



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 339 553**

51 Int. Cl.:
F04D 29/04 (2006.01)
A61M 1/10 (2006.01)
F04D 13/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **04740570 .9**
96 Fecha de presentación : **02.07.2004**
97 Número de publicación de la solicitud: **1642033**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **05.04.2006**

54 Título: **Bomba centrífuga.**

30 Prioridad: **04.07.2003 DE 103 30 434**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
21.05.2010

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
21.05.2010

73 Titular/es: **Jostra AG.**
Hechinger Strasse 38
72145 Hirrlingen, DE

72 Inventor/es: **Mendler, Nikolaus**

74 Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Bomba centrífuga.

5 La invención se refiere a una bomba centrífuga, en especial para sangre en dispositivos de sustitución del corazón o de asistencia ventricular, según el preámbulo de la reivindicación 1. En especial, la invención se refiere a una bomba rotativa accionada eléctricamente del tipo radial/centrífugo, para la implantación permanente en enfermos con insuficiencia terminal del corazón, que necesitan una asistencia mecánica de su circulación sanguínea.

10 En las bombas de sangre, en especial en bomba de sangre o en bombas para otros líquidos sensibles, hay que ajustar exigencias especiales:

1. Alto rendimiento hidráulico, para mantener bajo el calor perdido cedido a la sangre/el líquido, y pequeña la acumulación de energía.
- 15 2. Rotación del rotor completamente sin contacto, dentro de una carcasa de la bomba, obturada herméticamente, con lo que se excluye cualquier desgaste, abrasión y generación local de calor por rozamiento mecánico.
- 20 3. Evitación de turbulencias permanentes y de aguas muertas, así como tiempos mínimos de permanencia de la sangre/del líquido en la bomba, para evitar deterioros en el líquido, o la activación de la coagulación de la sangre.
4. En las bombas de sangre, minimización de los esfuerzos cortantes que dañan las células, a los que está expuesta la sangre al pasar por la bomba.
- 25 5. Protección contra errores por eliminación de regulaciones complejas de posición del rotor, basadas en sensores, para al mismo tiempo consumo reducido de energía.
- 30 6. Eliminación de un motor de accionamiento con árbol con rodamientos, que está expuesto a un desgaste.

Las bombas de sangre del tipo constructivo convencional, en las que el accionamiento del rotor se lleva a cabo mediante un motor eléctrico con árbol con rodamientos, que atraviesa la carcasa de la bomba y está provisto con una junta del árbol, no son apropiadas para la implantación permanente. Carcasas obturadas herméticamente, a través de cuya pared se pone en rotación el rotor de la bomba mediante un acoplamiento magnético, eliminan ciertamente las fugas, pero siempre necesitan todavía un motor eléctrico externo. Además, el rotor de la bomba se tiene que guiar mediante ranuras bañadas por la sangre, las cuales se desgastan y desnaturalizan la albúmina de la sangre mediante calentamiento local, y pueden activar el sistema de coagulación, lo cual puede conducir a embolias por abrasión y coágulos.

40 Se puede conseguir una rotación totalmente sin contacto, del rotor de la bomba en la sangre, mediante apoyos magnéticos pasivos y activos, apoyos lisos hidrodinámicos, o una combinación de estos principios.

Cualquier planteamiento posible con respecto a esto, tiene que tener en cuenta el teorema de Earnshaw, según el cual no es posible mantener un cuerpo flotando en el espacio, en una posición estable, mediante campos magnéticos, eléctricos o gravitacionales, constantes. Cualquier posición supuesta de equilibrio es lábil, puesto que el cuerpo se encuentra aquí en un máximo de energía potencial. Por consiguiente se necesita en al menos un eje del espacio, una fuerza estabilizadora que actúe desde el exterior sobre el sistema. Esta tiene que ser tanto mayor cuanto más se aleje el cuerpo del punto del máximo de energía. Por el contrario, se necesitan pequeñas fuerzas antagonistas cuando el sistema se encuentre *a priori* en la proximidad del equilibrio lábil.

55 Rotores de bombas apoyados magnéticamente, con paletas abiertas, se describen en el documento US 6,227,817. Aquí se describe una combinación de apoyos magnéticos pasivos para la estabilización radial, y de levitación electromagnética axial, activa, basada en sensores. Junto a la costosa fabricación, esta solución exige una larga hendidura extendida entre rotor y carcasa, con irrigación tan sólo insuficiente, así como un alto consumo de energía para la estabilización axial que tiene que contrarrestar el elevado empuje hidráulico axial, que es producido por una corona móvil abierta.

60 Bombas de sangre con levitación magnética completa se describen en el documento EP 0819 330 B1 y en el EP 0 860 046 B1. Aquí el rotor de la bomba está realizado como rotor de un motor eléctrico síncrono excitado por un imán permanente. El par motor es producido por un campo electromagnético giratorio del estator, que actúa radialmente, asimismo los controles de posición del rotor en dirección radial. Para ello sirven devanados separados de control del estator, que mediante circuitos electrónicos de regulación, transforman señales de sensores de distancia, en fuerzas de centrado. Debido a los estatores situados exteriores para el accionamiento y a la regulación de la posición, esta bomba necesita relativamente mucho espacio de montaje. La estabilización de los otros tres grados de libertad en el espacio, no controlables activamente, se lleva a cabo mediante fuerzas magnéticas de reluctancia de actuación pasiva. Se desencadenan, además, problemas en las realizaciones con coronas móviles abiertas, por el alto empuje hidrodinámico axial que se presenta inevitablemente. Para remediarlo se proponen apoyos magnéticos adicionales, activos o pasivos,

así como medios auxiliares hidrodinámicos en forma de toberas, placas reflectoras, tubos de afluencia, resistencias a la fluencia y hendiduras de retención, que todos juntos elevan la complejidad del sistema, empeoran el rendimiento, crean zonas de aguas muertas, inducen grandes esfuerzos cortantes y, por tanto, son totalmente inapropiados para la realización de una bomba de sangre, en especial para la implantación permanente.

Bombas de sangre sin apoyos, con levitación magnética, con coronas móviles abiertas, se indican, además, en el documento US 6,071,093. No obstante, la transmisión del par motor se lleva a cabo aquí mediante un campo electromagnético giratorio del estator, que actúa axialmente. La posición axial del rotor y el ladeamiento del rotor en la carcasa, se estabiliza mediante actuadores por un retroacoplamiento electromagnético basado en sensores, al mismo tiempo apoyos magnéticos pasivos permanentes, se cuidan del centrado radial. La problemática de la inestabilidad axial de una corona móvil abierta, se resuelve -junto a un retroacoplamiento electromagnético mediante sensores y actuadores- mediante una compensación provocada en el fluido. Esta se basa en cada caso en la acción de una hendidura de choque colocada en el perímetro exterior del rotor, que con independencia de la posición axial del rotor, limita o libera el reflujo en el lado del rotor más alejado de las paletas. También en esta solución existe el peligro de grandes esfuerzos cortantes, y de la producción de zonas de aguas muertas en la cara posterior del rotor.

En el documento US 5,947,703 se describe asimismo una bomba centrífuga levitada electromagnéticamente. Aquí se lleva a cabo el accionamiento de una corona móvil abierta cubierta, mediante un acoplamiento giratorio frontal de imán permanente, que actúa axialmente por una sola cara, o mediante un campo giratorio del estator, cuyas fuerzas de atracción permiten arrancar el rotor de la bomba en la carcasa, cuando no se regule la posición axial del rotor mediante un retroacoplamiento electromagnético activo basado en sensores. Para el caso del fallo de esta regulación, se prevén apoyos mecánicos de emergencia en forma de rangas, apoyos lisos, apoyos puntuales y apoyos hidrodinámicos de empuje, que deben impedir una fijación del rotor de la bomba, que amenaza con la muerte. Común a estas propuestas es el desventajoso contacto de la pared entre rotor y carcasa, con las conocidas consecuencias del daño a la sangre.

El documento WO 01/42653 A1 describe una bomba centrífuga con regulación electromagnética activa de la posición del rotor de la bomba, en los seis grados de libertad en el espacio, registrando la posición, velocidad y aceleración del rotor, no mediante sensores, sino derivando de señales de corriente de los apoyos magnéticos activos. Esto condiciona desventajosamente una estructura mecánica extraordinariamente compleja del rotor y de múltiples estatores, así como una electrónica de regulación muy compleja con consumo adicional de energía, porque para la evitación de grandes fuerzas axiales desestabilizadoras, se tiene que utilizar un motor sin núcleo, que debido a su mal rendimiento, se calienta fuertemente.

Los citados inconvenientes del apoyo electromagnético activo del rotor de la bomba, fueron ocasión para una serie de invenciones en las que, mediante una estabilización hidrodinámica del rotor/impulsor, se debe de eliminar el complicado análisis de sensores y la electrónica.

Así por ejemplo, en el documento US 5,324,177 y en el WO 01/72351 A2 se utiliza un cojinete de apoyo hidrodinámico para la estabilización radial del rotor de un motor eléctrico de corriente continua, cuyo cojinete lleva el rotor abierto de la bomba. Aquí es desventajosa la larga extensión axial de la estrecha hendidura excéntrica del apoyo, en la que actúan grandes esfuerzos cortantes, y para su lixiviación son necesarias paletas auxiliares y un circuito de enjuague desde el lado de alta al de baja presión de la bomba. Esta disposición esconde los peligros conocidos de alto cizallamiento e insuficiente evacuación de calor, que conducen a una traumatización de la sangre.

Estos inconvenientes se evitan en parte en el documento US 6,227,797. Aquí, en una carcasa de simetría de rotación, el rotor de la bomba está realizado de manera que sus superficies forman por todos los lados frente a la carcasa, superficies activas inclinadas en la dirección del movimiento relativo, en forma de hendiduras de forma de cuña. Así pues el rotor de la bomba y la carcasa forman un apoyo liso tridimensional dinámico, como es corriente de todas formas en la construcción mecánica. La película fluida de base, compuesta de sangre, que sirve como agente lubricante de estas superficies en cuña, cubre una gran superficie, y está sometida a un gran esfuerzo cortante, en especial en la periferia del rotor, para el que se indican valores típicos de 220 N/m². Este esfuerzo cortante está situado pues en una gama en la que es de temer por cizallamiento, un deterioro de las células sanguíneas, en especial de los trombocitos. Otros inconvenientes de esta solución consisten en que el rotor abierto de la bomba está rodeado por todos los lados frente a la carcasa, de hendiduras estrechas en las que reina un alto rozamiento viscoso. La necesidad de la subdivisión del rotor en bloques segmentales para hacer posible el paso de la sangre desde la entrada a la salida de la bomba, se opone a una optimización de la eficacia hidráulica de la bomba. Por consiguiente los rendimientos hidráulicos comunicados con un máximo del 11%, son prohibitivamente bajos para una bomba de sangre que se pueda implantar con un consumo de energía bajo que valga la pena. La larga extensión axial del rotor provoca, además, un alto empuje hidrodinámico radial sobre el rotor, que puede hacer necesario un canal espiral dividido, con lo que se favorece la formación de trombos. Además, la carcasa es de fabricación complicada. Tampoco la forma de realización representada en la figura 20, del rotor cubierto de una bomba, con superficie estructurada por sectores en forma de cuña, evita los inconvenientes citados, tanto más que no es evidente de qué manera debe de circular la sangre a través de un rotor semejante.

Una solución muy parecida de una estabilización axial hidrodinámica del rotor abierto de una bomba, mediante superficies flotantes en cuña inclinadas en la dirección de rotación, la describe el documento WO 00/32256. También aquí los inconvenientes son un deterioro de la sangre y un complicado diseño de la carcasa. Además, el centrado radial

del rotor se lleva a cabo aquí, no mediante fuerzas hidrodinámicas, sino mediante fuerzas magnéticas permanentes de reluctancia de un acoplamiento giratorio frontal, o de un motor electromagnético de accionamiento.

El documento WO 99/01663 hace público el rotor levitado hidráulicamente de una bomba, que debe de flotar mediante el empuje de Arquímedes, puesto que posee la misma densidad que el fluido a transportar. Esta bomba se tiene que realizar con dos entradas o la afluencia se tiene que desviar 180° dentro de la bomba, lo cual tiene como consecuencia grandes superficies interiores humedecidas, así como una estabilidad hidrodinámica incierta.

El documento 01/70300 propone para la estabilización hidrodinámica, un rotor de forma cónica con aberturas de forma de rendija para el paso de la corriente, y superficies de guía, mediante las cuales se produce una corriente fluida dirigida contra la carcasa, y que debe de actuar estabilizando. En tanto que esto no sea suficiente, está previsto un apoyo magnético activo para la estabilización radial, lo cual quiere decir un gasto electrónico adicional. En una serie de patentes (WO 00/32257, WO 00/64508, EP 1 027 898 A1, US 5,840,070) se utilizan combinaciones de los más diferentes principios, para la estabilización del rotor de la bomba: Ranguas de bolas, apoyos radiales pasivos de imán permanente, apoyos axiales electromagnéticos activos, basados en sensores, apoyos hidrodinámicos de superficies en cuña, tanto con acción radial como también axial, completados mediante estructuras auxiliares, como perfilados del rotor y/o de la carcasa, mediante apoyos, nervios, arandelas de cierre, canales y otros.

Hay que destacar que siempre se tienen que utilizar al menos tres principios en combinación, para garantizar una rotación sin contacto, del rodete en la bomba, y que en los apoyos de superficies en cuña, para las anchuras indicadas de hendidura de unos 0,013 a 0,038 mm, se presentan esfuerzos cortantes (de más de 600 N/m²), que con gran probabilidad, son dañinos para la sangre.

Por el documento US 5,158,440 se ha dado a conocer una bomba centrífuga con motor integrado, que presenta medios para la compensación axial hidrodinámica, para un rotor apoyado en la carcasa sin contacto. Estos medios contienen un anillo que está previsto en la hendidura entre rotor y estator, para reducir el flujo sanguíneo. En otras formas de realización están previstas en la carcasa disposiciones de corona de entrada, que reducen el flujo sanguíneo en esta hendidura, a una cantidad pequeña.

Además, se conoce por el documento US 5,470,208 una bomba hidráulica con rodete suspendido magnéticamente, presentando una cámara de bombeo, una abertura de entrada y una abertura de salida. En la cámara de bombeo está dispuesto un rodete giratorio. Al rodete y a la carcasa están coordinados dispositivos polarizados electromagnéticos, que provocan el accionamiento del rodete. El rodete se estabiliza aquí mediante fuerzas magnéticas elevadoras, conteniendo un primer dispositivo generador de fuerza magnética, componentes diamagnéticos.

Una valoración crítica del expuesto estado actual de la técnica, da como resultado que la rotación sin contacto del rotor de una bomba centrífuga en la carcasa, se consigue o bien mediante un alto gasto en sistema sensorial y regulación electromagnética, o bien a costa de una alta carga hidrodinámica de la sangre, por esfuerzos cortantes dañinos.

La misión de la presente invención se basa en crear una bomba centrífuga con rotor sin apoyos, en la que el rotor se pueda estabilizar en forma sencilla y respetuosa con el líquido, en dirección axial y radial, y que presente un alto rendimiento.

La misión se resuelve con una bomba centrífuga con las notas características de la reivindicación 1. Las reivindicaciones secundarias proporcionan perfeccionamientos ventajosos.

La estabilización axial del rotor de la bomba se lleva a cabo hidrodinámicamente por el líquido transportado por el rotor. Para ello, la corriente de líquido dirigida hacia dentro, que aparece por causa de la diferencia de presión reinante entre la zona exterior y la zona radial interior de la carcasa de la bomba, puede producir entre las superficies del rotor y la carcasa, las fuerzas hidrodinámicas para la estabilización axial del rotor. El rotor está configurado simétrico respecto a su plano medio, y presenta una cubierta superior e inferior. De este modo se producen condiciones de circulación definidas para la corriente de líquido de fuga, dirigida desde la periferia hacia dentro, y que se puede utilizar para la estabilización axial del rotor.

Así pues según la invención, se aprovecha la caída de presión debida a la corriente en el espacio lateral del rotor de la bomba, simétrico respecto al eje, y cubierto por los dos lados: La presión inicial generada por la bomba en la periferia del rotor, se reduce a la presión de entrada de la bomba, mediante la corriente de reflujo hacia el centro, a través de los espacios laterales del rotor. Haciendo que el rotor y/o la carcasa de la bomba, estén conformados de tal manera que las distancias axiales entre la cubierta superior e inferior del rotor y la pared superior e inferior de la carcasa, sean menores en la zona radial interior del rotor, que en la zona radial exterior, se genera en la zona central de las cubiertas, un efecto de estrangulamiento en la circulación del líquido, de fuera hacia dentro. La hendidura de choque provoca la mayor parte de la pérdida de presión, con lo que en la zona periférica de las cubiertas se conserva una presión mayor y, por tanto, se ejerce una componente de fuerza sobre toda la cubierta, que se opone a un estrechamiento de la hendidura. Esta fuerza es tanto mayor cuanto más se estreche la hendidura en la zona central de la cubierta.

Así pues, si se mueve el rotor hacia arriba, se estrecha la hendidura superior. El aumento de la fuerza, así provocado, en el líquido, presiona entonces el rotor de nuevo hacia abajo. A la inversa, si el líquido presiona de nuevo hacia

arriba el rotor, este se debe de mover desde el centro hacia abajo. Así se llega automáticamente a una estabilización hidrodinámica de la posición axial del rotor de la bomba. La hendidura de choque se estrecha en la dirección de la desviación, con la desviación axial del rotor, y se ensancha en el lado contrario. Esto da lugar en el lado de la otra hendidura respectiva, a un incremento relativo de la corriente de reflujo dirigida radialmente hacia dentro y, por tanto, a una caída hidrodinámica asimétrica de presión. Los espacios laterales del rotor forman aquí toberas conectadas en paralelo, cuya diferencia de presión es eficaz sobre toda la superficie de las dos cubiertas cerradas del rotor y, por tanto, produce una fuerza antagonista de retorno que estabiliza axialmente, y actúa simétricamente respecto a la posición de reposo del rotor. Por eso el rotor está estabilizado contra una desviación en el eje z.

Lo mismo es válido para el ladeamiento del rotor, o sea para el movimiento de rotación alrededor de los ejes x e y. También aquí se estrecha y ensancha en sentido contrario, cada una de las hendiduras de choque con asimetría de eje, con la consecuencia de una fuerza antagonista de retorno en la dirección de una posición estable del rotor en la carcasa. Estos efectos no se habían utilizado hasta ahora en bombas sin apoyos. Una condición previa esencial para la minimización deseable de la energía necesaria de estabilización, es la simetría axial según la invención, del rotor de la bomba y de los espacios laterales del rotor.

Las distancias entre la cubierta superior e inferior del rotor, y las caras superior e inferior de la carcasa, se reducen aquí de forma continua.

La estabilización radial del rotor se puede llevar a cabo de forma puramente pasiva, mediante fuerzas de reluctancia. Aquí se debería de minimizar el empuje radial hidrodinámico que desplaza el rotor del centro del movimiento de rotación. Para ello, de preferencia se mantiene mínima el área proyectada por el rotor en el plano x-y/z, como superficie activa de fuerzas de compresión que desestabilizan radialmente. Se determina únicamente por el espesor de las cubiertas del rotor. El rotor se puede fabricar de preferencia, completamente de material paramagnético y/o ferromagnético, y estar magnetizado permanentemente. Entonces no es necesario encapsulado ninguno de imanes permanente separados, que contribuye al aumento del área radial proyectada. Otra medida contra la inestabilidad radial, consiste en prever una hendidura anular circular con simetría de rotación, que separa los espacios laterales del rotor, de un canal espiral que evacua tangencialmente el caudal suministrado. De este modo se produce una resistencia constante a la fluencia frente al fluido que sale del rotor y, por tanto, una fuerza radial de compresión que actúa uniformemente sobre la periferia del rotor. La tercera medida contra la inestabilidad radial consiste en una estructuración apropiada del canal espiral que evacua la corriente, con lo que se evitan fuerzas radiales de compresión que desestabilizan, en la zona de la lengüeta.

El accionamiento de la bomba se lleva a cabo de preferencia, como motor eléctrico síncrono excitado con imanes permanentes, cuyo rotor se forma por el rotor de la bomba, que se encuentra entre dos estatores simétricos con gran entrehierro. Los estatores pueden estar girados uno respecto a otro, del mismo modo que las zonas magnéticas permanentes del rotor, repartidas en dos planos. Las superposiciones de los polos y la topología del flujo electromagnético, se pueden optimizar partiendo de que para la masa mínima de material magnético existe un alto rendimiento para baja ondulación, es decir, gran constancia del par motor y baja constancia axial del sistema magnético, con lo que se hace posible la levitación hidrodinámica del rotor. Al mismo tiempo se recaban las fuerzas magnéticas de reluctancia entre estatores y rotor, para su centrado radial.

La bomba centrífuga según la invención, es apropiada, en especial, para el empleo como bomba de sangre, e incluso para la implantación en el cuerpo humano, puesto que sólo necesita poco espacio y carece absolutamente de mantenimiento. La bomba se puede emplear como bomba de sangre para la asistencia de la actividad cardíaca de un paciente, o en conexión con un corazón pulmón artificial. Por lo demás, la bomba se puede emplear para el transporte de otros líquidos, en especial de líquidos agresivos y peligrosos, o líquidos sensibles en los que se deba de evitar un contacto con el medio ambiente. Los componentes de la bomba que se ponen en contacto con el líquido, pueden estar provistos con un recubrimiento adaptado al líquido.

A continuación se describen en detalle y se explican en su funcionamiento de la mano de dibujos, ejemplos preferentes de realización de las bombas centrífugas según la invención, en especial para el empleo como bombas de sangre de implante permanente para la asistencia cardíaca.

Se muestran:

Figura 1 Un corte transversal de un ejemplo de realización de una bomba centrífuga según la invención.

Figura 2a Una vista en perspectiva del rotor de la bomba de la figura 1, con la cubierta superior parcialmente retirada.

Figura 2b Un corte transversal esquemático del rotor y de la carcasa de la figura 1 para la ilustración de las dimensiones geométricas características.

Figuras 3a, 3b Una representación esquemática de las condiciones de circulación a través del rotor de una bomba centrífuga, con anchura constante, y decreciente radialmente hacia dentro, del espacio lateral del rotor.

ES 2 339 553 T3

Figura 4 Diagramas con el curso radial de las presiones en los espacios laterales del rotor

a) para una posición axial centrada del rotor en la carcasa,

b) para un corrimiento axial del rotor hacia la entrada de la carcasa.

Figura 5 Diagrama sobre el curso de la fuerza antagonista de retorno, en función de la desviación axial desde la posición centrada del rotor, para dos hendiduras de choque de diferente anchura.

Figura 6 Diagramas con el curso radial de las presiones en los espacios laterales del rotor, en caso de ladeamiento del rotor en la carcasa.

Figuras 7a, 7b, 7c Cortes transversales de distintas formas de realización de la hendidura de choque en bombas centrífugas según la invención.

Figura 8 Curvas de estrangulamiento de la bomba según la invención, para diferentes números de revoluciones.

Figura 9 Diagramas con los rendimientos hidráulicos en función del caudal, para diferentes números de revoluciones.

La bomba 10 centrífuga de la figura 1, presenta una carcasa 11 de la bomba con una entrada 12 y una salida 13 tangencial para la sangre u otro líquido. Por lo demás, la carcasa 11 de la bomba, está cerrada hermética a los líquidos y a los gases. En el interior de la carcasa 11 de la bomba está dispuesto, un rotor 14 de la bomba, sin apoyos y giratorio. Con ayuda del rotor 14 de la bomba, la sangre que afluye por la abertura 12, es transportada radialmente hacia fuera y a la salida 13. Para ello el rotor de la bomba presenta paletas 15 transportadoras. Las paletas 15 transportadoras están cubiertas por una cubierta 16 superior hacia arriba, y por una cubierta 17 inferior hacia abajo.

El rotor 14 de la bomba presenta al menos en su zona periférica, zonas magnetizadas permanentemente. No obstante, en el ejemplo representado está fabricado totalmente de un material para y/o ferromagnético. Forma pues al mismo tiempo el rotor de un motor de accionamiento que presenta, junto al rotor 14, dos estatores 18, 19 de forma anular que presentan una multitud de sectores 20, 21 distribuidos uniformemente que sobresalen en la dirección del rotor 14, y que en una forma preferente de realización están rodeados por una bobina 22, 23. No obstante, cabe imaginar también disposiciones de bobinas en las que varios de los sectores 20, 21 sobresalientes axialmente estén abrazados por una bobina 22, 23. Los dos estatores 18, 19 están dispuestos fuera de la carcasa, de manera que el accionamiento del rotor 14 de la bomba se lleva a cabo sin contacto. De este modo en la carcasa 11 tan sólo se generan cargas mínimas para la sangre a transportar. El rotor 14 y la carcasa 11 están revestidos con un material compatible con la sangre, de preferencia allí donde se ponen en contacto con la sangre.

Los estatores 18, 19 producen un flujo magnético rotativo en el espacio intermedio entre los sectores 20, 21 y el rotor 14. Al mismo tiempo los dos estatores se cuidan de un centrado radial del rotor 14 en la carcasa 11. El centrado radial se lleva a cabo aquí de forma puramente pasiva mediante fuerzas de reluctancia.

A continuación se muestra de qué forma se lleva a cabo en la bomba 10 la estabilización del rotor 14 de la bomba, contra el desplazamiento en la carcasa 11 en dirección axial, por las fuerzas de compresión generadas hidrodinámicamente.

El rotor 14 presenta cubiertas 16, 17 que tienen simetría total de eje, son planas, y rodean paletas 15, cuyo número y forma se puede optimizar según las exigencias reotécnicas (figura 2a). En las formas de realización aquí representadas, el número de paletas asciende a seis. La sangre entra del lado de succión en el rotor 14, por una abertura 126. Una segunda abertura 127 de igual tamaño en la cubierta inferior, sirve para la compensación de presión entre los espacios 26, 27 laterales del rotor, de manera que con independencia de las condiciones de presión y circulación allí reinantes, reine siempre la misma presión en los bordes de las aberturas 126, 127 vueltas hacia el centro (figura 1). La sangre abandona el rotor 14 después de pasar los canales de las paletas, a la periferia exterior, a la hendidura 124 anular de evacuación, y finalmente al canal 24 espiral, bajo alta presión.

Los espacios 26, 27 laterales del rotor en la figura 2b, se limitan por las cubiertas 16, 17 del rotor 14, y por las paredes de la carcasa 11. En una bomba centrífuga con rotor 14 de la bomba cubierto, dominan en estos espacios 26, 27 laterales del rotor, dos direcciones de circulación: La capa límite que se adhiere directamente a las cubiertas 16, 17 rotativas, se mueve hacia fuera por la fuerza centrífuga, mientras la presión establecida cerca de la carcasa 11 estacionaria y en el volumen principal del espacio 26, 27 lateral, produce una corriente 28 inversa dirigida hacia dentro, que se designa como corriente de cortocircuito o de fuga, que disminuye el rendimiento hidráulico. En la construcción técnica de bombas, para la reducción de estas fugas, sirven entre otras cosas, juntas laberínticas próximas al eje. Para bombas de sangre se prohíbe su aplicación, a causa de la formación de altos esfuerzos cortantes y aguas muertas de difícil enjuague.

Las denominaciones utilizadas en lo sucesivo para la descripción de la geometría del rotor de la bomba y de la carcasa, se explican en la figura 2b. Significan:

R Radio de la cubierta del rotor,

ES 2 339 553 T3

	r_1	Radio de las aberturas de afluencia en el rotor,
	r_2	Radio en la entrada en la hendidura de choque,
5	r_3	Radio al comienzo de los sectores magnéticos permanentes de las cubiertas,
	r_4	Radio interior de la carcasa,
	r_5	Radio exterior de la hendidura anular circular,
10	H	Anchura del espacio lateral del rotor en la periferia del rotor,
	h	Anchura axial de la hendidura de choque
15	h_1	Altura de la paleta a la entrada del rotor,
	h_2	Altura de la paleta en la periferia del rotor,
	h_3	Altura de la hendidura anular circular,
20	l	Longitud radial de la hendidura de choque (r_2-r_1),
	d	Espesor de las cubiertas.

25 En las bombas según la invención, la inevitable pérdida de energía de la corriente 28 radial inversa en el espacio 26, 27 lateral del rotor, se utiliza para la producción de una fuerza hidrodinámica antagonista de retorno contra el desplazamiento axial del rotor, debido a una estructura geométrica de nuevo estilo, de este espacio 26, 27 lateral, como está ilustrado en la figura 3.

30 En la figura 3a está representado un espacio lateral del rotor, con anchura axial constante a lo largo del radio de la cubierta 16', 17'. En la posición media del rotor, se producen iguales fuerzas de la corriente en los dos espacios laterales del rotor porque en la periferia y en el centro del rotor son iguales las presiones y, por tanto, sobre las cubiertas actúan distribuciones simétricas de presión. Si el rotor en la figura 3 se desvía axialmente hacia un lado, la corriente se acelera en el espacio lateral más estrecho del rotor, y en consecuencia decrece allí la presión sobre la cubierta, y al contrario, crece en el espacio lateral opuesto ensanchado del rotor, para la corriente allí retardada, siguiendo la ley de Bernouilli y en analogía a la conocida "paradoja hidrodinámica". El movimiento de desviación se refuerza pues hasta la llegada del rotor a la pared de la carcasa.

35 La estructura geométrica según la invención de los espacios 26, 27 laterales del rotor, invierte este efecto (figura 3b): Cada una de las hendiduras entre las cubiertas 16, 17 y la carcasa 11, presenta en sus zonas radiales interiores un estrechamiento axial fuerte -con relación a la hendidura restante- de extensión radial corta, de manera que directamente delante de la abertura de entrada del rotor, está configurada a los dos lados una hendidura 116, 117 simétrica de choque (figura 1). La corriente 28 de fuga encuentra aquí una gran resistencia terminal en serie. En la posición centrada del rotor, reina la igualdad de presión en el espacio lateral superior e inferior del rotor. En caso de desviación axial del rotor, la participación de la hendidura de choque en la hendidura que se hace más estrecha, se hace siempre cada vez mayor en la resistencia global de la hendidura. De este modo, la presión de transporte en la periferia del rotor permanece hacia dentro en el espacio lateral estrechado del rotor, aproximadamente hasta cerca de la hendidura de choque, y no se debilita con rapidez hasta allí, mediante la resistencia terminal del estrangulamiento. En la hendidura opuesta que se hace mayor, la influencia del punto de estrangulamiento se hará siempre menor. La presión se debilita radialmente hacia dentro de forma uniforme, comenzando en la periferia, a todo lo largo de la hendidura.

40 La diferencia resultante de las fuerzas de compresión sobre las cubiertas cerradas, en caso de cualquier movimiento axial de adaptación del rotor de su posición media, provoca por tanto una fuerza proporcional a la desviación, que vuelve a poner en su lugar al rotor. Se comprende que incluso en la estrecha hendidura 116 de choque de forma anular, plano paralela axialmente a la carcasa, es también válida la arriba citada ley de la corriente, según la cual la corriente 45 acelerada en la hendidura más estrecha, desestabilizaría el rotor en la dirección del estrechamiento. No obstante, la superficie activa de las fuerzas de compresión es aquí tan sólo una pequeña fracción de la superficie de las cubiertas, de manera que predominan claramente las fuerzas axiales de retorno.

50 Mediciones en un rotor ($R = 20$ mm) en una bomba según la figura 1, para un corrimiento axial del rotor, han producido cursos radiales de presión en los espacios laterales del rotor, que están representados en las figuras 4a, b. Cualquier corrimiento axial (figura 4b) da lugar a una asimetría del curso radial del descenso de presión en el espacio lateral del rotor. La diferencia resultante de presión se hace activa sobre la superficie muy predominante de las cubiertas, como fuerza de reposición, que posiciona el rotor axialmente en el centro.

60 Los totales de las fuerzas de reposición que resultan de las diferencias de presión de la figura 4, están representados en la figura 5. Se desea la mayor constancia posible de dF/dz , en toda la zona de la desviación en dirección z (figura 2a). Se reconoce que una hendidura estrecha de choque ($h = 0,2$ mm), cumple esta exigencia linealmente y más empinada

ES 2 339 553 T3

que otra hendidura ($h = 0,3 \text{ mm}$), alcanzándose en los dos casos para la desviación máxima, fuerzas de reposición de unos $\pm 5 \text{ N}$, esto con gran independencia de la presión de trabajo y del caudal de la bomba ($120 \pm 20 \text{ mmHg}$, $5 \pm 2 \text{ l/min}$). Para la geometría de la hendidura de choque se ha demostrado como especialmente favorable, una relación h/R en la gama de $0,016$ a $0,008$, y de l/R en la gama de $0,16$ a $0,08$, correspondiendo a alturas de la hendidura de choque de $0,32 \text{ mm}$ a $0,16 \text{ mm}$, y a una longitud axial de $1,6$ a $3,2 \text{ mm}$ en la forma preferente de realización con un radio R del rotor de 20 mm . En la gama $h/R < 0,006$ no aumenta más la constancia en caso de fuerzas crecientes de cizallamiento. En la gama $h/R > 0,2$ no se consiguen fuerzas suficientes ningunas de reposición.

Una desviación rotativa del rotor (figura 6) alrededor de los ejes (x, y), o sea, un ladeamiento en la carcasa, provoca simétricamente respecto al eje de rotación, un estrechamiento y un ensanchamiento en sentido contrario de las hendiduras de choque y, por tanto, diferentes cursos radiales de las corrientes de fuga, y el descenso de presión en los espacios laterales opuestos del rotor. La diferencia de presión resultante se activa como fuerza de compresión de reposición sobre toda la superficie de las dos cubiertas, y gira hacia atrás el rotor, a su posición neutra.

Para una geometría típica de la hendidura de choque, de $(h/R) = 0,01$ y una posición radial de la entrada en la hendidura de choque, de $(r_2/R) = 0,35$, un rotor de $R = 20 \text{ mm}$ se puede ladear un ángulo de $1,6^\circ$, cuando la hendidura de choque esté cerrada radialmente, y el rotor llegue a tocar puntualmente en el radio r_2 . La anchura H de la hendidura en la periferia del rotor se ha reconocido como favorable en la realización preferente, en la gama de $H/R = 0,05 \pm 0,01$ ($H = 0,8 \div 1,2 \text{ mm}$). La geometría elegida excluye una llegada del rotor a zonas de mayores velocidades periféricas en el radio R , de manera que no se impide la entrada de la corriente estabilizadora de reflujo al espacio lateral del rotor.

Así pues la estructuración según la invención, de los espacios laterales del rotor y de las hendiduras de choque, dan lugar a una estabilización en el espacio del rotor en su posición simétrica geoméricamente neutra en la carcasa, frente a la traslación en dirección $\pm z$, y rotación alrededor de los ejes x e y .

Otras posibles realizaciones de hendiduras de choque en bombas según la invención, están representadas en la figura 7. En la bomba según la figura 1, los espacios 26, 27 laterales del rotor se reducen continuamente, desde el radio R hasta la entrada en la hendidura 116, 117 de choque, en el radio r_2 , presentando la hendidura hasta la admisión en el rotor en el radio r_1 , una altura h constante, como lo muestra la figura 7a. En la figura 7b se representa una posible variante en la que la hendidura de choque, conservando las relaciones h/R (ver arriba), se forma mediante un abultamiento 30 que está moldeado a partir de las cubiertas 16, 17 en la zona de los radios r_2 a r_1 . De este modo se conserva la parte predominante de los espacios laterales del rotor, de manera que allí se reduce el rozamiento viscoso entre rotor rotativo y carcasa estacionaria, manteniéndose la acción estabilizante de la hendidura. En la figura 7c se muestra una posible variante en la que la forma de las cubiertas se corresponde con el abultamiento 132 configurado de la figura 7b. Aquí, en la carcasa está moldeado adicionalmente un abultamiento 133 situado radialmente más hacia fuera, manteniendo después la altura de la hendidura, las relaciones h/R según la invención. En esta realización, junto a la acción estabilizante axial del estrangulamiento, se produce una componente radial de fuerza, que favorece el centrado del rotor.

Las fuerzas de compresión, de reposición, se activan con mucha rapidez para cualquier tipo de variación de posición y, por tanto, para la modificación de la geometría de la corriente, a saber, con la velocidad de propagación de la variación de presión provocada en el fluido incompresible, o sea, con la velocidad del sonido. Esta asciende en la sangre (similar al agua) a unos 1500 m/s (en el aire: unos 300 m/s). Por lo tanto, para la geometría representada de la realización preferente, se calcula un retraso de la efectividad de una variación de posición del rotor, de unos 50 microsegundos .

Cálculos numéricos no estacionarios de simulación, teniendo en cuenta fuerzas de aceleración y de inercia, han dado por resultado que variaciones bruscas de posición del rotor, se regulan al máximo totalmente dentro de una a dos revoluciones. En el caso de un movimiento relativo axial del rotor, de forma sinusoidal, respecto a la carcasa, se produce un desplazamiento de fase entre desviación y reposición, de unos 10 ms , que corresponden aproximadamente a media revolución del rotor.

Una reacción tan rápida de la regulación de la posición es especialmente ventajosa al arrancar la bomba. En reposo, el rotor se encuentra en la carcasa en una posición aleatoria, desplazada axialmente o ladeada. Las fuerzas de compresión estabilizantes no se generan más que en funcionamiento. Una levitación hidrodinámica del rotor dentro de sus primeras pocas revoluciones, impide un deterioro estructural, condicionado por el rozamiento, de rotor y carcasa.

La rapidez y constancia de la regulación del rotor, según la invención, es también ventajosa cuando el portador de una bomba de sangre implantada, está expuesto en la vida diaria a aceleraciones cambiantes en diferentes ejes en el espacio. Los tiempos demostrados de regulación al máximo, de unos 10 ms (100 Hz), con la constancia de unos 20 N/mm , permiten esperar que también en caso de un múltiplo de la aceleración de la gravedad, se evitará con seguridad un choque del rotor de la bomba en la carcasa.

Una deriva del rotor, o sea, una traslación en las direcciones $\pm x$ y $\pm y$, no se impedirá por la estabilización axial de la posición arriba descrita, mediante fuerzas de compresión sobre la cubierta. La estabilización radial del rotor se hace pasivamente mediante fuerzas de reluctancia. Aquí es ventajoso mantener pequeño y compensar el empuje radial desestabilizante que aparece en toda bomba centrífuga. Esto se logra mediante varias medidas:

El empuje radial crece proporcionalmente con la altura total ($h_2 + 2d$) del rotor en la periferia. Este se mantiene pues especialmente plano, habiéndose demostrado como favorables relaciones de (h_2/R) en la gama de 0,08 a 0,12 y de (d/R) en la gama de 0,05 a 0,1. Se hace posible una forma constructiva especialmente plana, mediante la fabricación según la invención de las cubiertas, de material magnético macizo, recubierto biocompatible, con lo que se puede

suprimir un encapsulado de imanes separados.

El empuje radial (SR) crece exponencialmente cuando el rotor no trabaja en el punto óptimo (Q_{opt}) de su rendimiento: $SR \sim 1 - (Q/Q_{opt})^2$ (Bohl, W., *Strömungsmaschinen [Compresores]* 2, 8ª edición, Vogelbuchverlag, Würzburg (2002)). En la figura 9 se puede ver que los rendimientos óptimos se alcanzan para los números esperados de revoluciones de $2400 \div 3000 \text{ min}^{-1}$ en el campo de actividad de la bomba de $5 \pm 2 \text{ l/min}$, con lo que se minimiza más el empuje radial.

La evacuación del caudal por un canal espiral con salida tangencial, conduce entonces a un empuje radial cuando en la zona de la lengüeta (filo) en la zona de trabajo, aparece un salto de presión. Según la invención, esto se impide ampliamente pasando el volumen transportado por el rotor, por una hendidura anular circular, antes de entrar en el canal espiral, ocurriendo una rectificación de la corriente. El resto de la salida del flujo se lleva a cabo, a continuación, a través del canal espiral que puede estar realizado como espiral de Arquímedes con sección transversal aproximadamente circular. Como favorables en el sentido de la invención se han demostrado aquí, una altura h_3 axial de la hendidura anular, de h_3/h_2 en la gama de 0,6 a 2,0, una longitud radial (r_4/r_5) en la gama de 0,8 a 1,0, así como una sección transversal circular creciente permanentemente a lo largo de la periferia del canal espiral, con diámetro h_3 en la lengüeta y un diámetro terminal en la salida tangencial del flujo de $4 \cdot h_3$. En esta geometría preferente, en la zona de los máximos del rendimiento no se presenta ningún salto de presión radial desestabilizador en la zona de la lengüeta.

Las tres notas características descritas para la disminución del empuje radial, pueden disminuir este ampliamente pero, no compensarlo.

Para ello se recurre a las ya citadas fuerzas magnéticas de reluctancia producidas por la geometría del estator y del rotor.

El rendimiento hidráulico de una bomba de sangre que se pueda implantar, debe ser lo mayor posible, puesto que cualquier potencia perdida a causa de rozamiento viscoso, formación de turbulencias y corrientes de cortocircuito, contribuye al deterioro de la sangre y, por último, se transmite como energía térmica a la sangre. Además hay que añadir que las demandas de potencia en el accionamiento eléctrico y el gasto de energía necesario para ello, disminuyen en proporción inversa, lo cual favorece la miniaturización exigida.

Gracias a la geometría descrita de los espacios laterales del rodete y de los canales de evacuación, y en unión con un rotor cubierto con sistema óptimo de alabeado de las paletas, se consiguen rendimientos desconocidos hasta ahora. Esto se demuestra en la figura 8 y en la figura 9, de la mano de curvas de estrangulamiento medidas y de los correspondientes rendimientos. En la zona típica de trabajo de la bomba, de $5 \pm 2 \text{ l/min}$ de caudal frente a presiones de $120 \pm 20 \text{ mmHg}$, las potencias de bombeo hidráulica ($p \cdot V$) ascienden a $1,4 \pm 0,7$ vatios. Los números de revoluciones necesarios para ello, están situados en la gama de $2400 \div 3000 \text{ min}^{-1}$.

Utilizando un fluido de ensayo con la viscosidad de la sangre (4 mPas), la bomba de la figura 1 presenta los rendimientos mostrados en la figura 9, que en la zona típica de trabajo, ascienden a 0,4 a 0,47. Esto corresponde aproximadamente al cuádruplo de los valores que se señalaron para las conocidas bombas de sangre.

Correspondientemente baja es la necesaria potencia en el eje de unos $3 \pm 1,5$ vatios, como condición previa especialmente favorable para la miniaturización del accionamiento y del suministro de energía.

Para la estabilización hidrodinámica según la invención, del rotor, se utilizan las corrientes de reflujo reductoras del rendimiento, en el espacio lateral del rotor. Estas ascienden en la zona típica de trabajo, a unos $2 \div 3 \text{ l/min}$. Para producir un caudal neto de 5 l/min , se han de transportar por el rotor $7 \div 8 \text{ l/min}$. Esto corresponde a una mayor potencia hidráulica de 0,5 a 0,8 vatios para la estabilización del rotor y, por tanto, sólo a un aumento de aproximadamente el 20% de la potencia en el eje. No obstante, este aumento no se tiene que aplicar adicionalmente, sino que procede de la energía de las corrientes de fuga, disipada/aniquilada sin aprovechamiento en otras bombas.

La bomba según la invención es especialmente eficaz, y debe de transportar aquí la sangre lo más cuidadosamente posible. La condición previa más importante para ello es la evitación de altos esfuerzos cortantes. La bomba de sangre se diferencia de bombas conocidas con apoyos lisos hidrodinámicos, entre otras cosas, en que los espacios de las hendiduras entre rotor y carcasa de la bomba, se mantienen amplios. Incluso en la pequeña zona de la hendidura de choque, próxima al eje, que gira despacio, las alturas de hendidura ascienden en comparación con las bombas conocidas con apoyo hidrodinámico mediante superficies en cuña, a un cuádruplo de los valores allí señalados, y los esfuerzos cortantes que se presentan son correspondientemente pequeños.

Para el número máximo de revoluciones del rotor, a esperar en funcionamiento, de 3000 m^{-1} , la velocidad periférica en la hendidura de choque asciende únicamente a $\gamma = 1,8 \text{ m/s}$, y para una altura de $h = 0,2 \text{ mm}$, se calcula un grado de cizallamiento de $\dot{\alpha} = \gamma/h$ de 9000 s^{-1} . Con una viscosidad típica (η) de la sangre de 4 mPas, se deduce de esto un esfuerzo cortante medio $\tau = \gamma \cdot \eta$ de 36 Nm^2 . Por lo tanto, este está situado en un orden de magnitud

por debajo del valor límite de 400 Nm^{-2} que según las investigaciones más recientes se considera como crítico para el deterioro de la sangre por fuerzas cortantes (Paul, R., y otros, *Shear stress related blood damage in laminar couette flow*. Artif Organs, 2003, 27 (6):páginas 517 - 29).

5 La traumatización acumulativa (BT) de un volumen (V) de sangre al pasar una zona de alto esfuerzo τ cortante se correlaciona también con el tiempo (t) de exposición, según la relación $BT \sim (V \cdot \tau \cdot t)$. Cálculos numéricos de simulación han dado por resultado que el tiempo medio de paso de la sangre por toda la bomba, para un caudal de 5 l/min, asciende a unos 100 ms, permaneciendo una partícula en la hendidura de choque, como máximo por unos 0,3 ms en un campo de cizallamiento de menos de 40 N/m^2 . El volumen momentáneo de sangre en las hendiduras de
10 choque, asciende únicamente a 15 mm^3 . Condiciones previas hidrodinámicas tan favorables de circulación, para un bajo deterioro de la sangre, no se habían informado hasta ahora.

Junto a la destrucción celular mecánica por esfuerzos cortantes y contactos con la pared, la activación de los mecanismos celulares y moleculares de la coagulación sanguínea, es un problema central de bombas de sangre para
15 implantar. Coágulos que bloquean las bombas o que flotando seguidamente como émbolos, pueden provocar complicaciones, por ejemplo, ataques de apoplejía e infartos renales, se generan de preferencia por activación al contacto en superficies extrañas y de igual manera en aguas muertas y turbulencias permanentes. La bomba de sangre según la invención no presenta ninguna de tales zonas de circulación, más bien todos los espacios que conducen sangre, están enjuagados permanentemente con gran velocidad de corriente y breve tiempo de permanencia. La superficie de todos
20 los componentes constructivos estacionarios y rotativos, es lisa y en la dirección de la corriente se evitan escalones y perfilados. Todas las realizaciones preferentes se pueden fabricar de materiales biocompatibles y están provistas con un revestimiento anticoagulante, por ejemplo, heparina combinada superficialmente.

De los mecanismos según la invención, hasta ahora presentados, para la levitación hidrodinámica del rotor de la
25 bomba, se deduce finalmente que el rotor se posiciona centrado en la carcasa en dirección axial, mediante los efectos de la hendidura de choque. En dirección radial necesita el apoyo adicional de fuerzas magnéticas de reluctancia. En funcionamiento el rotor se desplaza dinámicamente, se tambalea y se mueve excéntricamente. Sin embargo, a causa de la distancia suficiente a las paredes y del rápido tiempo de reacción de las fuerzas estabilizadoras, se arranca de inmediato. Expresamente se desea cierta movilidad del rotor en la carcasa, puesto que tan sólo en esta combinación
30 ingeniosa de las notas características citadas, se pueden alcanzar un funcionamiento seguro, un rendimiento alto, enjuague permanente de todos los espacios que conducen sangre, y el mínimo deterioro de la sangre.

El accionamiento sin contacto del rotor de la bomba, se puede llevar a cabo en una realización preferente, en forma de un motor eléctrico síncrono con inducido de disco de dos devanados, excitado con imanes permanentes.
35

La levitación hidrodinámica del rotor de la bomba, supone para el accionamiento eléctrico un entrehierro magnético desventajosamente grande entre las cabezas del estator. Este es necesario para el alojamiento de todas las paredes de la carcasa, de los espacios laterales del rotor que conducen la sangre, y del mismo rotor. El entrehierro tiene que ascender a $L = 0,1$ a $0,15 \cdot R$, e impone pues exigencias inusuales en la construcción de motores, para la optimización de la
40 eficiencia electromecánica del accionamiento.

Un criterio a cumplir es, con un mínimo de masa de los imanes permanentes y, por tanto, con poca constancia magnética axial, generar un par motor máximo para un alto rendimiento electromecánico, evitándose pares de retención y ondulación del par motor.
45

En la bomba según la invención, se resuelve esto como sigue: Los imanes permanentes están distribuidos en dos planos, mediante el alojamiento en las dos cubiertas del rotor, entre los cuales existe un cierre magnético de retorno a través del canal de las paletas. En una realización preferente del rotor con $R = 20 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$ y $r_3 = 16 \text{ mm}$, únicamente se necesitan 5 g de masa magnética (Nd Fe B), con la correspondientemente pequeña desestabilización
50 del rotor en caso de desviación axial.

Según la invención, los dos estatores pueden estar girados uno respecto a otro un total de $1/3$ a $1/2$ del paso polar; o sea, para 6 polos, de 20 a 30 grados. Del mismo modo las zonas magnéticas permanentes de las dos cubiertas del rotor, pueden estar giradas una respecto a otra, un ángulo de hasta $1/6$ del paso polar, o sea, hasta 10 grados. Las dos
55 medidas contribuyen a la supresión de pares de retención y de la ondulación del par motor.

Otro aumento del rendimiento electromecánico, para una constancia axial mínima del accionamiento, se puede llevar a cabo mediante una superposición polar optimizada de los dientes del estator, y de la superposición polar relativa de los imanes permanentes.
60

La estabilización radial de la posición del rotor (traslación en la dirección x e y) se favorece, aunque no se provoca, por la estructuración arriba presentada del rotor, de los espacios laterales del rotor, de la hendidura anular circular, así como del canal espiral que evacua la corriente. El centrado radial del rotor se lleva a cabo mediante fuerzas magnéticas de reluctancia entre las zonas magnéticas permanentes en el rotor y las zonas de cabeza de los dientes del estator. En
65 funcionamiento de la bomba, la estabilización se refuerza más, por las fuerzas centrífugas que actúan sobre el rotor.

REIVINDICACIONES

1. Bomba centrífuga, en especial para sangre en dispositivos de sustitución del corazón o de asistencia ventricular, con un rotor (14) de la bomba dispuesto sin contacto y giratorio, dentro de una carcasa (11) cerrada herméticamente a lo líquidos y a los gases, excepto en al menos una abertura (12) de entrada y al menos una abertura (13) de salida, cuyo rotor es al mismo tiempo el rotor de un motor de accionamiento, y presenta una o varias zonas magnetizadas permanentemente distribuidas en forma uniforme por su periferia, estando dispuesto por fuera de la carcasa (11) y por debajo del rotor (14), un estator (18, 19) del motor de accionamiento, de manera que los estatores (18, 19) producen en la hendidura entre sí y la o las zonas magnetizadas permanentemente del rotor (14), un flujo magnético rotativo, estando configurado el rotor (14) simétrico respecto a su plano medio, y presentando una cubierta (16, 17, 16', 17') superior e inferior, **caracterizada** porque el rotor (14) y/o la carcasa (11) de la bomba, están conformados de tal manera que las distancias axiales entre la cubierta (16, 17, 16', 17') superior e inferior, y la pared superior e inferior de la carcasa, se reducen radialmente hacia dentro de forma continua, de tal manera que en la zona radial interior del rotor (14), cada uno de los espacios (26, 26', 27, 27') laterales del rotor, presenta una hendidura (116, 117) de choque, las cuales en el funcionamiento, influyen las corrientes de reflujo dirigidas radialmente hacia dentro en los espacios (26, 26', 27, 27') laterales del rotor, de tal manera que en caso de una desviación axial del rotor (14), generan por encima y por debajo del rotor (14) distribuciones diferentes de presión, con lo que se producen fuerzas que actúan sobre la mayoría de la superficie de las cubiertas (16, 16', 17, 17'), que provocan una estabilización axial del rotor (14), y en igual forma son eficaces contra un ladeamiento del rotor (14) en la carcasa (11).

2. Bomba centrífuga según la reivindicación 1, **caracterizada** porque el centrado radial del rotor (14) se lleva a cabo pasivamente mediante fuerzas de reluctancia.

3. Bomba centrífuga según alguna de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada** porque el rotor (14) está fabricado totalmente de material paramagnético y/o ferromagnético.

4. Bomba centrífuga según alguna de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada** porque al menos sus superficies que están en contacto con el líquido, están provistas con un recubrimiento adaptado a las características del líquido.

5. Bomba centrífuga según alguna de las reivindicaciones precedentes, **caracterizada** porque es una bomba de sangre que se puede implantar en el cuerpo.

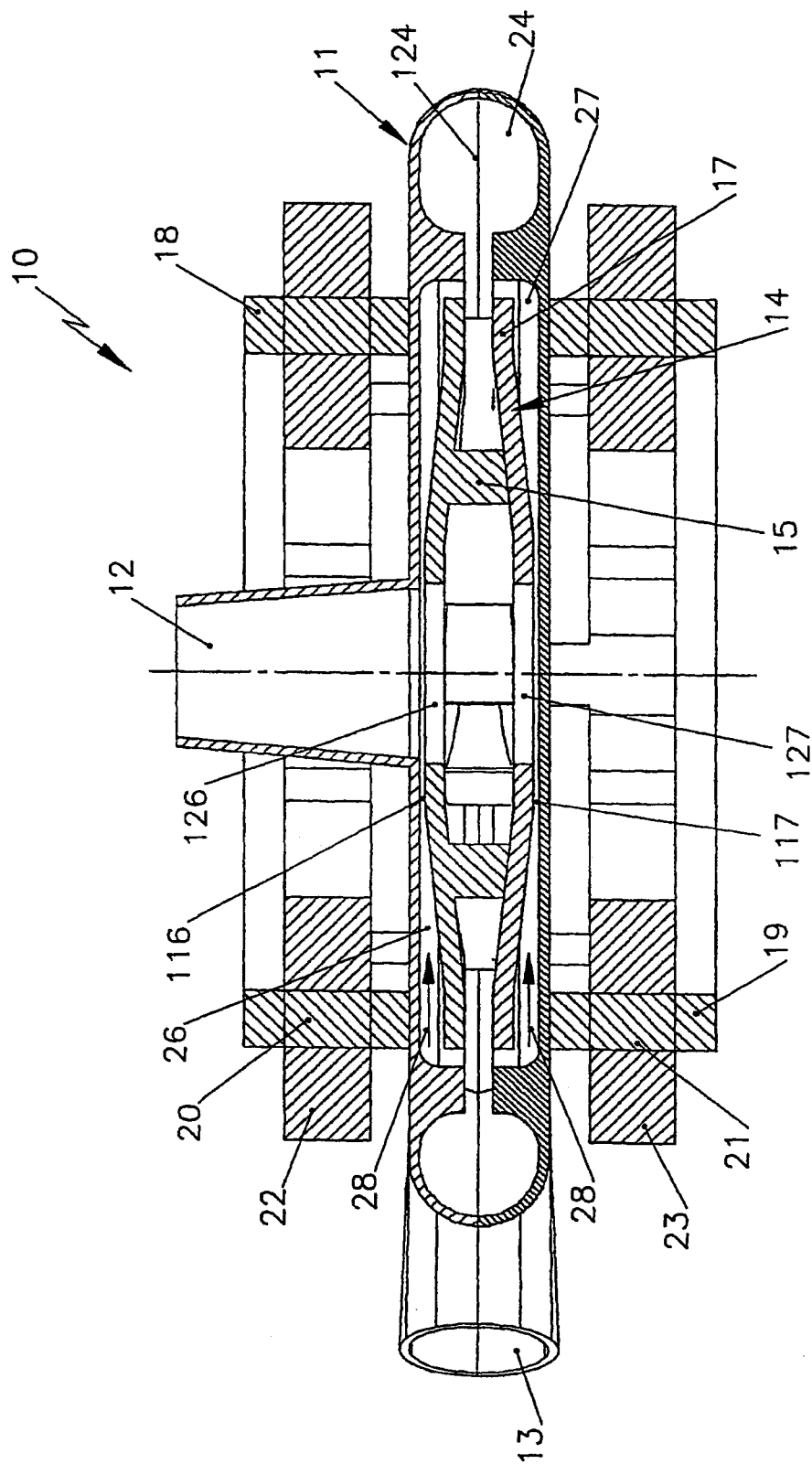


Fig. 1

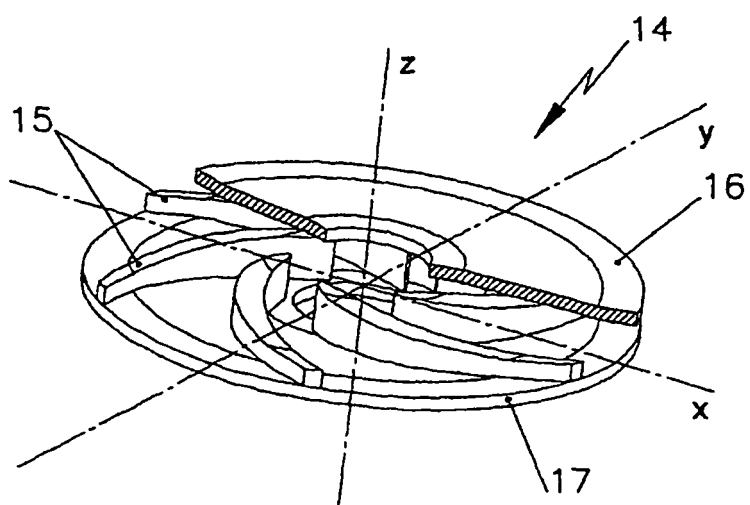


Fig. 2a

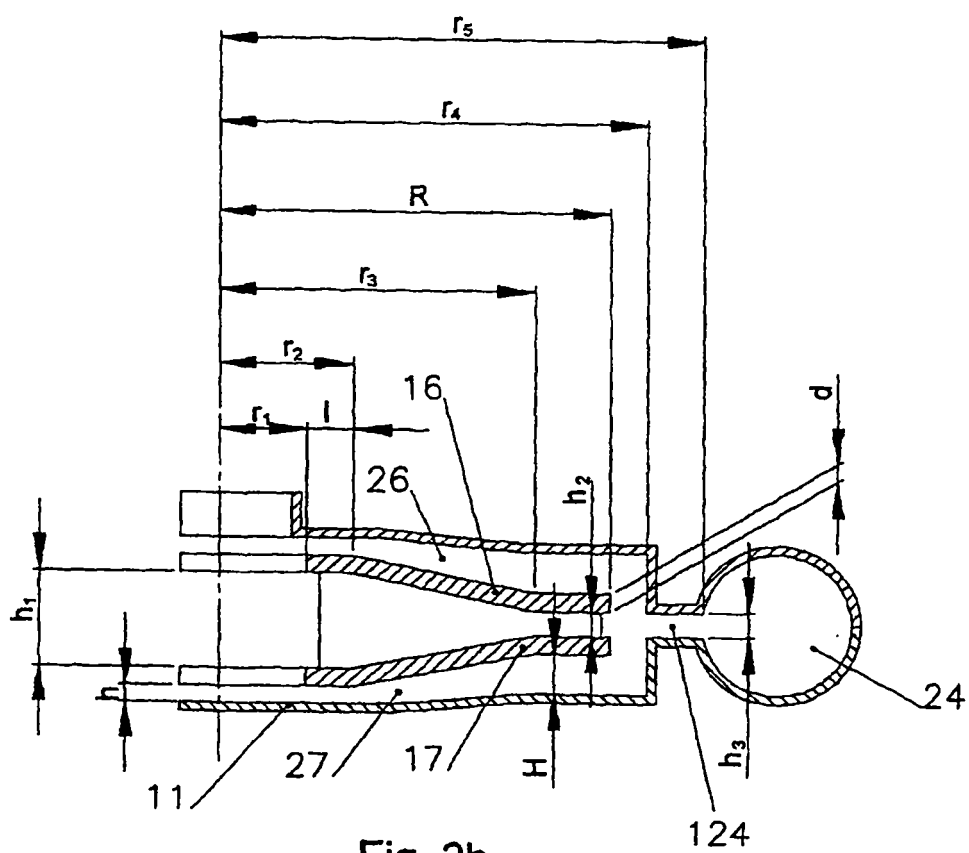
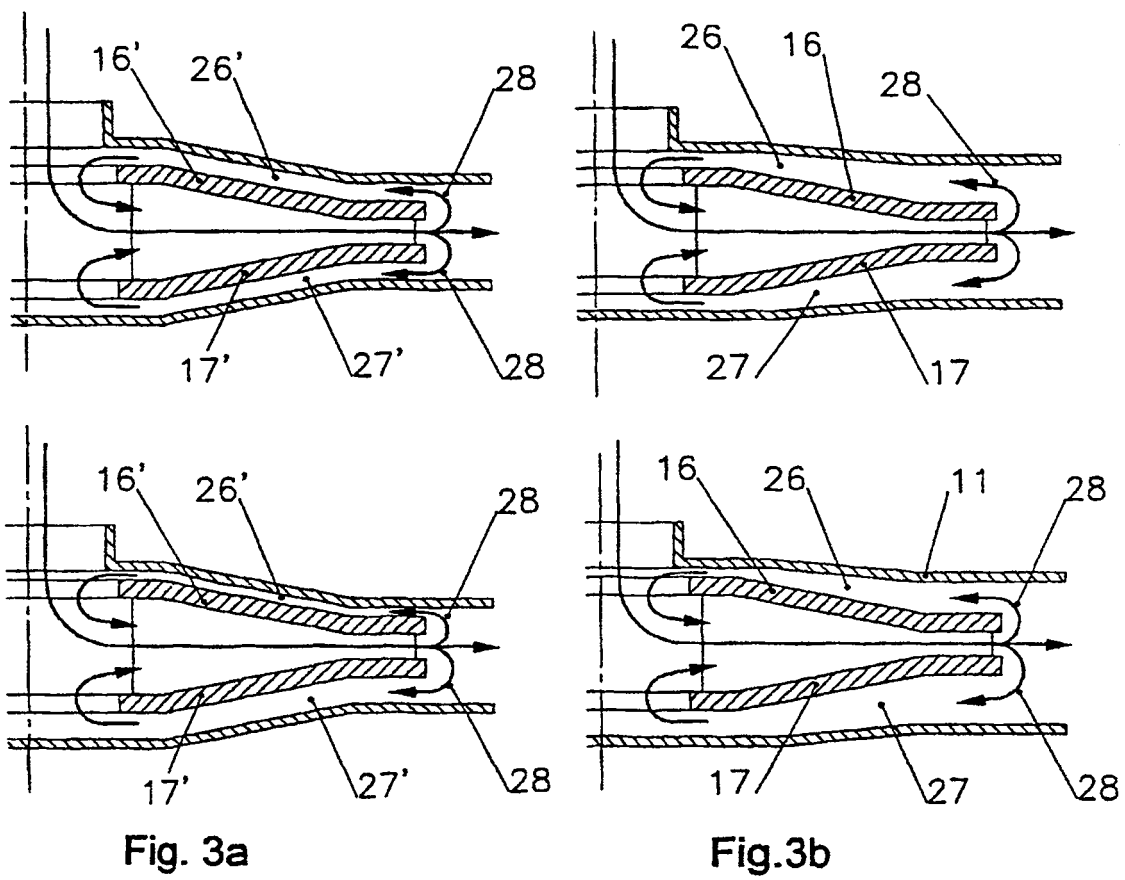


Fig. 2b



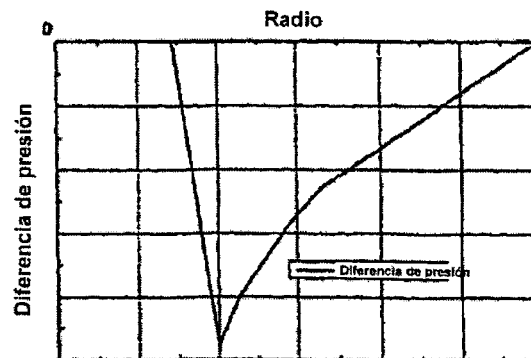
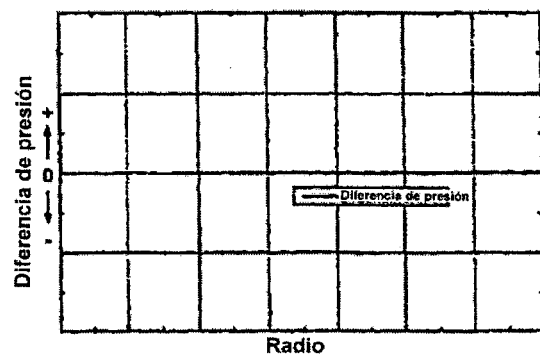
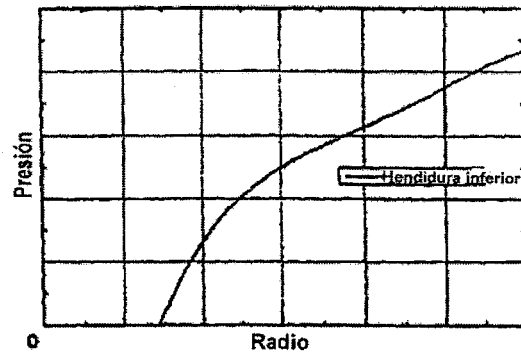
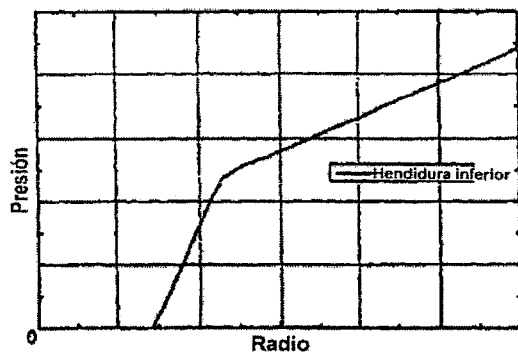
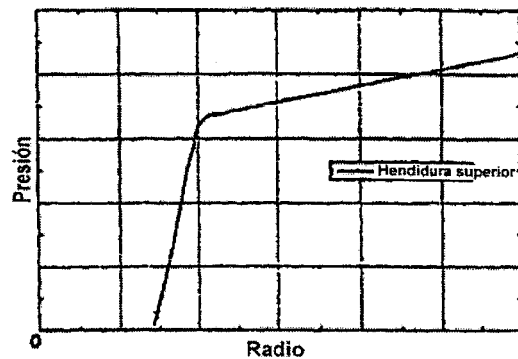
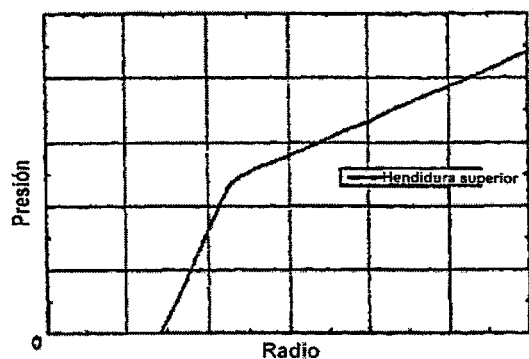
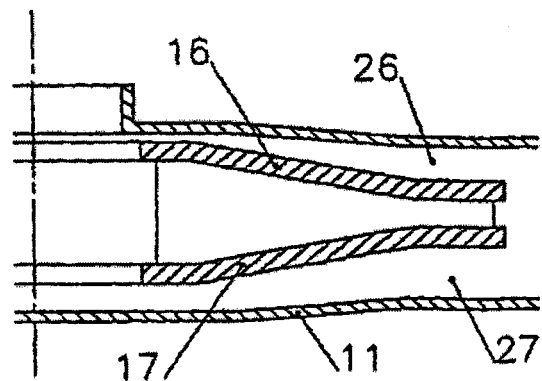
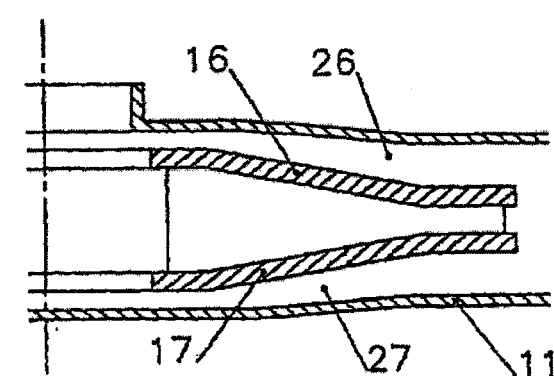


Fig. 4a

Fig. 4b

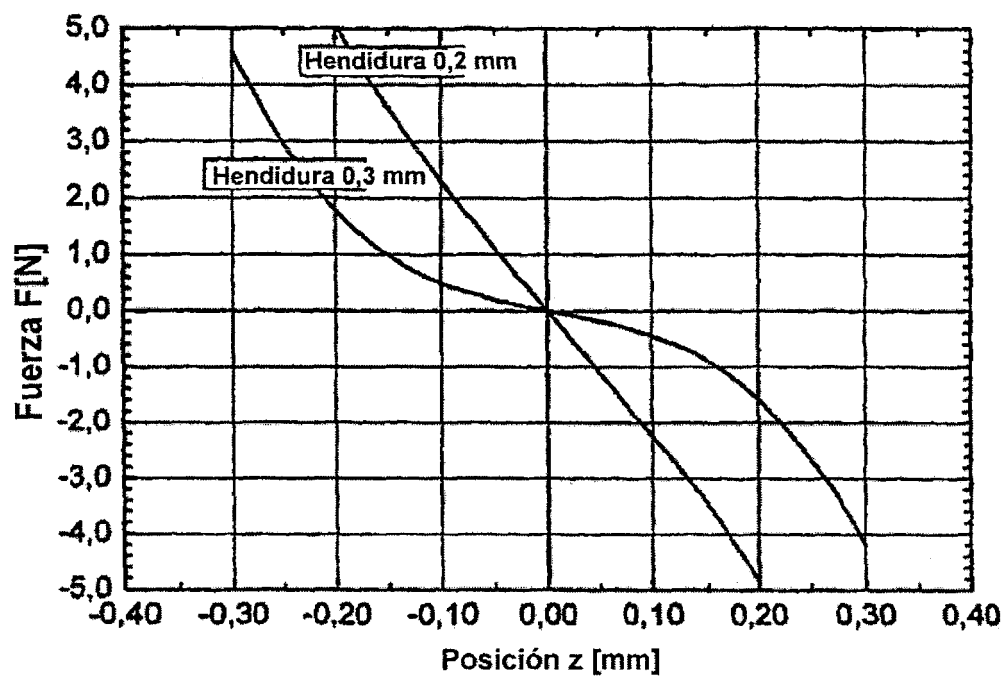


Fig. 5

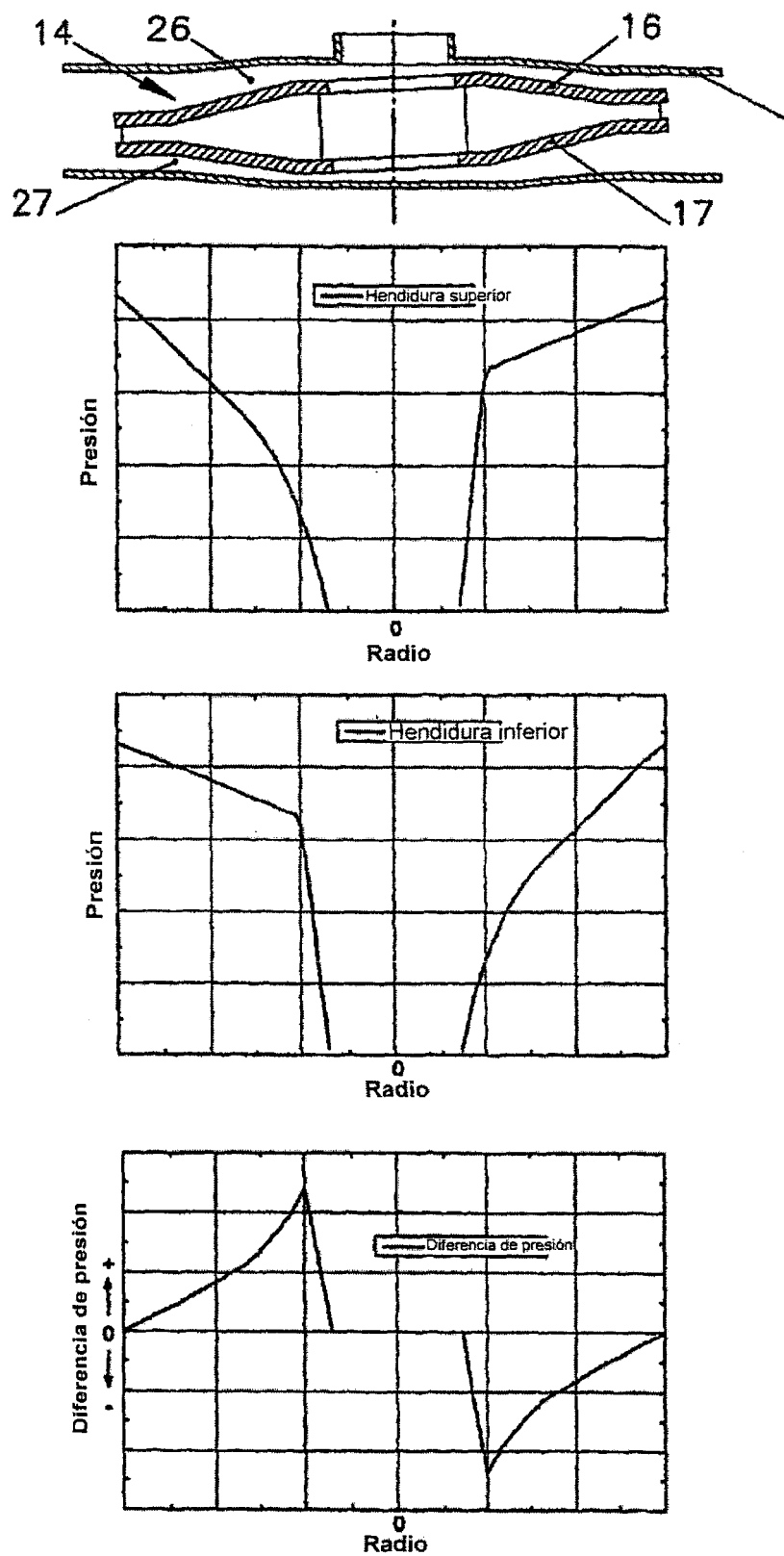


Fig. 6

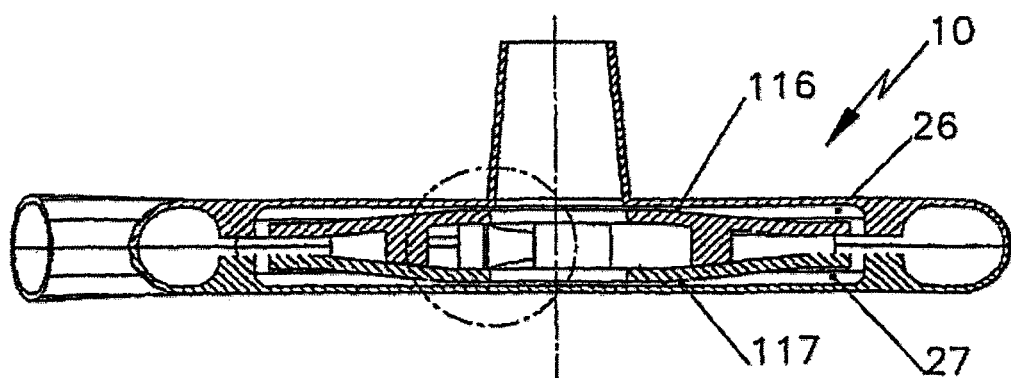


Fig. 7a

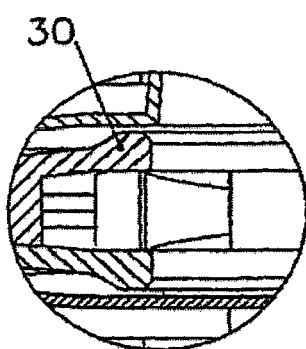


Fig. 7b

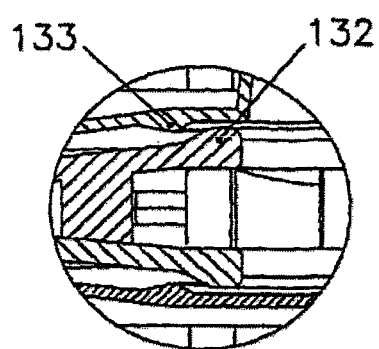


Fig. 7c

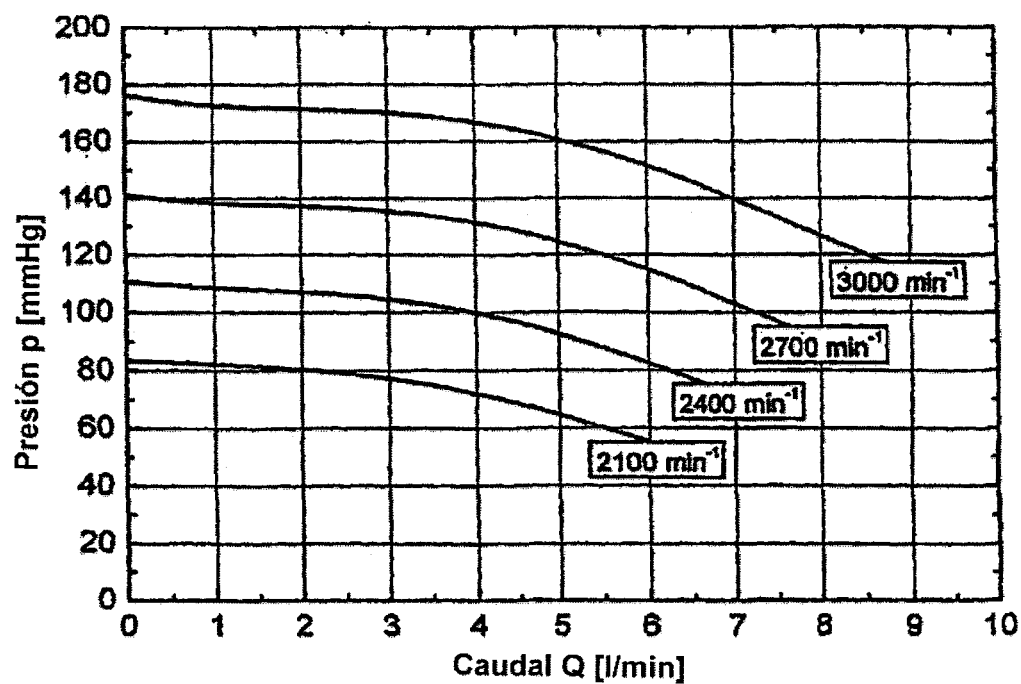


Fig. 8

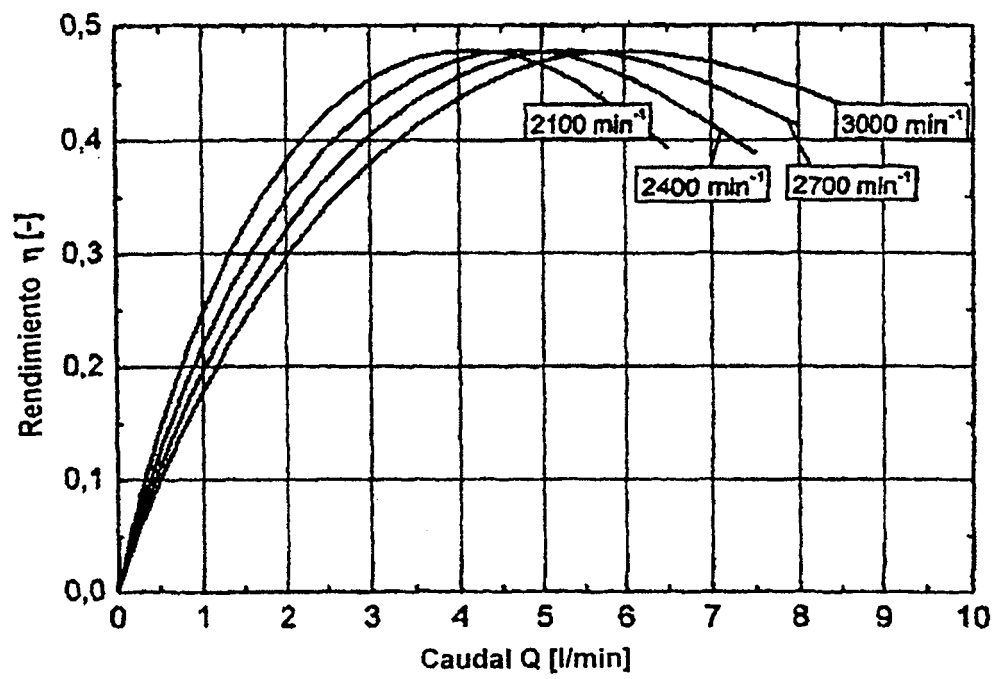


Fig. 9