\hat{i}u + \hat{j}v) \times (\hat{i}dx + \hat{j}dy) = \hat{k}(udy - vdx)$$

Por lo tanto en flujo bidimensional: $udy - vdx = 0$

Enunciado del principio de conservación de la masa: si se aplica la ley de conservación de la masa a un volumen de control diferencial, obtenemos el siguiente desarrollo:

$$\left[\begin{array}{l} \text{flujo de masa neto a} \\ \text{través de la superficie} \\ \text{de control} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{rapidez de cambio de la} \\ \text{masa dentro del volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right] = 0$$

Si se representa la ecuación diferencial para la conservación de la masa en coordenadas rectangulares queda:

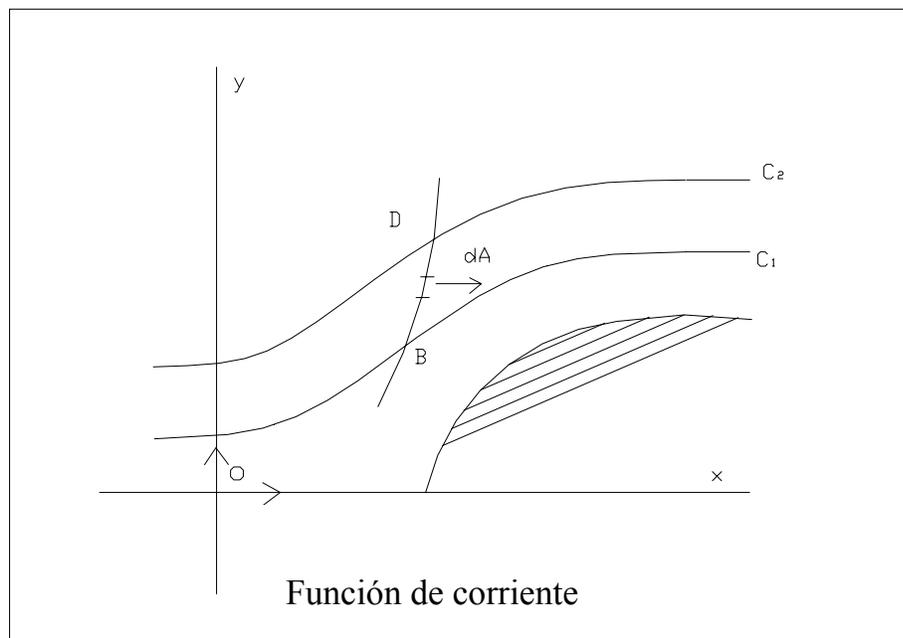
$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

donde ρ es la densidad y u, v, w , las velocidades en los ejes coordenados.

si el flujo es bidimensional e incompresible:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Función de corriente: Es un medio para poder describir matemáticamente una estructura particular de flujo, ya que las líneas de corriente en muchos casos resulta difícil de integrar. Representan líneas de corriente y escalas de velocidades en puntos significativos. Relaciona las líneas de corriente y el principio de conservación de la masa.



Al describir analíticamente el caudal que pasa por un área cualquiera a través de dos líneas de corriente, si BD es la traza de la superficie queda de la siguiente forma:

$$Q = \int_A \vec{u} \cdot \vec{dA}$$

En el caso bidimensional queda
$$Q = \int_{BD} u_x dy - u_y dx$$

Ya que el caudal es el mismo a través de todo el tubo entonces, la diferencial es exacta, por lo que se llega a la conclusión de que existe una función $\psi = \psi(x, y)$ tal que:

$$d\psi = u_x dy - u_y dx = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy$$

Entonces ψ se define como:

$$u \equiv \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v \equiv -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

donde ψ es lo que llamamos función de corriente.

Se puede demostrar fácilmente que cumple con la ecuación de continuidad. Sustituyendo esta función de corriente en la ecuación de continuidad para flujos bidimensionales e incompresibles descrita anteriormente queda:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial x} = 0$$

Si se sustituye en la ecuación de línea de corriente de un flujo bidimensional queda:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = 0$$

Entonces $\partial\psi$ es igual a 0, lo que quiere decir que ψ es constante a lo largo de una línea de corriente. Esto nos indica que una ψ constante es una línea de corriente. Como $d\psi$ es exacta, $\psi_2 - \psi_1$ depende únicamente de los límites de integración, entonces como

$$Q = \int_{BD} d\psi = \psi_2 - \psi_1 .$$

Si se utiliza la función de corriente con la ecuación de continuidad, se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0$$

Que es lineal y por lo tanto permite la superposición de flujos, propiedad muy importante en la mecánica de fluidos, ya que permite el estudio de flujos un poco más complejos a partir de flujos simples.

Flujo irrotacional: Para poder simplificar los cálculos de las ecuaciones diferenciales, que resultan muy difíciles de resolver, se hace una división de los flujos en rotacionales e irrotacionales. Los irrotacionales que son los que nos interesan, son aquellos en los cuales para cada punto, el $Rot \vec{u} = \nabla \times \vec{u} = 0$, ya que la rotación de un fluido esta definida por $w = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u}$, de lo contrario sería rotacional.

El potencial de velocidades: Es otra forma de caracterizar los campos de flujo. Los flujos irrotacionales tienen la particularidad de que $\nabla \times \vec{V} = 0$ por lo tanto, por propiedades del cálculo vectorial, debe existir una función escalar tal que el negativo de su derivada con respecto a la distancia, en cualquier dirección, es la velocidad en esa dirección.

$$u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} \quad v = -\frac{\partial\phi}{\partial y}$$

en forma general: $\vec{V} = -\nabla\phi$

donde ϕ es la función potencial

Si se colocan la función de corriente y el flujo potencial en función de la velocidad y se igualan, se llega a que están relacionados de la siguiente forma:

$$\frac{\partial\psi}{\partial y} = \frac{\partial\phi}{\partial x}$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{\partial\phi}{\partial y}$$

También se puede observar que las líneas de función de corriente constante y las líneas de flujo potencial constante, son perpendiculares entre sí y por lo tanto forman una malla ortogonal o red de flujo que es utilizable en la descripción y análisis de flujos irrotacionales.

Flujos simples: En la realidad existen flujos que se aproximan a curvas conocidas por todos de fácil manejo matemático y que se pueden considerar como campos de flujo con direcciones y líneas de corrientes conocidas, como es el caso del flujo alrededor de objetos sumergidos en una corriente cuyo flujo que se aproxima es con frecuencia de extensión prácticamente infinita y posee líneas de corriente rectas, paralelas y de distribución uniforme de velocidad a una distancia grande a partir del objeto. Para el caso que nos interesa considerar en este desarrollo sólo hablaremos de el campo de flujo de una fuente y un sumidero, y el de un vórtice libre. Estos flujos simples también sirven para modelar otros tipos de flujos útiles y de formas más complejas, combinándose mediante la superposición.

Fuente y Sumidero: Es un campo de flujo simétrico que está compuesto de líneas de corriente radiales dirigidas hacia afuera desde un punto común, donde el fluido se suministra a un régimen constante. Consideraciones de continuidad muestran que las velocidades disminuyen, cuando las líneas de corriente se expandan y la simetría requerirá que todas las velocidades sean las mismas y a la misma distancia radial desde el origen. A través de todos los círculos de radio (r) pasará el mismo régimen de flujo (q).

La función de la corriente para un flujo de fuente se puede encontrar fácilmente a partir de

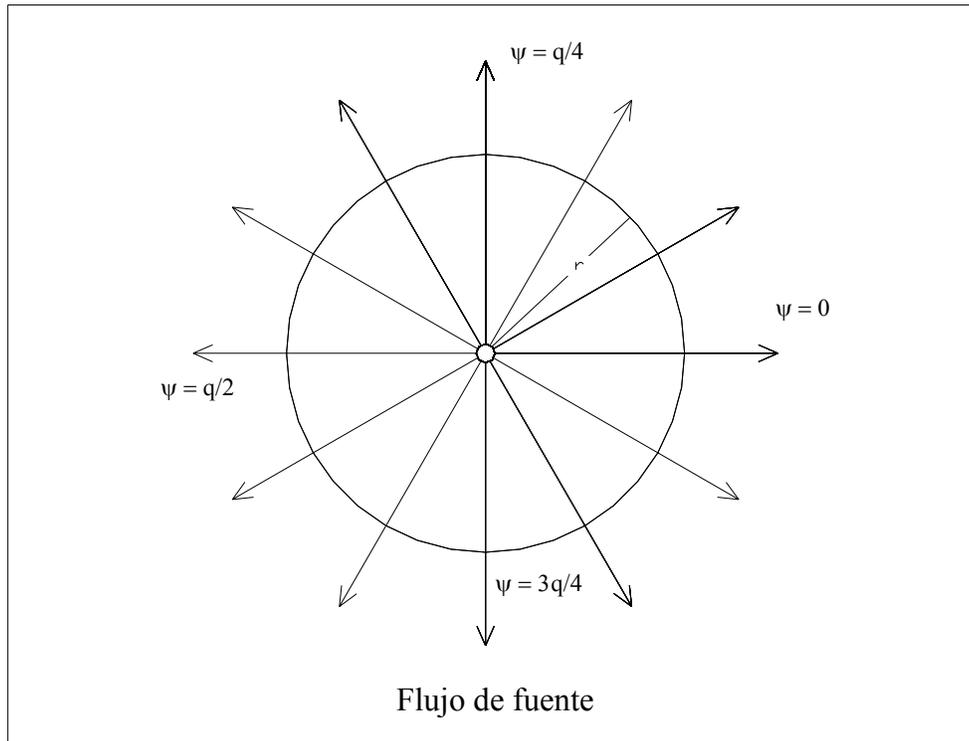
$$\psi = \int \left(\frac{q}{2\pi r} \right) r d\theta + \int (0) dr = \frac{q\theta}{2\pi} + C$$

Y si se elige la línea de corriente $\psi = 0$ a lo largo de la línea radial $\theta = 0$, la constante

desaparece y

$$\psi = \frac{q\theta}{2\pi}$$

El opuesto exacto del flujo hacia afuera a partir de una fuente, es el flujo hacia adentro de un sumidero, cuya función de la corriente se puede escribir igual pero de sentido



contrario.

Vórtice Libre: otro flujo básico y útil es el del vórtice libre descrito por líneas de corriente circulares concéntricas y con distribución de velocidad tal, que el campo de flujo es irrotacional; en este campo de flujo la componente radial de la velocidad es en todas partes cero. La circulación Γ a lo largo de cualquier curva cerrada coincidente con cualquier línea de corriente puede ser calculada como $\Gamma = (2\pi r)v_t$, donde $v_t = \text{constante}$. La circulación se define como la integral lineal de la componente tangencial de la velocidad alrededor de una

curva cerrada fija en el flujo. En este caso es una constante del vórtice, y es la misma a lo largo de todas las líneas de corriente

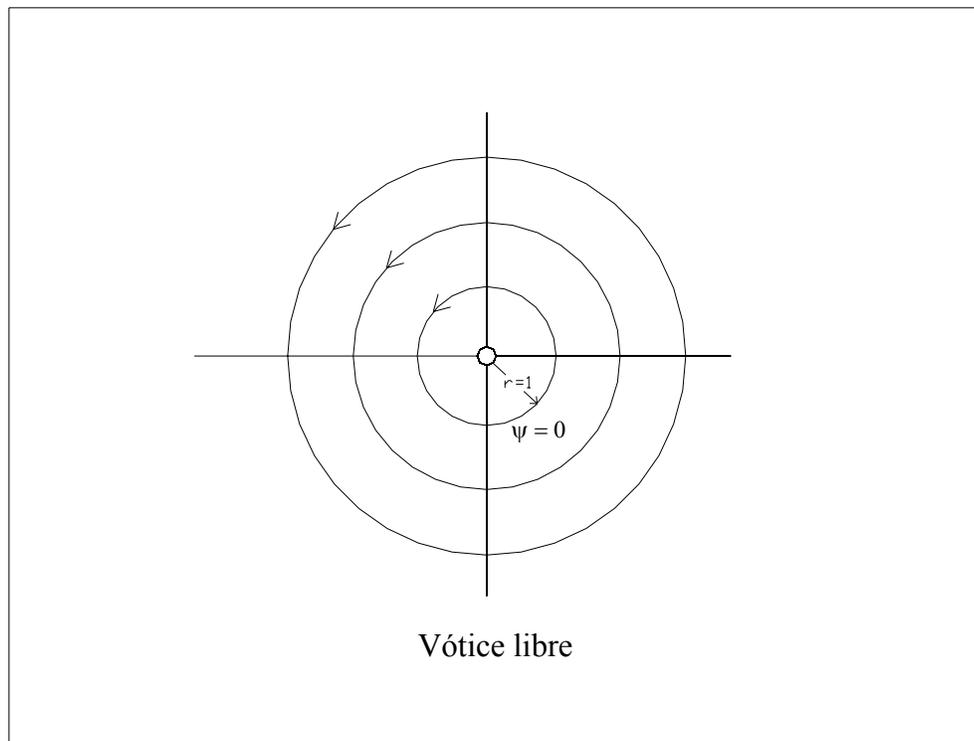
La función de la corriente para el vórtice libre se puede encontrar a partir de

$$\psi = \int \left(-\frac{\Gamma}{2\pi r} \right) dr + \int (0) r d\theta + C$$

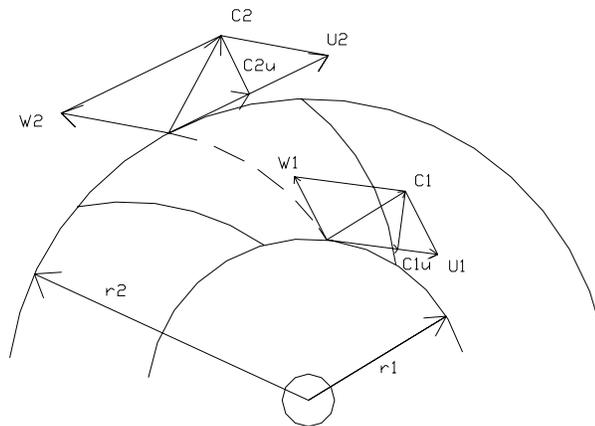
Resolviendo la integral y tomando ψ como cero para la línea de corriente que pasa a través de $r = 1$, desaparece la constante de integración y queda:

$$\psi = -\frac{\Gamma}{2\pi} \ln r$$

La función de la corriente para un vórtice en el sentido contrario quedaría igual pero con signo positivo.



Ecuación de Euler para las turbomáquinas: En este apartado se desarrollará la ecuación fundamental de las turbomáquinas obtenida por el matemático Leonardo Euler en el año 1754, que es conocida como la ecuación de Euler, en la cual se establece una relación entre la altura de presión desarrollada por el impulsor de la turbomáquina y la velocidad del flujo que pasa a través de la rueda de trabajo y sus dimensiones. En encontrar esta dependencia se basa principalmente la teoría de las turbomáquinas, por lo que queda en evidencia la importancia fundamental de esta ecuación.



Triángulos de velocidades de un rodete en la entrada y la salida.

Al evaluar el momento de la cantidad de movimiento en la rueda que se muestra en la figura, sabiendo que el momento es igual a la fuerza por el radio, en la proyección periférica y suponiendo un número infinito de álabes (∞):

$$M_{u\infty} = F_u \cdot r$$

si la fuerza es igual a la velocidad por el flujo másico, el momento queda:

$$M_{u\infty} = \dot{m} \cdot C_u \cdot r$$

Al calcular la potencia teórica producida, multiplicando el momento por la velocidad angular, queda:

$$N_{u\infty} = M_{u\infty} \cdot \omega$$

Sustituyendo:
$$N_{u\infty} = \dot{m} \cdot C_u \cdot r \cdot \omega$$

Además $u = \omega \cdot r$ entonces
$$N_{u\infty} = \dot{m} \cdot C_u \cdot u$$

El trabajo específico L_u es la potencia dividida por el flujo másico, $L_{u\infty} = \frac{N_{u\infty}}{\dot{m}}$ si se

calcula como la diferencia entre la entrada (1) menos la salida (2), tenemos que el trabajo específico desarrollado por la bomba es:

$$L_{u\infty} = u_2 \cdot C_{2u} - u_1 \cdot C_{1u}$$

Finalmente esta es la llamada ecuación de Euler o ecuación fundamental de las turbomáquinas, que más adelante se usará para el cálculo del rodete.

I.4 Procesos de fabricación.

Máquinas Herramientas: Se llaman así a los instrumentos utilizados en la industria moderna para la fabricación y producción de todo tipo de piezas y elementos generalmente metálicos, por medio del estampado o remoción de material. Estas máquinas pueden clasificarse en tres categorías: máquinas desbastadoras convencionales, prensas y máquinas herramientas especiales. Las máquinas desbastadoras convencionales dan forma a la pieza cortando la parte no deseada del material y produciendo virutas. Las prensas utilizan diversos métodos de modelado, como cizallamiento, prensado o estirado. Las máquinas herramientas especiales utilizan la energía luminosa, eléctrica, química o sonora, gases a altas temperaturas y haces de partículas de alta energía para dar forma a materiales especiales y aleaciones utilizadas en la tecnología moderna.

La herramienta principal para la elaboración del rotor es la fresa. El fresado es una operación de mecanizado que consiste en hacer pasar la broca, un cilindro rotatorio provisto de filos, por la pieza de trabajo de tal forma que el eje de rotación de la herramienta cortante sea perpendicular a la dirección de avance. Los cortes de los filos en la herramienta están hechos de forma tal que haya un canal por el que pueda salir la viruta. Los tipos y opciones de fresado son muy variados según las necesidades; los filos cortantes de la herramienta pueden ser uno o múltiples, la posición de la herramienta puede ser cilíndrica o frontal, el avance puede ser en dirección o contradi dirección y muchas otras características más.

También se utilizará en este trabajo el torneado, proceso mediante el cual se hace girar la pieza de trabajo y por el frente o los costados se hace presión con una herramienta de corte de un filo, arrancando de esta forma el material y creando preferiblemente sólidos de revolución.

Otro de los procesos utilizados en la parte final es el abrochado: la herramienta de corte es un cilindro que a lo largo tiene varios filos de corte, de uno más pequeño a otro más grande. Esta herramienta se introduce en un agujero de área igual a la del cilindro y se hace presión para que a medida que va penetrando en el agujero los filos van cortando, haciendo una perforación según la forma que tengan los cortes. Este proceso puede variar según las necesidades, en este caso se usará para hacer el chavetero que permitirá la transmisión de fuerza del eje al rodete.

Control numérico: Es una forma de automatización de los procesos de manufactura mediante la programación alfanumérica. El operador introduce los datos manualmente o mediante un software, para que la máquina se encargue de ejecutar los movimientos oportunos, a fin de producir los cortes deseados, con la secuencia requerida. Para esto tienen que fijarse unas posiciones relativas entre la pieza de trabajo y la máquina, llamados cero de máquina, de pieza y de herramienta.

El control numérico juega un papel fundamental en el desarrollo industrial ya que permite la optimización de los procesos fabricando gran cantidad de productos con muy buena calidad. También tiene la ventaja de poder realizar movimientos, de curvas matemáticas por ejemplo, que para un operador es prácticamente imposible con la

exclusiva habilidad manual. Por todas estas razones un producto fabricado por control numérico puede resultar ser más barato debido a la rapidez, precisión y flexibilidad que puede tener una máquina controlada automáticamente. Se dice que el uso del control numérico es recomendable para realizar entre 5 y 1.000 piezas, de lo contrario dejaría de ser rentable.

CAP. II METODOLOGÍA

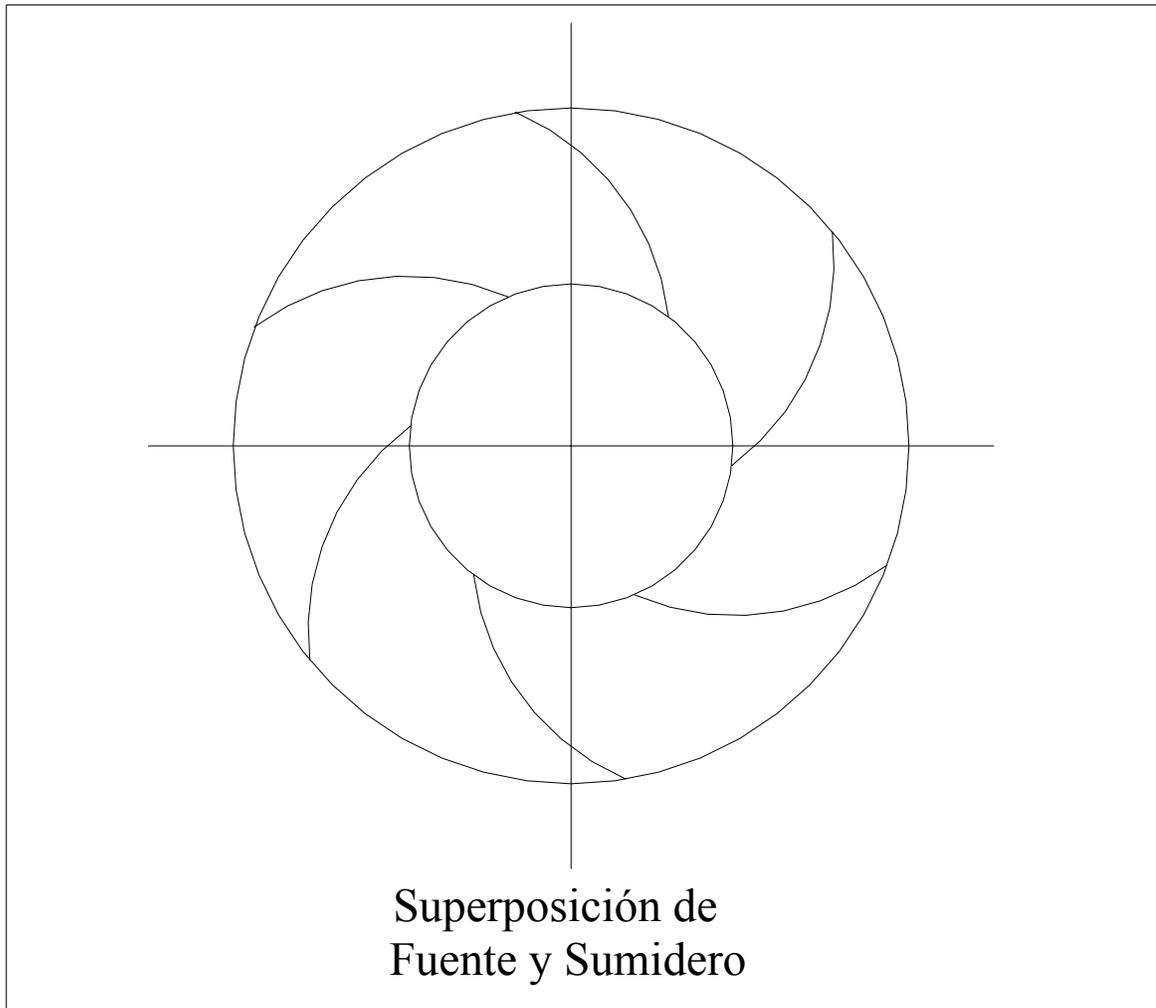
CAP. II METODOLOGÍA

II.1 Diseño de los álabes.

Fuente y sumidero: Para la elaboración de la curva que describirá la trayectoria del álabes se usará principalmente la teoría de flujo potencial, por medio de la superposición de dos flujos simples como son el vórtice libre y el sumidero.

El sumidero es un flujo teórico cuyas líneas de corriente son todas radiales. La función de corriente para una fuente se puede expresar, en coordenadas cilíndricas, de la siguiente forma: $\psi = \frac{q \cdot \theta}{2 \cdot \pi}$ si va hacia el centro, y negativo si va hacia fuera. Donde ψ es la función de corriente, q el caudal específico por unidad de longitud y θ el ángulo.

El vórtice libre es aquel flujo cuyas líneas de corriente son totalmente circulares y aumentan o disminuyen a medida que se alejan o acercan del centro. La expresión que describe este flujo es la siguiente: $\psi = \frac{\Gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(r)$ donde el signo indica la dirección del giro, Γ es la circulación y r el radio.



Al superponer estos dos flujos, la curva resultante es una espiral que bien pudiera ser la trayectoria relativa seguida por el fluido a través de los álabes. Matemáticamente esta superposición queda de la siguiente forma: $\psi = \frac{q \cdot \theta}{2 \cdot \pi} + \frac{\Gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \ln(r)$

Si se hace la suposición de que, cuando el fluido está en contacto con el álabe, la velocidad es cero y por lo tanto $\psi = 0$, y además se despeja el radio en función del ángulo, queda una curva en coordenadas cilíndricas que, una vez calculadas las constantes

correspondientes, será la que se utilice para el diseño de los álabes del rodete. Quedando de la siguiente forma:

$$r = e^{-\frac{q \cdot \theta}{\Gamma}}$$

Para poder graficar esta ecuación hace falta encontrar los valores de q y Γ . En primer lugar encontraremos la circulación.

Cálculo de la circulación: Para el cálculo del rodete se tomarán como valores de caudal y presión los de la curva característica entregada por el fabricante de la bomba, específicamente los de máxima eficiencia, estos son:

Para una eficiencia de 54,5 % y 2.800 rpm, $Q = 10.2 \text{ ft}^3/\text{min}$ y $H = 57 \text{ ft}$.

En sistema internacional: $Q = 4.814 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{seg}$. y $H = 17.374 \text{ m}$.

Los radios del rotor son: $r_2 = 2,5 \text{ in}$ y $r_1 = 0,984 \text{ in}$.

La circulación se calculará en la salida y con la velocidad periférica relativa al movimiento giratorio del rotor. La ecuación de la circulación para un observador relativo con respecto al movimiento del rotor queda de la siguiente forma:

$$\Gamma_3 = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot W_{3u}$$

La velocidad periférica relativa se despejará de la ecuación del trabajo específico, que para una turbomáquina generadora es la siguiente:

$$L_{u\infty} = u_2 \cdot C_{3u} - u_1 \cdot C_{0u}$$

Para este caso se supondrá que el fluido entra en los álabes completamente radial ya que no hay paletas directrices ni alguna otra cosa que lo desvíe, por lo que la componente periférica de la velocidad absoluta sobre U es nula $C_{ou} = 0$.

Por lo que el trabajo específico es igual a: $L_u = U_2 \cdot C_{3u}$.

Al hacer una descomposición del comportamiento de las velocidades dentro del rotor queda que:

$$U_2 = C_{3u} + W_{3u}.$$

Despejando: $C_{3u} = U_2 - W_{3u}$.

Sustituyendo la velocidad de la salida en la ecuación de trabajo resultante queda que:

$$L_u = U_2 \cdot (U_2 - W_{3u}).$$

Despejando la velocidad relativa: $W_{3u} = U_2 - L_u/U_2$.

La velocidad del álabe en la salida es igual al producto de la velocidad angular por el radio. Transformando la velocidad angular por las revoluciones por minuto queda:

$$U_2 = \omega \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot r$$

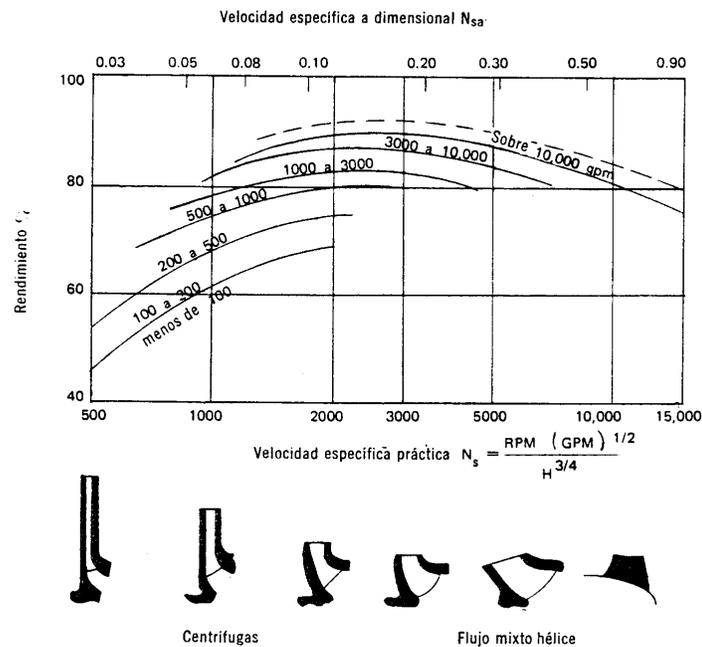
El radio y las rpm son conocidas, calculando en sistema internacional obtenemos la velocidad en la salida, $U_2 = 18,619$ m/seg.

El trabajo hidráulico es el trabajo teórico dividido por la eficiencia hidráulica,

$$L_u = \frac{L}{\eta_h}$$

y el trabajo teórico es la altura por la gravedad, entonces

$$L_u = \frac{g \cdot H}{\eta_h}$$



Curvas de rendimiento vs velocidad específica para bombas en general. Adaptada de "Pumps a power handbook" Power, octubre de 1954.

Para el cálculo de la eficiencia hidráulica se puede recurrir a las curvas de rendimiento vs velocidad específica para bombas en general del libro *Turbomáquinas hidráulicas*; de Manuel Polo Encinas, que se muestra en la figura. Para esto, primero hay que calcular la velocidad específica adimensional n_s .

$$n_s = \frac{n \cdot Q^{0.5}}{H^{3/4}}$$

donde n está en rpm, Q en galones por minuto y H en pies, todos tomados de la curva característica que será nuestro parámetro de diseño.

$$n = 2.800 \text{ rpm}$$

$$H = 57 \text{ ft}$$

$$Q = 63.534 \text{ gpm.}$$

Sustituyendo en la ecuación obtenemos $n_s = 1075.86$. Con este valor interceptado en la curva de menos de 100 gpm nos queda que el rendimiento hidráulico es aproximadamente del 62 %. Por cuestiones de similitud geométrica. para que haya espacio para hacer los agujeros de refrigeración iguales a los del rodete de comparación, este rendimiento será disminuido un 10 % quedando en 55,8 %.

Al sustituir este valor, de la eficiencia hidráulica en la ecuación obtenida para el trabajo específico, junto con la altura y la gravedad resulta $L_u = 305,3353 \text{ m}^2/\text{seg.}$

Una vez calculadas la velocidad periférica en la salida y el trabajo específico, podemos proceder a calcular la velocidad relativa periférica en la salida. Según la relación obtenida al sustituir los valores se obtiene que $W_{3u} = 2.22 \text{ m/s.}$

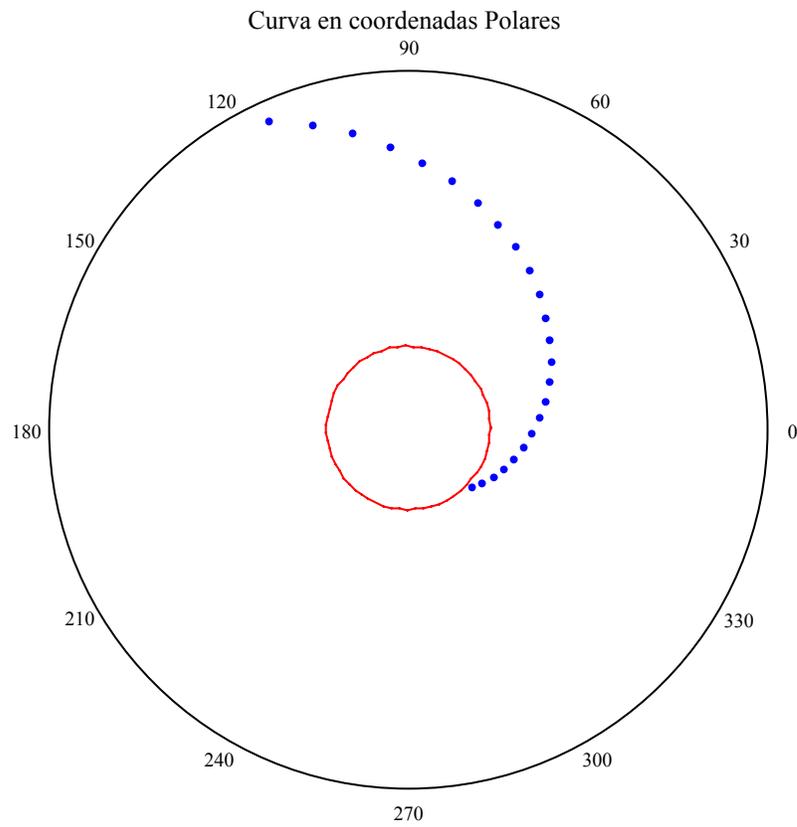
Finalmente con los datos calculados sustituidos en la ecuación de la circulación:

$$\Gamma_3 = 1,540 \text{ m}^2/\text{seg.}$$

Caudal específico q: Con el caudal absoluto, obtenido como requerido, dividido por la altura del álabe en la salida ($h = 11\text{mm}$) se tiene que $q = 0,438 \text{ m}^2/\text{seg}$.

Para graficar con más facilidad la curva requerida para fabricar el álabe resulta conveniente obtener una constante que, junto con el ángulo, sea el exponente de nuestra ecuación en coordenadas cilíndricas. A esta constante la llamaremos “a” y es igual al caudal específico entre la circulación. En este caso $a = 0.494$.

Al graficar la ecuación $r = e^{-0,494-\theta}$ en coordenadas polares, entre los límites del radio de entrada y salida de los álaves se observa la siguiente curva, que será la línea central del espesor de nuestro álabe, graficada en Mathcad.



Otras características del rotor: En la medida de lo posible se tratará hacer el rodete lo más parecido al original de la bomba, en todo lo demás que no sea la curva del álabe, para poder comparar las posibles diferencias en su funcionamiento y que las mismas sean debidas exclusivamente al diseño de la curva del álabe y no a otros factores como las pérdidas en los intersticios con la carcasa, etc. Una de las únicas diferencias en cuanto a geometría se refiere es la de la inclinación del plato posterior del rodete que será recto completamente debido a la dificultad que se presenta al realizarlo inclinado en una fresa de control numérico. Para evitar diferencias en cuanto al volumen interno por donde circulará el fluido, se buscará una posición intermedio del plato posterior para que el volumen sea aproximadamente el mismo.

Cálculo del numero de álabes: Con la idea de determinar sólo las diferencias producidas por la curva, se mantendrá lo más parecido posible las otras características incluyendo el número de álabes. A modo de información para saber la posible influencia en el análisis de los resultados de haber puesto mayor o menor número de álabes, se hará el cálculo según el libro *Bombas Ventiladores Compresores* de V. M. Cherkasski.

“Los números demuestran que el número óptimo será tal numero de paletas con el cual la distancia media entre ellas es aproximadamente igual a la mitad de su longitud. A esta condición responde la formula empírica de Pfeleiderer, que se usa ampliamente al determinar al número de paletas de trabajo de las bombas:”²

$$Z = 6,5 \frac{m+1}{m-1} \operatorname{sen} \frac{\beta_{1p} + \beta_{2p}}{2}; \quad m = D_2/D_1$$

Para nuestro caso los datos son:

Ángulo de entrada: $22,777^\circ$

Ángulo de salida: $22,048^\circ$

Radio de salida: 63,5 mm

Radio de entrada: 20.425 mm

Con estos datos, $Z = 5,53$ Se toma el número entero mayor, por lo que el número recomendada de álabes es 6, son los que actualmente tiene.

II.2 Elaboración del rodete.

Selección del material: Los materiales utilizados frecuentemente en los rodetes son, en primer lugar el acero, por su dureza y facilidad para obtenerlo, es el más económico pero tiene la desventaja de que se oxida fácilmente si no se protege con algún recubrimiento superficial. Otro material utilizado frecuentemente es el bronce, aleación de cobre, que también posee dureza y ductilidad generalmente aceptables para resistir las altas presiones e incluso algo de cavitación a las que generalmente están sometidas las bombas. Tiene la ventaja de que además es más resistente a la corrosión que el acero, pero con el inconveniente de que resulta más costoso.

Para este trabajo el material utilizado será el Aluminio que, aunque no es muy usado frecuentemente en la elaboración de rodetes, tiene la ventaja de ser más económico, más accesible en el mercado y más fácil a la hora de ser maquinado. Tiene la desventaja de ser

más débil que el acero y el bronce pero lo que se busca, en este caso, es sólo la realización de unas pruebas y no su resistencia a largo plazo.

Fabricación: La elaboración del rodete comprende básicamente tres operaciones de mecanizado: torneado, fresado y abrochado. En primer lugar se realiza el proceso de torneado en la parte de los álabes, seguidamente con la fresa se hace el vaciado, primero de la parte delantera, y después se hace el vaciado de la parte trasera, hasta que en la última pasada se desprenda el rodete del resto del tocho por la coincidencia de los vaciados delanteros y traseros.

Torneados: El primer paso en la elaboración del rodete es un torneado previo al fresado, en la parte frontal donde estarán los álabes, con el fin de darle los ángulos de inclinación que tienen los álabes en su parte superior y a la entrada (3° respecto al plano horizontal y 20° respecto al plano vertical como muestra la figura en el Anexo F). Este procedimiento lo hizo el técnico con velocidades, avances de corte y profundidades que creyera oportunas según su experiencia le indicara. El tiempo aproximado de esta operación es de una hora.

Una vez torneada la parte delantera del rodete se procede al fresado de los álabes y seguidamente, de forma opcional para ahorrar tiempo, a tornear en forma de desbaste la parte trasera, dejando cierta cantidad de espacio para que la fresa termine el trabajo con las medidas correspondientes.

Fresado en Control Numérico: Actualmente en el mercado existe toda una variedad de programas de computación, los llamados de tipo CAM (computer aided manufacturing) que realizan el código de operaciones y acciones que debe seguir la máquina de Control Numérico, para fabricar la pieza requerida con solo dibujarla en el mismo Software o en otro del tipo CAD (computer aided design), para después pasarlo al CAM.

En este trabajo no se utilizará ningún tipo de Software del estilo CAM; en primer lugar porque no se encuentran disponibles en la Escuela y en segundo lugar porque no es el objetivo del trabajo y además no se tiene la habilidad sobre su funcionamiento, por lo que todas las trayectorias a seguir por la fresa se programarán de forma manual indicando las coordenadas a seguir.

Principales códigos utilizados: Ya que no se pretende dar un curso de Control Numérico, solo se indicarán a continuación algunos de las funciones utilizadas para entender el código utilizado, sin descender a pequeños detalles.

La forma de darle a la máquina las instrucciones de desplazamiento es principalmente mediante las indicaciones de las coordenadas de los puntos de llegada. En cada línea de programa se puede poner el número de la línea precedido de una N. Seguidamente se coloca la función o comando precedida de una letra G o M por ejemplo. A continuación se dan algunos de estos códigos:

G01 X # Y # Z # ; interpolación lineal. Se indica además las coordenadas del punto de llegada.

G02 X # Y # J # R # ; arco de circunferencia (en sentido horario). Se indica además una componente de las coordenadas del centro y el radio (G03 si es sentido antihorario).

G00 X # Y # ; desplazamiento lineal sin corte.

G65 P ## ; llamar a otro programa.

G68 X # Y # R # ; rotar las próximas operaciones según un centro y unos grados dexagesimales.

S ## ; número de revoluciones por minuto del husillo.

M2 ; sentido de giro del husillo (M3 sentido antihorario).

M99 ; fin de un subprograma.

G28 X # Y # Z # ; ir para el cero de la máquina.

Para identificar el final de las líneas de programa se coloca un punto y coma (;).

Las dimensiones se colocan en milímetros con una precisión de milésimas de milímetros.

El avance se coloca escribiendo una F seguida del avance en milímetros por minuto.

Antes de empezar con el mecanizado de la pieza es necesario establecer unos puntos para la interacción correcta entre la máquina y la pieza de trabajo, estos son los llamados ceros de máquina, de pieza y de herramienta.

El cero de máquina es el punto de partida desde el cual se toman como referencia todas las demás coordenadas, es el cero absoluto que el fabricante ha puesto como referencia y que no se modifica en ningún momento.

El cero de la pieza es el punto que se ha establecido como coordenada cero de referencia de la pieza para indicar los demás movimientos y distancias que debe recorrer la herramienta. Este punto es independiente del tamaño de la fresa y es el que se toma en cuenta en el diseño del programa. A la máquina hay que indicarle donde se encuentra este punto, esto se hace indicándole las coordenadas respecto al cero de máquina. Las mismas se pueden conocer moviendo la herramienta manualmente hasta el punto en que haga contacto con el cero deseado (eje X, Y o Z).

Cero de la herramienta: es la forma de indicarle a la máquina cual es la medida de la altura a la cual se encuentra la punta de la herramienta. Esto es muy útil y especialmente si se tienen varias herramientas, donde cada una tiene largos diferentes. Esta medida se calibra usando una función específica del tablero de mandos, indicándole el momento en el que la herramienta ha hecho contacto con el cero en el eje Z de la pieza.

En la elaboración del rodete se ha visto que es prácticamente indispensable el uso de ciclos repetitivos para disminuir considerablemente el tamaño del programa, esto es lo que se llama la programación Macro, que es el uso de variables y funciones para poder realizar cortes más complejos diferentes a los lineales y arcos de circunferencia. En este caso las variables son números precedidos de un numeral (#). Y los ciclos repetitivos, el usado para este trabajo, es un ciclo WHILE DO END. Después del WHILE se coloca entre paréntesis la condición

para que se cumpla, por ejemplo GE *mayor o igual que* por sus siglas en ingles y LE *menor o igual que*. También tiene la opción de hacer un ciclo dentro de otro, es por eso que después del DO se coloca un número y al final después del END otro número para indicar qué ciclo se está cerrando.

Trayectoria del flujo potencial: En este apartado se explicará la forma en que se escribió el código para que la fresa machine el álabe con la forma de la curva calculada en el capítulo 1.

Debido a que el álabe tiene espesor, se presenta la dificultad de que la trayectoria a seguir por la fresa es diferente cuando recorre la parte interior que cuando recorre la parte exterior, ya que las curvaturas son diferentes entre sí y estas a su vez son diferentes a la calculada para un álabe de espesor despreciable. En el interior la curva es más cerrada y en el exterior es más abierta.

Para solucionar este problema, con la ayuda de un programa de diseño por computadora y otro de cálculos, se buscó un coeficiente a para la ecuación $r = e^{a\theta}$ de tal forma que coincidiera lo más cercano posible a una curva separada 5 mm a la izquierda, y otra a la derecha, de la curva con el coeficiente $a = 0.494$. De esta forma tanteando para distintos valores de a , llevándolos a coordenadas rectangulares y graficándolos se encontró que los mejores fueron, para el interior $a = 0,480$ y para el exterior $a = 0.511$. Además de modificar la curvatura de la ecuación, hay que modificar su posición y para eso se desplaza en las direcciones X y Y para que coincida con la curva buscada.

Para hallar el punto de partida, por ejemplo en el recorrido haciendo el álabe de afuera hacia adentro, se busca el radio exterior, que es conocido, se le suma la distancia que se desplazó la curva. Este radio nuevo se sustituye en la ecuación para obtener el ángulo con el cual se iniciará el ciclo repetitivo que realiza la curva del álabe. Un procedimiento similar se hace para indicar cuando se cumple la condición de parada, que depende del radio.

La subrutina que se encarga de la parte exterior del álabe llamado P 52 es la siguiente:

```
# 4 = 8,304 ;
# 5 = 69,64 ;
WHILE (# 5 GE 19,265) DO 2 ;
# 6 = 0,511 * # 4 ;
# 5 = EXP [ # 6 ] ;
# 8 = # 4 * 180/3,14159267 ;
# 1 = # 5 * cos [ # 8 ] + 1,985 ;
# 2 = # 5 * sin [ # 8 ] - 2,424 ;
G 01 X # 1 Y # 2 F 100 ;
# 4 = # 4 - 0,05 ;
END 2 ;
M 99 ;
%
```

Secuencia del vaciado en la parte delantera:

- Con arcos de circunferencia se mecaniza la parte central del álabe. El agujero central se hace aproximadamente hasta la mitad para poder centrar la fresa al voltear la pieza, como se indica más adelante, además de que el tamaño de la herramienta no alcanza hasta traspasar la pieza completa.
- Vaciado en la parte de los álabes, empezando de afuera hacia adentro por la parte exterior, llamando al subprograma P52.
- Luego un pequeño arco de circunferencia hasta llegar al otro lado del álabe.
- Mecanizado del interior del álabe según la subrutina P53, hasta llegar casi a la parte externa del rodete, para terminar con una interpolación lineal, de tal forma que el extremo del álabe quede puntiagudo.
- Con rectas y arcos de circunferencia se desbasta el relleno que queda entre los dos álabes.
- Los pasos anteriores se repiten variando la Z, que es la profundidad del corte, hasta llegar a la superficie de la cara anterior del rodete.
- Al finalizar cada álabe se realiza el agujero de empuje axial.

- Por medio del comando de rotación se repiten los pasos anteriores para el resto de los álabes; a 60°, 120°, 180°, hasta llegar a 300 para el 6^{to} álabe.

- Por último se hace el maquinado de la superficie por donde entra el fluido que, para suavizar el flujo no es recomendable que queden ángulos rectos y por esta razón se realizó con una fresa de punta redonda.

Vaciado de la parte trasera:

Se realiza con arcos de circunferencia cuyo radio aumenta a medida que se avanza. Al terminar un plano de superficie varía la Z para penetrar un poco más. De esta forma se realizan todos los cortes necesarios hasta que la pieza se desprege del tocho porque han coincidido los cortes de las dos caras del rodete.

Centrado de la pieza: para que la pieza quede lo más centrada posible, el procedimiento empleado fue: al momento de torneear la primera parte se aprovechó para realizar, en el torno, un agujero pasante con el diámetro de la fresa (6 mm) en todo el centro. Este agujero sirve para centrar, en la fresa, las coordenadas X y Y de la pieza, tanto en la parte delantera como en la trasera.

Velocidades seleccionadas: El criterio para la selección de las velocidades, avances y penetración, se basó principalmente en la experiencia de los técnicos expertos en mecanizados del laboratorio de Tecnología de la universidad.

Según el manual Casillas de Máquinas Herramientas¹, las velocidades a utilizar para el Aluminio con una fresa de 6 mm de diámetro y 4 filos de corte es de 6000 rpm, 48 mm/min y 3 mm de penetración para una pasada única. Por recomendación de los técnicos las velocidades utilizadas fueron 70 mm/min. 900 rpm y 2 mm de penetración para el desbaste. Para el afinado se utilizó 1000 rpm, 50 mm/min y 1 o 0,5 mm de penetración.

Por recomendación, también de los técnicos, no fue necesario usar lubricantes tradicionales por ser el Aluminio un material muy fácil de maquinar y para evitar que la viruta adquiriera una contextura pastosa. Sólo se utilizó un poco de Kerosene, especialmente en las últimas pasadas, para proporcionar un mejor acabado.

Chavetero: El último proceso de maquinado empleado en la fabricación del rodete es la apertura del chavetero que se realizó mediante el proceso de abrochado, utilizando para ellos el eje con la medida deseada y una prensa para poder hacerlo introducir dentro del agujero central del rodete, abriendo de esta forma el chavetero con una medida de 4,75 mm de ancho por 2,3 mm de alto.

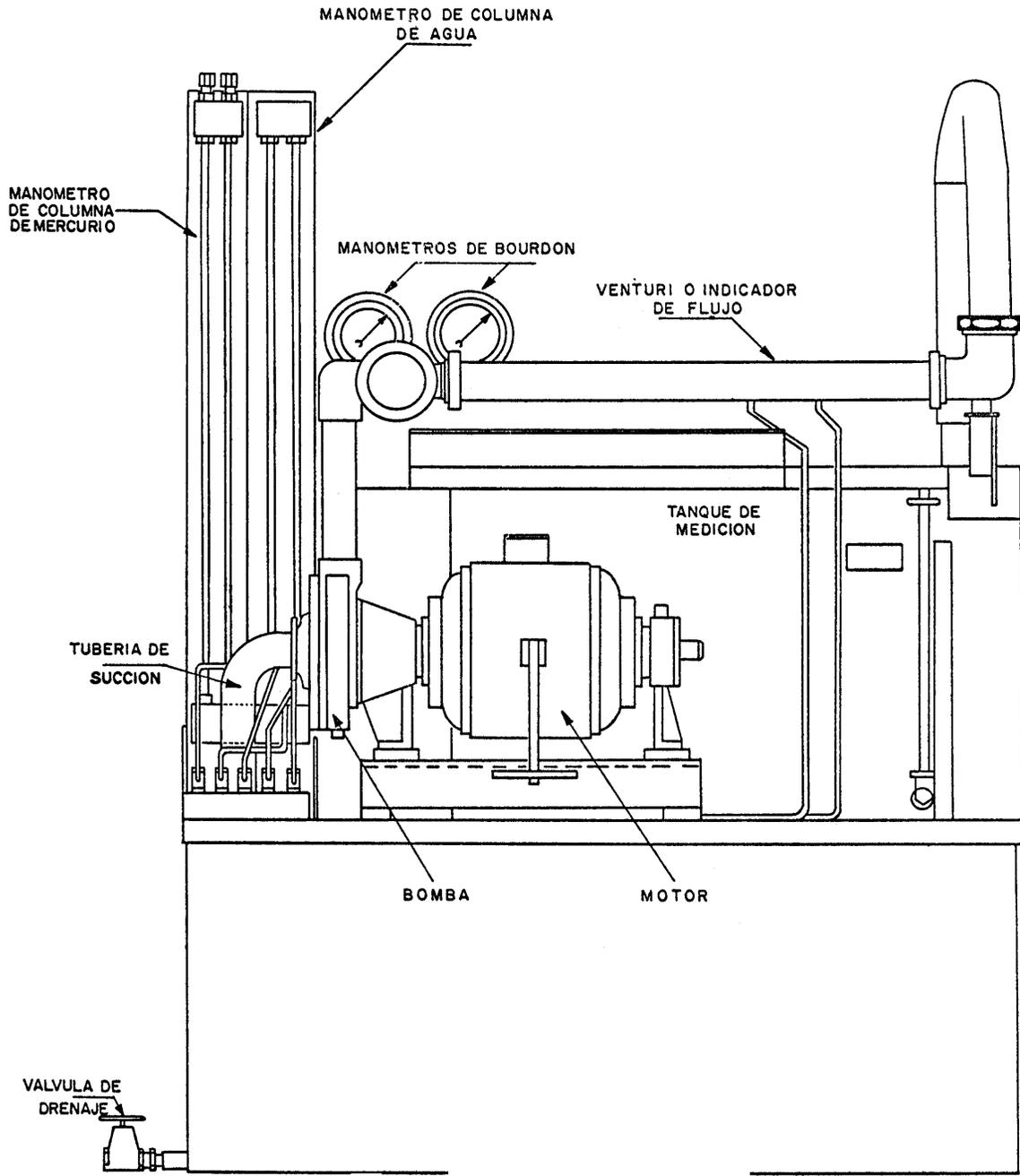
II.3 Pruebas.

Con objeto de comprobar el desempeño del rodete que se ha fabricado, se realizaron ensayos en un banco de pruebas para poder compararlo, de esta forma, con el rotor hecho por el fabricante (la Armfield) que es con el que se han hecho todas las prácticas desde su adquisición.

Banco de pruebas: Básicamente es una bomba centrífuga adaptada para hacer mediciones de presión en puntos diferentes, ver la cavitación, hacer la curva característica de caudal contra altura y la eficiencia correspondiente.

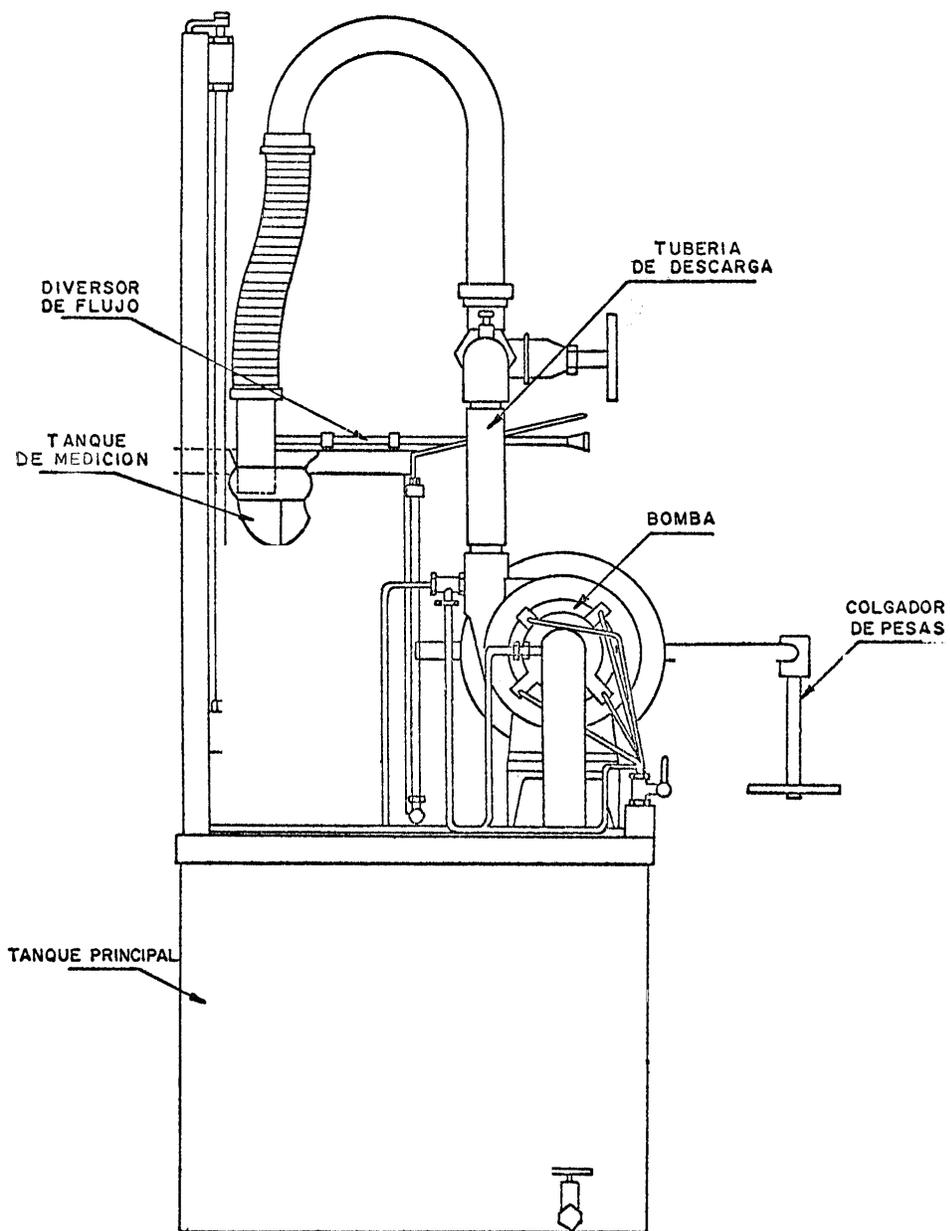
Está compuesto de un motor eléctrico, la bomba en sí con su carcasa de espiral, el rotor unido al motor mediante un eje y sellos. La tapa frontal es de acrílico transparente para poder observar el rodete en funcionamiento, la cavitación, etc. Con cuatro tomas de presión en diferentes puntos conectadas a un distribuidor que a su vez se conecta al que llamaremos el manómetro de salida, con la opción de tomar la presión en conjunto o por separado de cada uno de estos puntos. Posee también otro manómetro tipo Bourdon conectado en la entrada de la bomba para medir la presión de entrada.

El equipo posee además una placa orificio de material transparente para observar el paso del líquido, la cual está conectada a un manómetro diferencial de mercurio para poder medir la diferencia de presión antes y después de la placa y de esta forma, con una curva calibrada previamente, calcular el caudal que pasa a través de la tubería. Para calcular la eficiencia, el motor está apoyado en los extremos de forma que pueda girar y calcular el torque nivelándolo con pesas colocadas en un brazo pegado a la carcasa.



BOMBA CENTRIFUGA

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE TERMOMAQUINAS
1970



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
LABORATORIO DE TERMOMAQUINAS

BOMBA CENTRIFUGA

Una vez que se ha instalado el rotor en el banco de pruebas, se pone en marcha la bomba tomando en cuenta las precauciones necesarias para su funcionamiento tales como cebarla y prenderla poco a poco mientras se abren las válvulas que permiten la circulación del fluido.

Por medio de estas pruebas se puede llegar a conocer la curva característica de la bomba, para ello se van calculando puntos: a una velocidad específica, se observa cual es el caudal que indica la placa orificio una vez hecha la conversión de cm de Hg a lit/seg. También se observa cual es la presión indicada en los manómetros de entrada y salida. Se colocan pesas hasta nivelar el motor y con estos datos se calcula la potencia del motor y la potencia hidráulica para ese punto en específico. Y con estos dos datos la eficiencia total.

Los cálculos son los siguientes:

$$Nh = \gamma \cdot Q \cdot H$$

$$H = \frac{(Ps - Pe)}{\gamma}$$

$$Ne = w \cdot T$$

$$w = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)$$

$$T = F \cdot b = m \cdot g \cdot b$$

$$\eta = \frac{Nh}{Ne}$$

donde N_h = Potencia hidráulica.

N_e = Potencia en el eje del motor.

Q = caudal.

H = altura piezométrica.

P_s, P_e = presión a la salida y la entrada de la bomba.

γ = peso específico del fluido.

W = velocidad angular.

N = rpm del motor.

F = Fuerza del motor.

b = brazo de las pesas.

m = masa de las pesas colocadas.

g = gravedad.

η = eficiencia total de la bomba.

CAP. III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAP. III ANÁLISIS DE RESULTADOS

III.1 Características del mecanizado.

Acabado: El acabado de la pieza fue de excelente calidad, hasta el punto de ser casi de pulido gracias al cuidado que se tuvo en la última pasada de aumentar las rpm, disminuir el avance y aumentar la cantidad de lubricante. En las paredes del álabe se observó un poco de mayor rugosidad pero siempre mucho mejor que la producida por fundición. Si se comparan, la rugosidad dejada en un rotor fabricado por fundición, por más que se haya maquinado para mejorar los detalles, siempre hay partes a las que no se tiene acceso, y las que se pueden acceder, no se pueden maquinar con la misma precisión que si se hubiera fresado desde el principio.

Tiempos de fabricación: debido a fallas del Centro de Mecanizado que impedían su operación continua, hubo que hacer paradas constantes, aproximadamente cada quince minutos, y volver a correr el programa haciendo pequeñas variaciones para no repetir todo el proceso desde el punto inicial, por lo que resultó imposible medir el tiempo exacto de operación. Según un estimado que se hizo a partir de las mediciones del tiempo que se demoraba en maquinar partes específicas y después multiplicando por la cantidad de veces que repetía el mismo mecanizado se llegó a que los tiempos aproximados de duración son de 6 hr por la parte delantera y un poco más por la parte trasera. El tiempo empleado es considerable, prácticamente un día completo de trabajo tomando en cuenta los torneados iniciales, el fresado y el chavetero. Aún así no es tanto comparado con lo que se tarda un tornero haciendo el

negativo para el molde de fundición, en el que tiene que hacer los perfiles de uno en uno en madera, pegarlos a la base y después tornearlo según una plantilla de papel con la que va comparando cada instante hasta que las alturas sean las deseadas.

En este caso se usó una herramienta de 6 mm que es pequeña para la cantidad de vaciado que se requiere. La geometría de la pieza requería usar este diámetro de herramienta si lo que se quiere es usar solo una herramienta, pero de usarse varias, el ahorro de tiempo se podría disminuir considerablemente.

III.2 Curva característica de la bomba.

Se realizaron ensayos para diferentes velocidades: 1.600, 1.800, 2.000, 2.200, 2.400, 2.600 y 2.800 rpm. A menos de 1.600 rpm el error en los manómetros es más significativo, y la cantidad de puntos de medición son menores, a bajas revoluciones el caudal máximo disminuye, por lo que se decidió omitirlas por falta de importancia, ya que tiene poca significación una curva con sólo uno o dos puntos por curva.

Los resultados se muestran a continuación:

Tablas de Resultados (Sistema Internacional)

n = 2800 rpm

Pe (Pa)	Ps (Pa)	Q (m3/s)	H (m)	Nh (W)	Ne (W)	η (%)
6078,60	206850,00	2,98E-03	21,98	640,83	1258,22	50,93
6754,00	199955,00	3,82E-03	21,51	804,13	1437,97	55,92
9455,60	193060,00	4,50E-03	21,24	935,72	1869,36	50,06
10806,40	179270,00	5,08E-03	20,13	1001,22	1761,51	56,84
10131,00	165480,00	5,60E-03	18,81	1032,57	1941,26	53,19
15534,20	151690,00	6,07E-03	18,12	1078,13	2013,15	53,55
11481,80	137900,00	6,55E-03	16,47	1056,16	2085,05	50,65
12157,20	131005,00	6,93E-03	15,98	1085,25	2156,95	50,31
12832,60	117215,00	7,28E-03	14,78	1054,72	2156,95	48,90
14858,80	103425,00	7,65E-03	13,74	1029,32	2228,85	46,18

n = 2600 rpm

Pe (Pa)	Ps (Pa)	Q (m3/s)	H (m)	Nh (W)	Ne (W)	η (%)
6754,00	179270,00	2,98E-03	19,23	560,79	968,06	57,93
8104,80	172375,00	3,82E-03	18,83	704,07	1235,11	57,00
10131,00	165480,00	4,50E-03	18,50	814,79	1402,02	58,12
11481,80	158585,00	5,08E-03	18,09	899,67	1502,16	59,89
10131,00	144795,00	5,60E-03	16,70	916,73	1568,93	58,43
11481,80	131005,00	6,07E-03	15,59	927,91	1669,07	55,59
12157,20	117215,00	6,55E-03	14,42	925,20	1669,07	55,43
12832,60	110320,00	6,93E-03	13,94	946,58	1735,83	54,53
13508,00	89635,00	7,28E-03	12,04	858,85	1802,60	47,65
14183,40	82740,00	7,53E-03	11,51	848,59	1835,98	46,22

n = 2400 rpm

Pe (Pa)	Ps (Pa)	Q (m3/s)	H (m)	Nh (W)	Ne (W)	η (%)
5403,20	158585,00	2,98E-03	16,99	495,23	770,34	64,29
6754,00	144795,00	3,82E-03	15,88	593,70	986,04	60,21
12157,20	131005,00	4,50E-03	15,19	668,93	1201,73	55,66
13508,00	124110,00	5,08E-03	14,78	734,99	1294,17	56,79
12832,60	110320,00	5,36E-03	13,39	702,45	1294,17	54,28
12157,20	103425,00	5,85E-03	12,77	731,46	1386,61	52,75
10806,40	82740,00	6,30E-03	10,68	659,32	1479,05	44,58
14858,80	68950,00	6,83E-03	9,88	660,96	1479,05	44,69

n = 2200 rpm

Pe (Pa)	Ps (Pa)	Q (m3/s)	H (m)	Nh (W)	Ne (W)	η (%)
6754,00	131005,00	2,98E-03	14,31	417,20	621,41	67,14
8780,20	117215,00	3,82E-03	13,27	496,21	903,87	54,90
10131,00	103425,00	4,50E-03	12,16	535,85	960,36	55,80
13508,00	96530,00	5,08E-03	11,96	595,02	1045,09	56,93
10806,40	75845,00	5,60E-03	9,74	534,39	1129,83	47,30
13508,00	62055,00	6,07E-03	8,76	521,52	1186,32	43,96
13508,00	55160,00	6,48E-03	8,20	520,59	1129,83	46,08

n = 2000 rpm

Pe (Pa)	Ps (Pa)	Q (m3/s)	H (m)	Nh (W)	Ne (W)	η (%)
6078,60	96530,00	2,98E-03	10,72	312,63	641,95	48,70
7429,40	75845,00	3,82E-03	8,91	333,23	693,31	48,06
9455,60	62055,00	4,50E-03	7,87	346,86	770,34	45,03
10468,70	55160,00	5,08E-03	7,43	369,64	821,70	44,99
14183,40	41370,00	5,53E-03	6,54	354,53	821,70	43,15

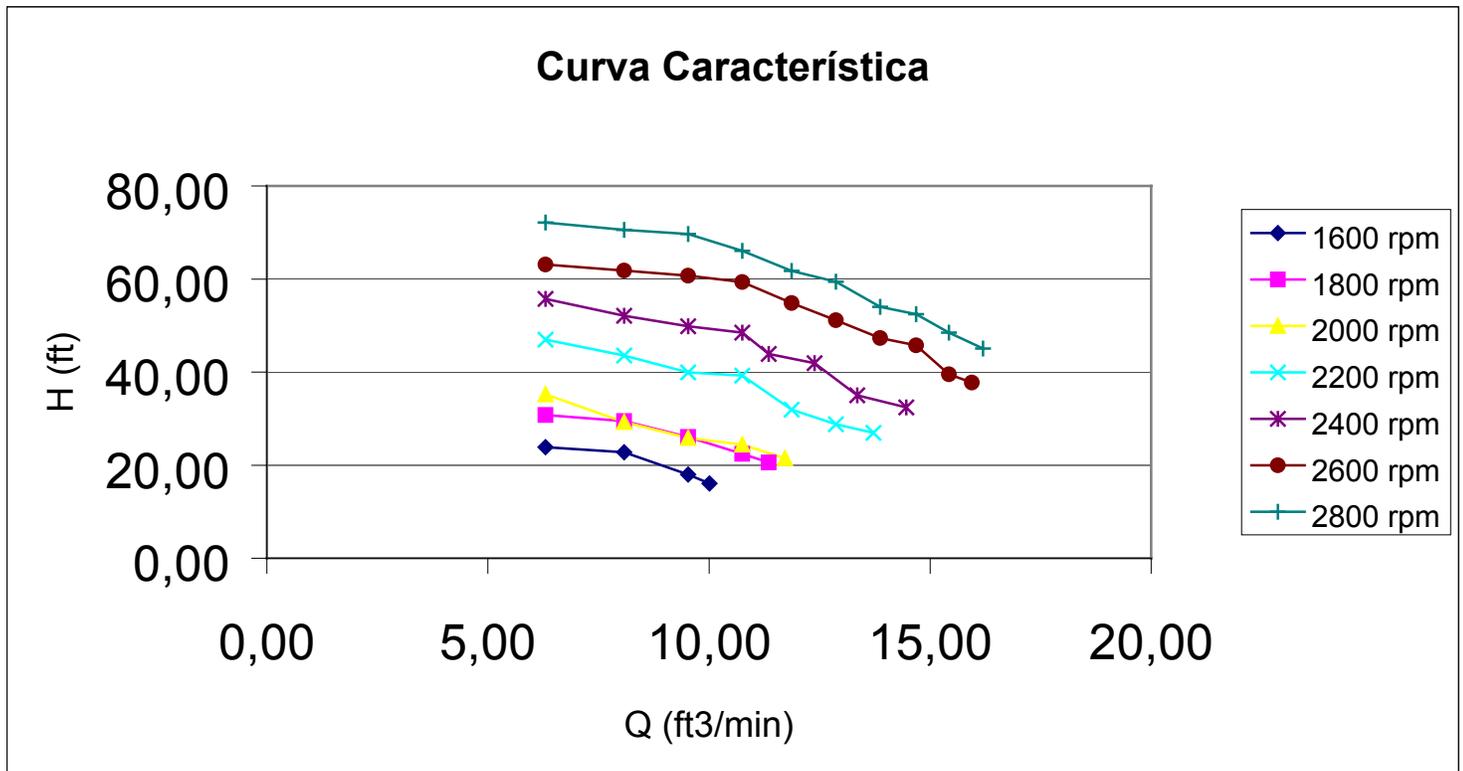
n = 1800 rpm

Pe (Pa)	Ps (Pa)	Q (m3/s)	H (m)	Nh (W)	Ne (W)	η (%)
6754,00	82740,00	2,98E-03	9,38	273,61	392,87	69,64
8104,80	75845,00	3,82E-03	8,98	335,81	508,42	66,05
10131,00	62055,00	4,50E-03	7,94	349,89	577,75	60,56
11481,80	48265,00	5,08E-03	6,83	339,79	670,20	50,70
12157,20	41370,00	5,36E-03	6,28	329,61	693,31	47,54

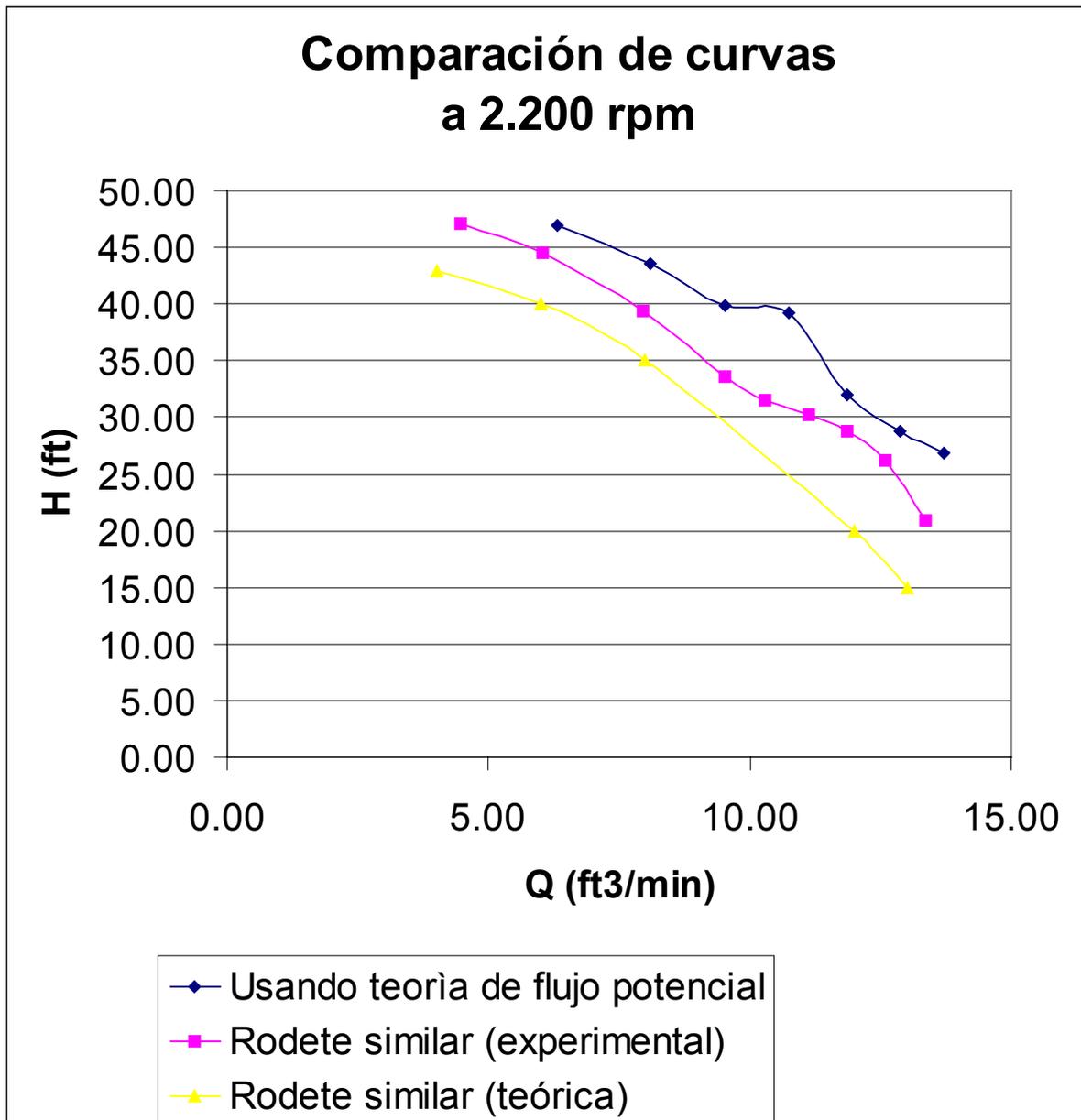
n = 1600 rpm

Pe (Pa)	Ps (Pa)	Q (m3/s)	H (m)	Nh (W)	Ne (W)	η (%)
6754,00	62055,00	2,98E-03	7,27	212,08	308,14	68,83
8780,20	55160,00	3,82E-03	6,94	259,47	410,85	63,15
13508,00	34475,00	4,50E-03	5,47	241,10	493,02	48,90
14183,40	27580,00	4,73E-03	4,90	226,85	493,02	46,01

La curva característica del nuevo rodete se muestran en la siguiente gráfica:



En la gráfica que se muestra a continuación, se hace una comparación de las curvas a 2.200 rpm obtenidas en el laboratorio: con el impulsor diseñado por el fabricante, el rotor diseñado por la teoría de flujo potencial, y la curva característica obtenida y entregada por el fabricante. Se puede observar que la curva obtenida con el rotor calculado por la teoría de flujo potencial, es definitivamente mayor que la del otro rodete:



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

En cuanto al control numérico como medio para fabricar rodetes, se puede decir que, no es lo más adecuado para la producción en grandes cantidades de ellos, ya que el tiempo de fabricación es muy alto y por lo tanto no sería rentable como medio habitual de producción. Sin embargo, es una buena opción para la fabricación de prototipos, como es el caso de este trabajo, en el que se diseña un rodete y luego se fabrica para comprobar su eficiencia y cualquier otra característica imaginable. De esta forma puede ser de gran utilidad y ayuda en la investigación de perfiles en turbomáquinas y otras ciencias, para un limitado pero amplio espectro de impulsores. Limitado porque para perfiles mixtos, por ejemplo, las fresas no son las máquinas herramientas adecuadas. También es útil este proceso, el de la fresa por control numérico, para realizar el negativo que sirve para darle la forma al molde donde se hará después la fundición. Como se sabe, el método tradicional de producción de rodetes es a través de la fundición, pero para darle la forma al molde hace falta el negativo del molde que se introduce en el yeso por ejemplo, para que al sacarlo quede la cavidad donde se vacía el metal del que se hará el rodete.

En cuanto a la teoría de flujo potencial para darle la forma al álabe, se demostró que efectivamente, como se había planteado, al interceptar una fuente con un vórtice libre queda una línea en forma de espiral que sirve para fijar la dirección de la trayectoria relativa del fluido con respecto al rodete, para que el flujo sea suave, sin turbulencias.

Debido a que se realizaron los cálculos para un fluido ideal, por buena y efectiva que sea la teoría de flujo potencial, no considera las pérdidas por roce por lo que era de esperar, que la eficiencia y las presiones fueran inferiores a los del rodete calculado posiblemente según los medios tradicionales, sin embargo, estos fueron superiores. Peculiaridad que confirma aún más la vigencia de la teoría de flujo potencial en el desarrollo de perfiles de bombas centrífugas.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Siempre se dice que la tecnología avanza a grandes velocidades. Actualmente, no se queda atrás la tecnología de la producción, específicamente la de las maquinas herramientas y su interacción con las tecnologías CAD, CAM y CAE. A la hora de usar el control numérico para la fabricación de rodetes y en general, el uso de los diferentes programas CAM que hay en el mercado pueden facilitar enormemente el trabajo de tener que realizar un código línea por línea para fabricar el rodete, aumentando el tiempo de trabajo, limitando la precisión y arriesgándose a cometer errores y por lo tanto, se evitaría el tener que hacer modelos de pruebas en materiales más baratos.

A la hora de realizar ensayos en un banco de pruebas, los instrumentos de medición juegan un papel muy importante, ya que depende de ellos la veracidad y precisión de las medidas. Aunque los resultados obtenidos fueron aceptables y aparentemente correctos, con mejores y más modernos instrumentos, como por ejemplo un sistema de adquisición de datos, se hubiera podido obtener mejores curvas y eficiencias más precisas.

Es recomendable hacer pruebas con otros álabes de diferentes perfiles, para comparar la influencia de las variaciones en las diferentes curvas, o usar la misma curva pero con diferentes exponentes, calculando la circulación de otras formas o usando diferentes rugosidades en el acabado, y conocer así su influencia en los resultados para no atribuírselos a la teoría de flujo potencial.

Finalmente como interrelación entre diferentes departamentos de la Escuela, es una experiencia interesante que puede y debe dar mayores frutos en el futuro. Las posibilidades que se tienen de tener equipos y diseños del departamento de Tecnología a disposición de otros departamentos, entre otras cosas, es una ventaja que se puede explotar mejor para aumentar la capacidad de investigación que debe tener la Universidad.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Casillas A. L. *Máquinas cálculos de taller* (32^a ed.).
España: Máquinas. (1982).
- (2) Cherkasski, V. M. *Bombas Ventiladores Compresores*.
Moscú: Editorial MIR. (1986).
- (3) Mikell, G. *Fundamentos de Manufactura Moderna*.
México: Prentice Hall. (1997).
- (4) Potter, M. Y Wiggert, D. *Mecánica de Fluidos*. (2^a ed.).
México: Prentice Hall. (1998).
- (5) Roca Vila, R. *Introducción a la Mecánica de los Fluidos*.
Mexico: Editorial Limusa. (1980).
- (6) Shames, I. *Mecánica de Fluidos*. (3^a ed.). Colombia: Mc Graw Hill. (1995).
- (7) Vennard, J. y Street, R. *Elementos de Mecánica de Fluidos*.
México: Continental. (1983).

ANEXOS

Anexo A

Tablas de Datos y Resultados (Sistema Inglés)

n = 2800 rpm

Pe (in Hg)	Ps (psi)	Δh (cm Hg)	m (Kg)	Q (ft ³ /min)	H (ft)
1,80	30,00	4,000	1,75	6,30	72,12
2,00	29,00	8,000	2,00	8,08	70,57
2,80	28,00	12,000	2,45	9,52	69,69
3,20	26,00	16,000	2,60	10,75	66,05
3,00	24,00	20,000	2,70	11,87	61,73
4,60	22,00	24,000	2,80	12,87	59,44
3,40	20,00	28,000	2,90	13,87	54,03
3,60	19,00	32,000	3,00	14,68	52,43
3,80	17,00	36,000	3,00	15,43	48,50
4,40	15,00	40,000	3,10	16,20	45,08

n = 2600 rpm

Pe (in Hg)	Ps (psi)	Δh (cm Hg)	m (Kg)	Q (ft ³ /min)	H (ft)
2,00	26,00	4,000	1,45	6,30	63,11
2,40	25,00	8,000	1,85	8,08	61,79
3,00	24,00	12,000	2,10	9,52	60,69
3,40	23,00	16,000	2,25	10,75	59,35
3,00	21,00	20,000	2,35	11,87	54,81
3,40	19,00	24,000	2,50	12,87	51,16
3,60	17,00	28,000	2,50	13,87	47,33
3,80	16,00	32,000	2,60	14,68	45,73
4,00	13,00	36,000	2,70	15,43	39,50
4,20	12,00	38,500	2,75	15,95	37,75

n = 2400 rpm

Pe (in Hg)	Ps (psi)	Δh (cm Hg)	m (Kg)	Q (ft ³ /min)	H (ft)
1,60	23,00	4,000	1,25	6,30	55,73
2,00	21,00	8,000	1,60	8,08	52,10
3,60	19,00	12,000	1,95	9,52	49,82
4,00	18,00	16,000	2,10	10,75	48,49
3,80	16,00	18,000	2,10	11,35	43,92
3,60	15,00	22,000	2,25	12,39	41,90
3,20	12,00	26,000	2,40	13,35	35,04
4,40	10,00	31,000	2,40	14,46	32,42

**n = 2200
rpm**

Pe (in Hg)	Ps (psi)	Δh (cm Hg)	m (Kg)	Q (ft ³ /min)	H (ft)
2,00	19,00	4,000	1,10	6,30	46,95
2,60	17,00	8,000	1,60	8,08	43,55
3,00	15,00	12,000	1,70	9,52	39,91
4,00	14,00	16,000	1,85	10,75	39,25
3,20	11,00	20,000	2,00	11,87	31,95
4,00	9,00	24,000	2,10	12,87	28,75
4,00	8,00	27,500	2,00	13,72	26,92

n = 2000 rpm

Pe (in Hg)	Ps (psi)	Δh (cm Hg)	m (Kg)	Q (ft ³ /min)	H (ft)
1,80	14,00	4,000	1,25	6,30	35,18
2,20	11,00	8,000	1,35	8,08	29,24
2,80	9,00	12,000	1,50	9,52	25,83
3,10	8,00	16,000	1,60	10,75	24,39
4,20	6,00	19,500	1,60	11,72	21,46

n = 1800 rpm

Pe (in Hg)	Ps (psi)	Δh (cm Hg)	m (Kg)	Q (ft ³ /min)	H (ft)
2,00	12,00	4,000	0,85	6,30	30,79
2,40	11,00	8,000	1,10	8,08	29,47
3,00	9,00	12,000	1,25	9,52	26,06
3,40	7,00	16,000	1,45	10,75	22,42
3,60	6,00	18,000	1,50	11,35	20,61

n = 1600 rpm

Pe (in Hg)	Ps (psi)	Δh (cm Hg)	m (Kg)	Q (ft ³ /min)	H (ft)
2,00	9,00	4,000	0,75	6,30	23,87
2,60	8,00	8,000	1,00	8,08	22,77
4,00	5,00	12,000	1,20	9,52	17,96
4,20	4,00	13,500	1,20	10,01	16,07

P 50

circ. Central

```
G28 X0. Y0. Z0;  
S1000;  
M3;  
#7=-2.;  
G00 X0. Y0. Z2.;  
WHILE (#7 GE -4) DO1;  
G01 Z#7. F100;  
G01 Y5.;  
G03 X0. Y-5. J0. R5.;  
G03 X0. Y5. J0. R5.;  
G01 Y10.;  
G03 X0. Y-10. J0. R10.;  
G03 X0. Y10. J0. R10.;  
G01 Y15.;  
G03 X0. Y-15. J0. R15.;  
G03 X0. Y15. J0. R15.;  
G01 Y17.8;  
G03 X0. Y-17.8. J0. R17.8;  
G03 X0. Y17.8 J0. R17.8;  
G00 Z2.;  
G00 X0. Y0.;  
#7 = #7-2.;  
END 1;
```

circ. Exterior

```
#Z = -2.;  
G00 X0. Y66.5;  
WHILE (#7 GE -4) DO 1;  
G01 Z#7;  
G03 X0. Y-66.5 J0. R66.5;  
G03 X0. Y66.5 J0. R66.5;  
#7=#7-2;  
END 1;  
G00 Z2.;
```

álabes

```
G65 P51;  
G68 X0. Y0. R60.;  
G65 P51;  
G68 X0. Y0. R120.;  
G65 P51;  
G68 X0. Y0. R180.;  
G65 P51;  
G68 X0. Y0. R240.;  
G65 P51;  
G68 X0. Y0. R300.;  
G65 P51;  
G28 X0. Y0. Z0.;  
M30;  
%
```

Subrutina para cada álabe

P51

```

#7 = -2.;
WHILE ( #7 GE -4) DO 1;
G00 X-30.103 Y59.384 Z2.;
G01 Z#7;
exterior del álabe
G65 P52;
interior del álabe
G01 X15.289 Y-9.115;
G03 X17.734 Y1.536 J0. R17.8;
G65 P53;
G01 X-32.507 Y54.549;
G00 Z2.;

relleno
G00 X-22.36 Y62.352 Z2.;
G01 Z#7;
G02 X27.076 Y33.427 J-1.572 R64.062;
G02 X29.049 Y-2.849 J13.13 R43.696;
G01 X35.953 Y12.687;
G03 X-11.908 Y65.273 J10.729 R55.005;
G01 X5.369 Y65.811;
G01 X26.099 Y50.482;
G01 X35.155 Y33.187;
G01 X27.711 Y55.299;
G01 X16.885 Y63.412;
G00 Z2.;
#7=#7-2.;
END 1;
M99;
%
```

Curva interior

P52

ext del álabe

```

#4 = 8.304;
#5=69.64;
WHILE (#5 GE 19.265) DO 2;
#6 = 0.511*#4;
#5 = EXP [#6];
#8=#4*180/3.14159267;
#1 = #5 *cos[#8]+1.985;
#2 = #5*sin[#8] -2.424;
G01 X#1 Y#2 F200;
#4=#4-0.05;
END 2;
M99;
%
```

Curva exterior

P53

int del álabe

```

#4 = 6.049;
WHILE (#5 LE 52.581) DO 2;
#6 = 0.48*#4;
#5 = EXP [#6];
#8=#4*180/3.14159267;
#1 = #5 *cos[#8]-2.977;
#2 = #5*sin[#8] +1.985;
G01 X#1 Y#2 F200;
#4=#4+0.1
END 2;
M99;
%
```

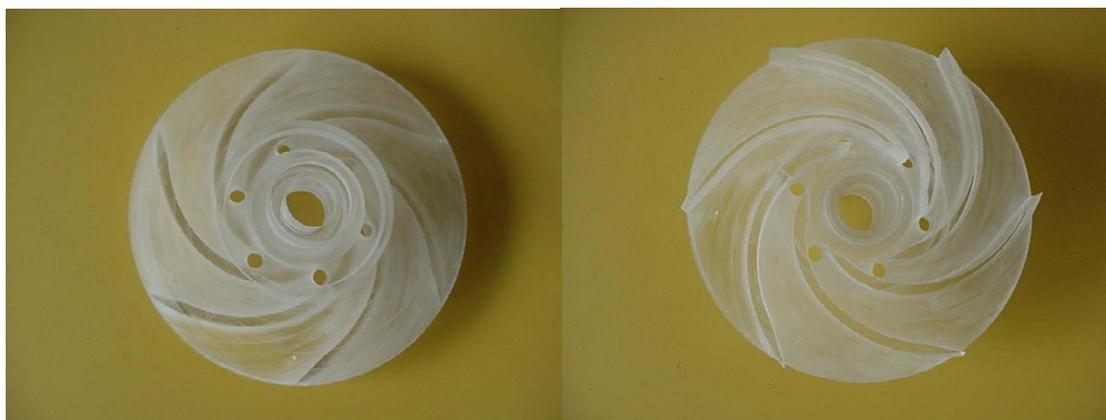
Anexo C

Secuencia de pasos en la fabricación del rodete.

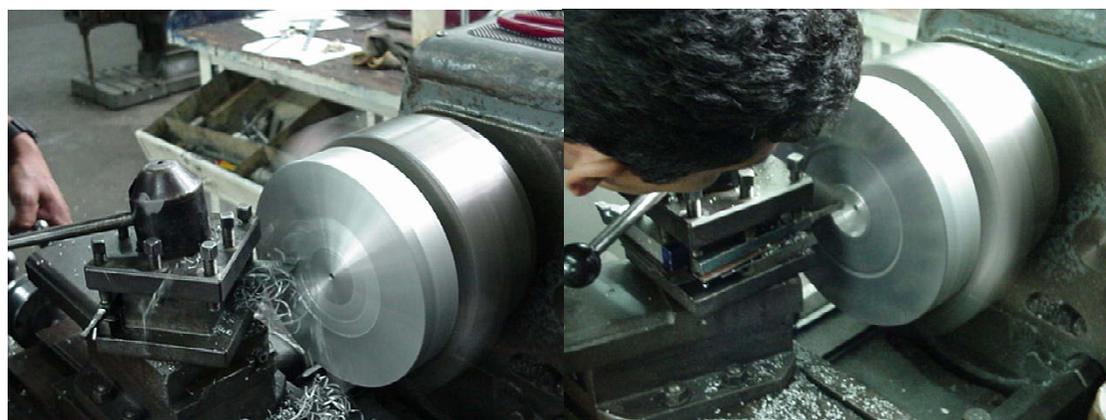
Prueba en acrílico



Acabado en acrílico



Torneado en Aluminio



Acabado después de torneear



Fresado en Control Numérico



Acabado de la parte delantera



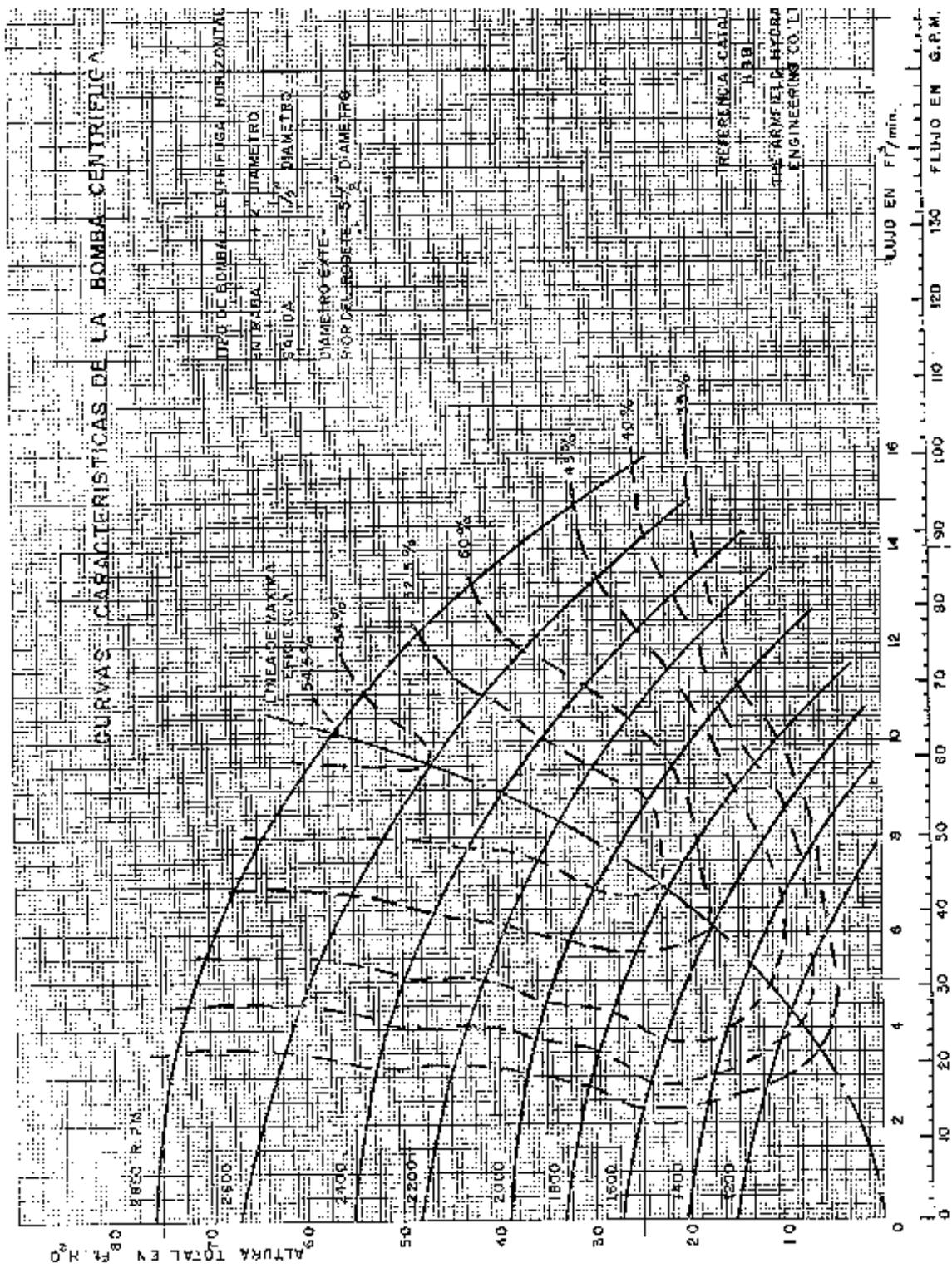
Fresado de la parte trasera



Parte trasera ya despegada



Anexo D



Anexo E

Curva de calibración de la placa orificio

