

TURBINAS DE SIMETRÍA DINÁMICA

**ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN
TECNOLÓGICA**

VERSIÓN 1.ES

19 DE ENERO DE 2013

La simetría dinámica es un novedoso concepto de diseño y fabricación de turbinas de gas que rompe con el actual paradigma en la ingeniería de este tipo de motores. Partiendo del hecho objetivo de que tanto el compresor como la turbina de gases calientes son turbomáquinas muy similares que responden a los mismos fenómenos físicos, el concepto de simetría dinámica persigue combinar en un único elemento rotor las funciones de expansión y compresión reduciendo al mínimo imprescindible los requerimientos estructurales del mismo a la vez que se logra un excelente esquema de refrigeración.

Se considera superficie de simetría dinámica teórica (1) a aquella que tiene una forma alabeada tal que permite conducir una corriente de fluido (2) por una de sus caras describiendo una determinada trayectoria y ejerciendo sobre ella unos determinados esfuerzos, mientras que al mismo tiempo permite conducir otra corriente de fluido (3) por su otra cara describiendo otra trayectoria simétrica a la primera y ejerciendo sobre ella otros esfuerzos simétricos a los primeros.

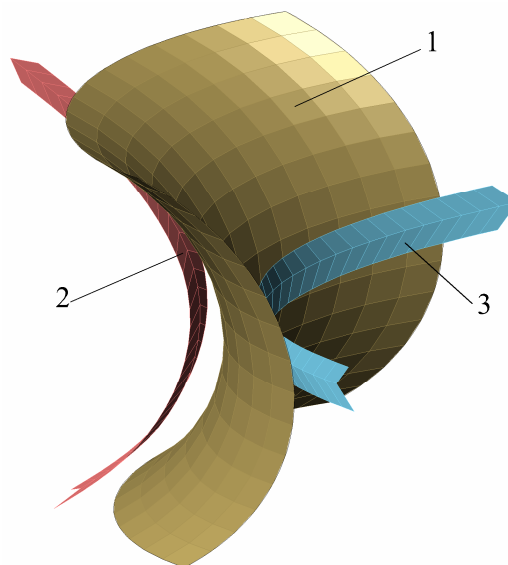


FIG. 1

Si bien el enunciado que define este criterio es relativamente sencillo, lo cierto es que es poco intuitivo y resulta difícil llegar a comprenderlo completamente sin la ayuda de dibujos pues su aplicación genera geometrías tridimensionales no convencionales. A pesar de ello, una vez entendida, esta nueva técnica se traduce en la obtención de arquitecturas simples que se revelan funcionalmente muy naturales y versátiles. Seguidamente se ofrece una descripción detallada de esta tecnología.

ÍNDICE

FILOSOFÍA	3
CONFIGURACIONES	7
OTROS DETALLES CONSTRUCTIVOS.....	14
VENTAJAS	16
APLICACIÓN INDUSTRIAL	16
COMPARATIVA CON EL ESTADO DE LA TÉCNICA ANTERIOR	16
ADVERTENCIA POR PREJUICIO DE RECHAZO A LO DESCONOCIDO.....	17
INVESTIGACIONES EN CURSO	19
CONSIDERACIONES DE DISEÑO ELEMENTALES PARA UNA MICROTURBINA .	19
MICROTURBINA DE 100 KW: GEOMETRÍA DEL ROTOR.....	22
MICROTURBINA DE 100 KW: CONFIGURACIÓN FINAL.....	25

FILOSOFÍA

La estrategia de la simetría dinámica se emplea específicamente en el diseño de rotores de turbina, ya sea para flujo axial, radial o mixto. Pero en realidad las particularidades de los rotores así contruidos repercuten notablemente en la concepción global de las turbomáquinas en las que se van a integrar provocando que sus estructuras tampoco sean convencionales. Los rotores de láminas de simetría dinámica se fabrican simplemente mediante la unión de dos tipos de láminas, uno de presión (superficie activa) y otro de succión (superficie pasiva), cuyas formas no convencionales se derivan del criterio de simetría dinámica. Gracias a esta técnica el rotor funciona a la vez como bomba y como motor y se reduce sustancialmente la necesidad de materiales estructurales para su construcción. Cualquier superficie del rotor está en contacto con el fluido que se expande por una de sus caras y también está en contacto con el fluido que se comprime por la otra cara.

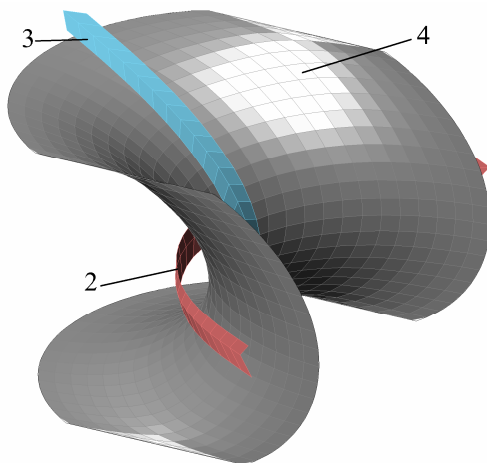


FIG. 2

Uno de los tipos de láminas desempeña la función de superficie activa para la compresión por una de sus caras y para la expansión por la otra. El otro tipo de lámina desempeña la función de superficie pasiva para la compresión por una de sus caras y para la expansión por la otra.

La figura 1 muestra una superficie activa de simetría dinámica 1 en la que también pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. Nótese cómo dichas trayectorias curvas implican la aparición de presión entre la superficie y el fluido. Obsérvese en este ejemplo teórico cómo la geometría y las trayectorias presentan simetría respecto a una recta imaginaria que pasara por dos vértices opuestos de la superficie.

La figura 2 muestra una superficie pasiva de simetría dinámica 4 en la que también pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3. Nótese cómo dichas trayectorias curvas implican la aparición de succión entre la superficie y el fluido. Al igual que ocurre en los álabes clásicos de flujo axial, la superficie pasiva de simetría dinámica tiene una curvatura más pronunciada que la superficie activa.

Debido a las especiales características geométricas de los rotores de láminas de simetría dinámica no es posible hablar del concepto clásico de álabe como elemento constructivo. El rotor se construye tan solo uniendo adecuadamente entre sí una secuencia de láminas en la que se alternan de forma sucesiva las activas y las pasivas de modo que entre ellas van formándose dos tipos de canales igualmente alternativos, uno destinado a que circule el fluido que se comprime y el otro, adyacente, destinado a que circule el fluido que se expande.

La figura 3 muestra la unión de una superficie pasiva de simetría dinámica 4 y dos superficies activas de simetría dinámica 1. Esta vista permite apreciar cómo se forman los canales por los que han de circular tanto el flujo que se expande 2 como el flujo que se comprime 3.

Nótese cómo la superficie pasiva 4 se une por dos de sus bordes con una de las superficies activas 1, y por otros dos con la otra superficie activa 1. De forma recíproca les sucede a las activas respecto a las pasivas. Como puede verse en este ejemplo, la superficie activa de simetría dinámica tendrá todos sus bordes unidos a alguna superficie pasiva, sin embargo, no sucede lo mismo con la superficie pasiva de simetría dinámica que tendrá algunos bordes

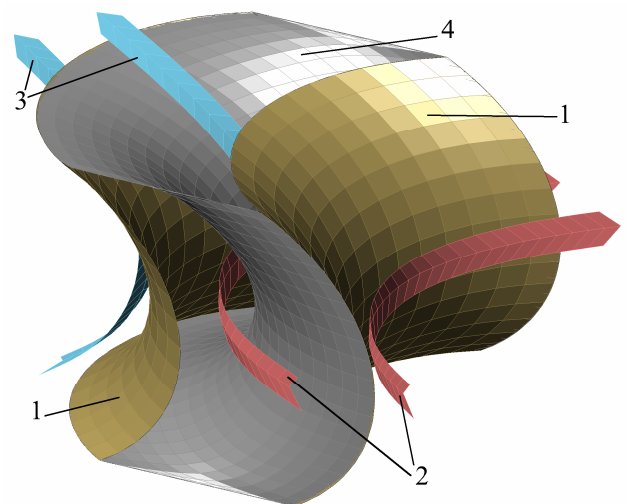


FIG. 3

libres. Esto es así por mera conveniencia geométrica, pero sería perfectamente concebible que fueran ambas superficies o solo la superficie activa la que tuviera esos bordes libres, aunque ello engendraría geometrías un poco más forzadas.

El hecho de que un canal sea de compresión o expansión no depende de la geometría de las superficies sino de cómo se configure la máquina entera y del sentido de giro del rotor.

Ambos tipos de láminas son muy semejantes en su forma por lo que pueden ser obtenidos mediante procesos de fabricación análogos. Las láminas deben unirse entre sí por sus bordes mediante soldadura, unión adhesiva, ranuras de ensamblaje en rotores desmontables o cualquier método conveniente. No se descarta la posibilidad de emplear algún método de fabricación que permita la obtención del rotor de una sola pieza directamente sin tener que recurrir a la fabricación de láminas y su posterior unión.

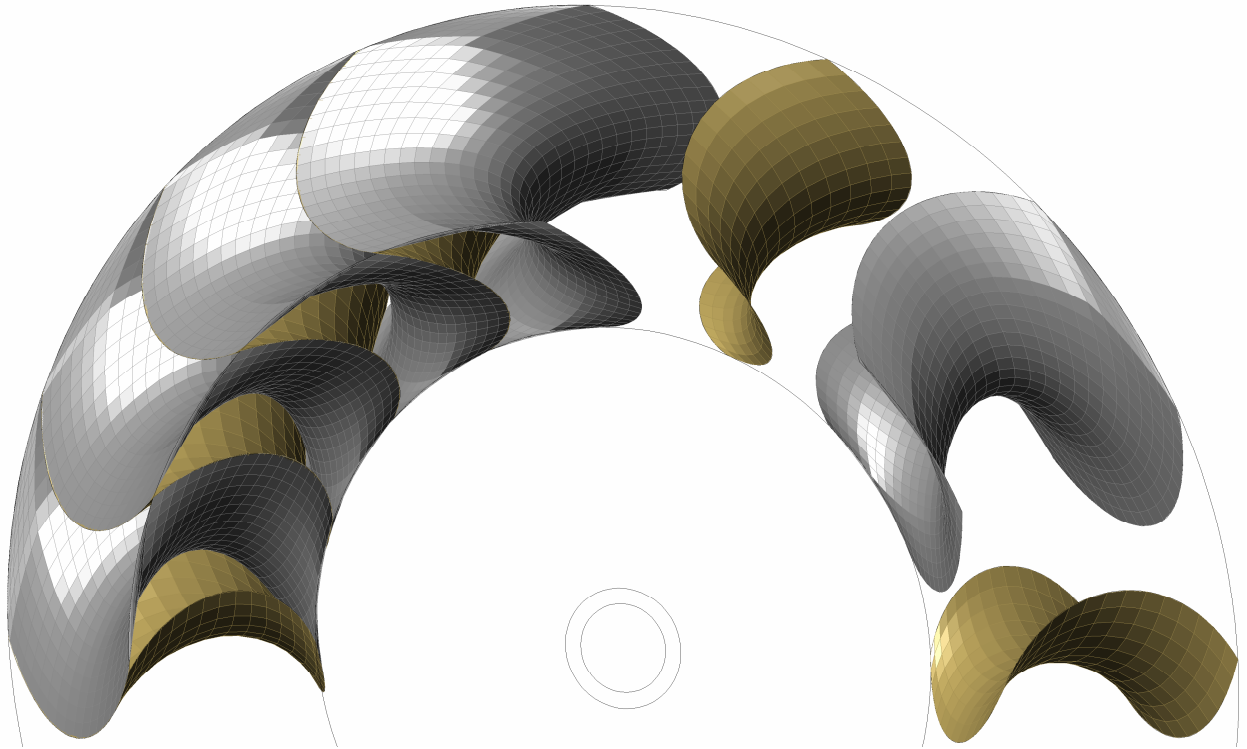
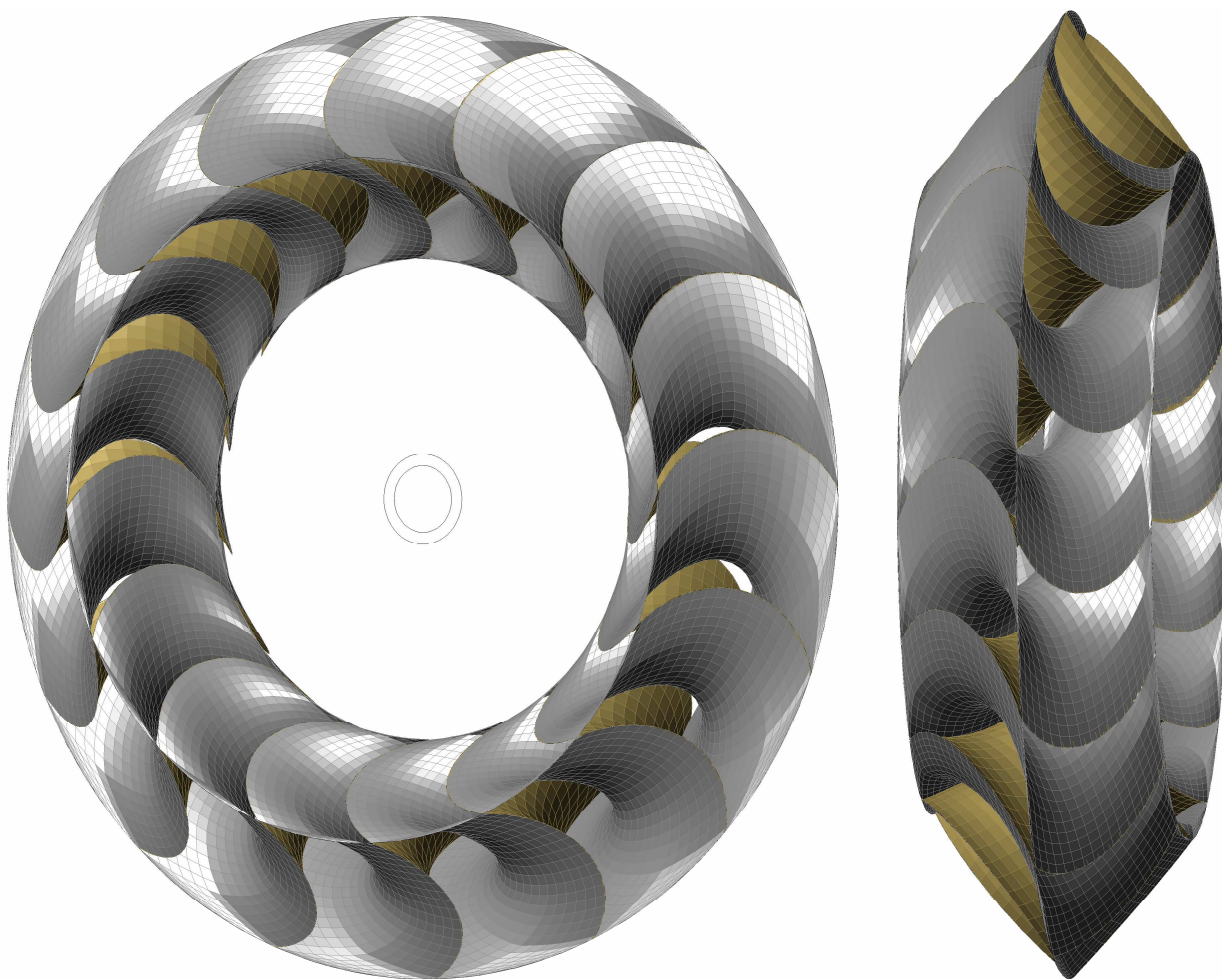


FIG. 4

La figura 4 ilustra cómo se irían uniendo secuencialmente y de manera alternativa las superficies activas y las pasivas para la fabricación de un rotor.

**FIG. 5**

La figura 5 muestra perspectivas de un rotor completo. Nótese cómo las superficies pasivas prácticamente ocultan a las superficies activas.

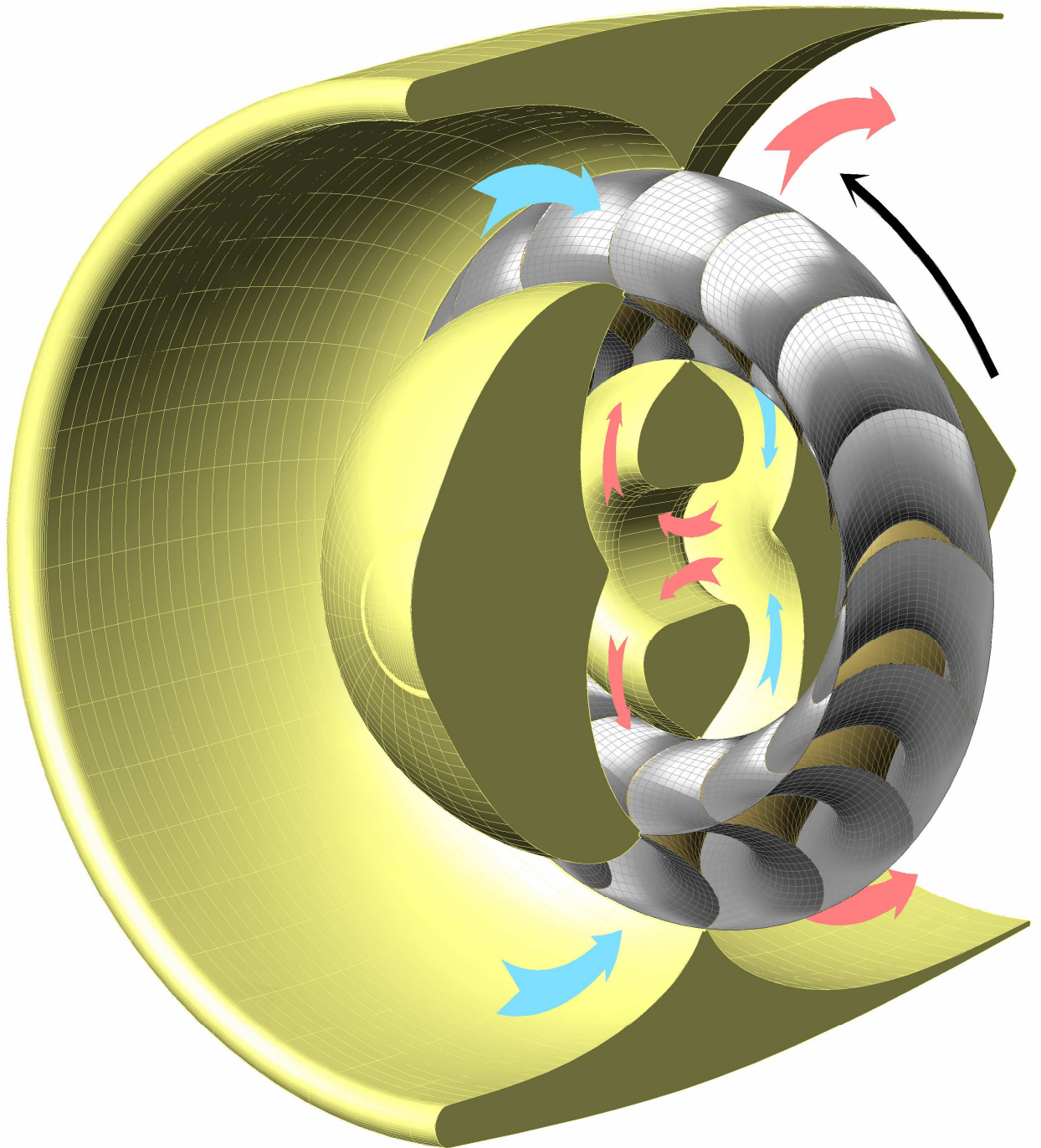


FIG. 6

La figura 6 muestra la perspectiva de un motor de turbina de gas elemental cortado axialmente para poder ver la disposición del rotor de láminas de simetría dinámica para flujo axial, su sentido de giro y las flechas que indican el recorrido de los gases en su interior.

En la figura 7 se muestra la sección esquemática de ese mismo motor. El aire fresco 14 entra en el motor y llega hasta el rotor 15 pasando a través de sus canales de compresión. Después sale del rotor en el punto 16 parcialmente comprimido y con una gran energía cinética. Mediante una voluta en espiral, el aire es conducido hasta la entrada del combustor 17 a donde llega totalmente comprimido y con poca energía cinética. Sale del combustor por 18 tras suministrarle energía térmica y mediante otra voluta en espiral es conducido hasta 19 en donde ha perdido parte de su presión y ha ganado una gran energía cinética. Después entra en los canales de expansión del rotor 15 donde cede parte de su energía al rotor para finalmente salir del motor por 20.

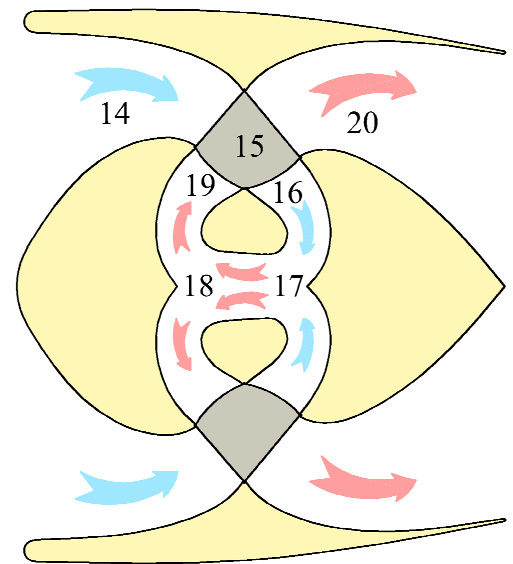


FIG. 7

Nótese que el rotor se ha calificado como de flujo axial puesto que en esta configuración no se aprovecha de ninguna forma la componente radial del flujo ya que el flujo que se comprime circula hacia el eje de giro y el que se expande se aleja del mismo.

En las aplicaciones reales estas superficies de simetría dinámica difícilmente presentarán simetría geométrica debido a la disparidad entre las condiciones termodinámicas del fluido que se expande y las del fluido que se comprime. Las superficies reales de las láminas con las que finalmente se construirán los rotores se derivarán del criterio teórico de simetría dinámica atendiendo a requisitos de resistencia, optimización de mecánica de fluidos, transferencia de calor e idoneidad según la aplicación concreta que se esté diseñando. No se presume que las láminas deban tener un espesor uniforme, circunstancia que dependerá de las necesidades de diseño en cada caso.

CONFIGURACIONES

Los dibujos y esquemas simplificados de este documento se presentan a título ilustrativo y no corresponden a diseños reales. Las figuras mostradas anteriormente representan superficies diseñadas para flujo axial por ser las más didácticas, pero el hecho de que el tipo de flujo sea predominantemente radial o axial es algo meramente circunstancial y no altera la aplicación del criterio de simetría dinámica. Para que haya una transferencia de energía entre el rotor y el fluido se necesitan movimiento (giro) y fuerza (presión). Las presiones que surgen entre la superficie y el fluido son causadas por aceleraciones del mismo, es decir, cambios de velocidad en el flujo tanto en módulo como en dirección. El cambio de velocidad en el fluido puede ser debido a la curvatura de la superficie, como en el flujo axial, o al cambio de velocidad de la propia superficie a distintas distancias del eje de giro, como en el flujo radial, y puede ser debido a una mezcla de ambos. Para el flujo axial la superficie de simetría dinámica tiene doble curvatura y su forma se asemeja a una silla de montar a caballo. Para flujo radial la superficie de simetría dinámica podría ser plana ya que los cambios de velocidad no dependen de la existencia de curvatura sino de la mayor o menor cercanía al eje de giro. La superficie de simetría dinámica correspondiente al flujo mixto es como la del flujo axial pues geoméricamente manda el hecho de que exista curvatura. Desde el punto de vista geométrico, la superficie de simetría dinámica correspondiente al flujo radial se puede considerar un caso límite de la del flujo axial en el que la curvatura es nula.

Independientemente de la disposición del rotor, se entiende por flujo axial aquel en el que la curvatura de la superficie es la causante principal de las aceleraciones en el fluido que favorecen la transferencia de energía entre el rotor y el fluido; se entiende por flujo radial aquel en el que la variación de la distancia al eje de giro es la causante principal de las aceleraciones en el fluido que favorecen la transferencia de energía entre el rotor y el fluido; se entiende por flujo mixto aquel en el que tanto la curvatura de la superficie como la variación de la distancia al eje de giro son las causantes de las aceleraciones en el fluido que favorecen la transferencia de energía entre el rotor y el fluido.

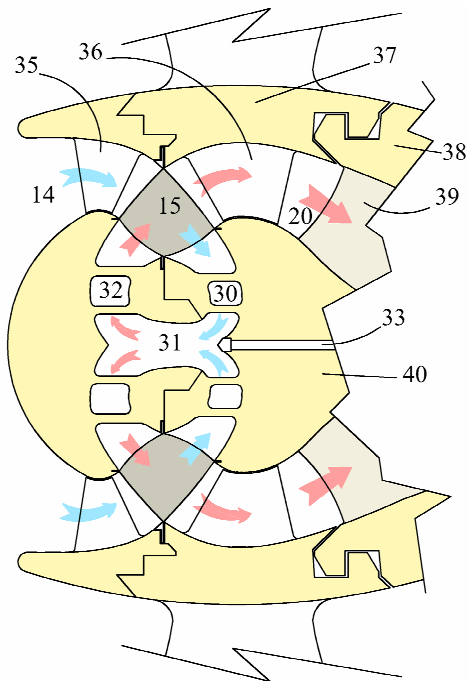


FIG. 8

La figura 8 muestra una sección axial esquemática de un motor turbo-hélice con un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo axial 15 cuya cámara de combustión 31 está centrada. El rotor es similar al ya mostrado en la figura 5.

El cuerpo del motor está compuesto por una carcasa exterior 38 y un cuerpo central 40 unidos por un estator 39. Las hélices forman parte de un rotor exterior 37 que en su interior tiene una etapa de álabes convencionales 35 de ayuda a la compresión y otra etapa de álabes convencionales de turbina 36 que accionan todo el rotor exterior mediante los gases de exhaustación. En este caso el rotor de láminas de simetría dinámica 15 sólo se usa para compresión mientras que la potencia útil es obtenida por los álabes 36 del rotor exterior 37. El rotor exterior 37 y el rotor de láminas de simetría dinámica 15 giran en sentidos opuestos.

A través del conducto 33 se suministra combustible e ignición eléctrica a la cámara de combustión 31. El motor puede arrancarse insuflando aire comprimido desde una botella a la cámara de combustión a través del conducto 33 y, una vez arrancado, emplear ese mismo conducto 33 para tomar aire de la entrada de la cámara de combustión y rellenar la botella de aire comprimido. El aire fresco 14 es parcialmente acelerado y comprimido por los álabes 35 del rotor exterior 37 y llega hasta

el rotor 15 pasando a través de sus canales de compresión. Después sale del rotor 15 y entra en la voluta espiral de compresión 30 que lo conduce hasta la cámara de combustión 31. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y entra en la voluta espiral de expansión 32 que lo conduce hasta el rotor 15. El gas pasa por los canales de expansión del rotor 15 donde cede parte de su energía. Tras salir del rotor 15 incide sobre los álabes de turbina 36 suministrando la potencia útil al rotor exterior 37 para finalmente salir del motor por 20.

Los rotores para flujo mixto son esencialmente iguales a los de flujo axial aunque la configuración de la máquina sí permite aprovechar la componente radial del flujo en la compresión o expansión.

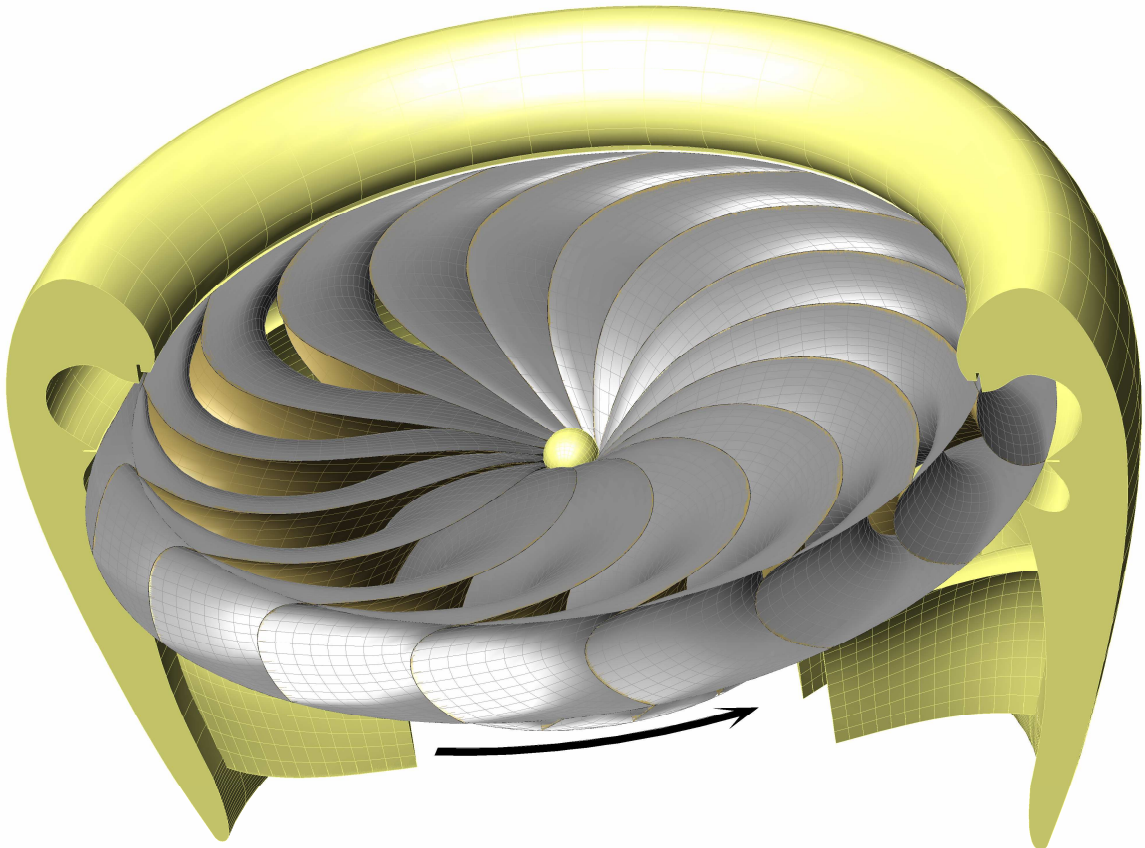


FIG. 9

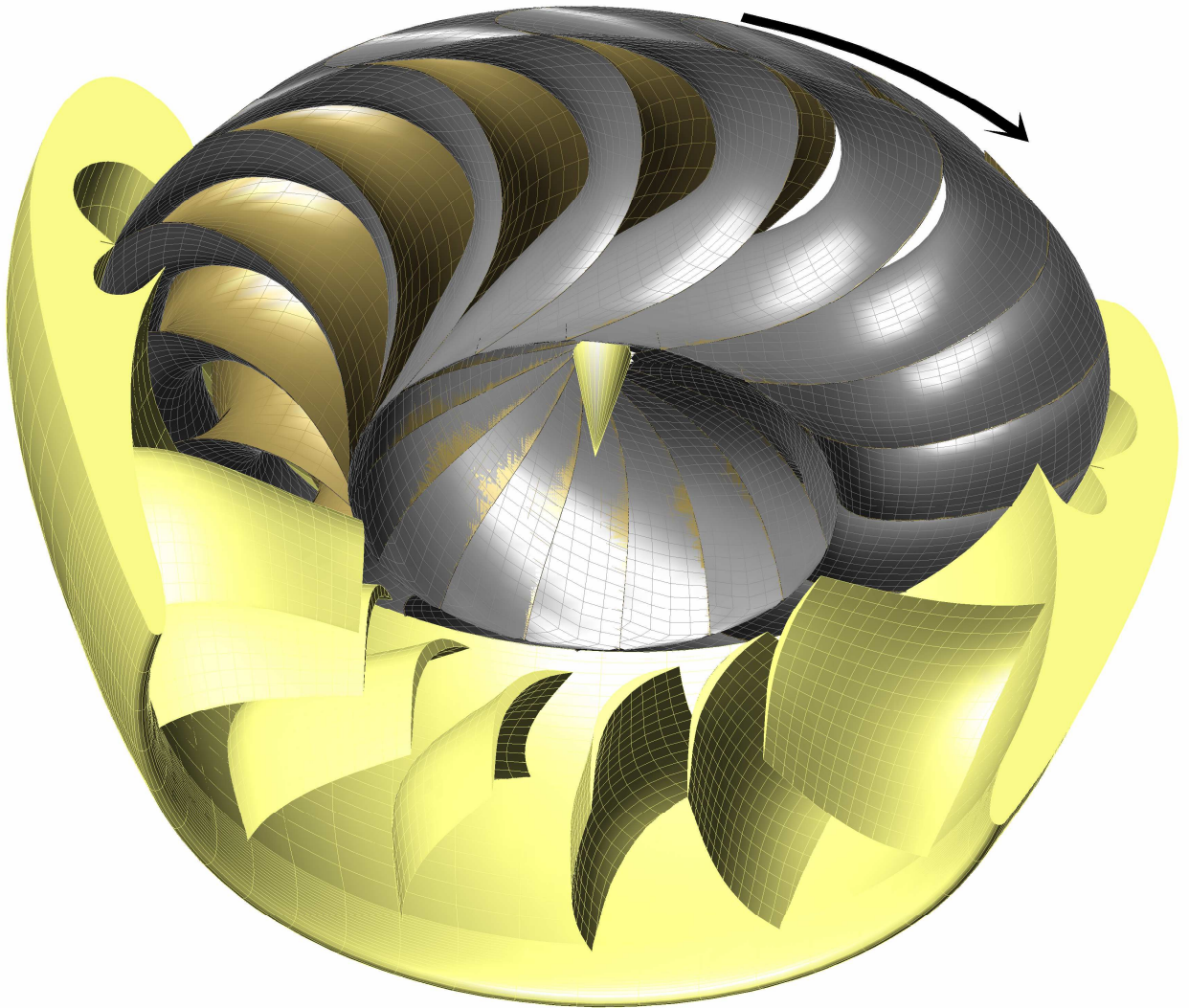


FIG. 10

Las figuras 9 y 10 muestran dos vistas de un motor turbo-ventilador accionado por un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo mixto cortado axialmente en las que se indica el sentido de giro del rotor.

La figura 11 muestra la sección axial esquemática del anterior motor turbo-ventilador. El motor puede arrancarse insuflando aire comprimido desde una botella a la cámara de combustión, que es externa.

El aire fresco que entra por 14 pasa a través de los canales de compresión del rotor 15. La mayor parte del aire es expulsado por 48 para obtener empuje, la otra parte del aire bombeado se dirige a la voluta de compresión 30 y de ahí a la cámara de combustión. Tras suministrarle energía térmica sale de la cámara de combustión y entra en la voluta de expansión 32 que lo conduce hasta el rotor 15. El gas pasa por los canales de expansión del rotor 15 donde cede su energía y escapa finalmente al exterior por 20. Al aire de empuje 48 se le hace pasar por un estator 49 antes de abandonar el motor.

Nótese que el rotor se ha calificado como de flujo mixto ya que en esta configuración sí se aprovecha la componente radial del flujo que se comprime pues se aleja del eje de giro y el que se expande circula hacia el mismo.

En las próximas figuras puede observarse mejor la geometría de las láminas de este rotor que está diseñado para bombear un gran caudal de aire por su parte central pero imprimiéndole poca velocidad.

La figura 12 muestra perspectivas de la unión de una superficie

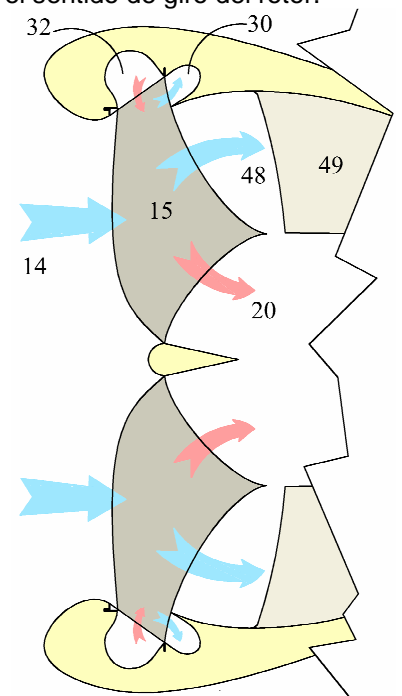


FIG. 11

pasiva de simetría dinámica y dos superficies activas de simetría dinámica del rotor 15 de la figura 11. Nótese la amplitud del canal de compresión frente al de expansión. La vista de la izquierda permite apreciar mejor las zonas de entrada tanto de los canales de compresión como los de expansión, mientras que la vista de la derecha permite apreciar mejor las zonas de salida.

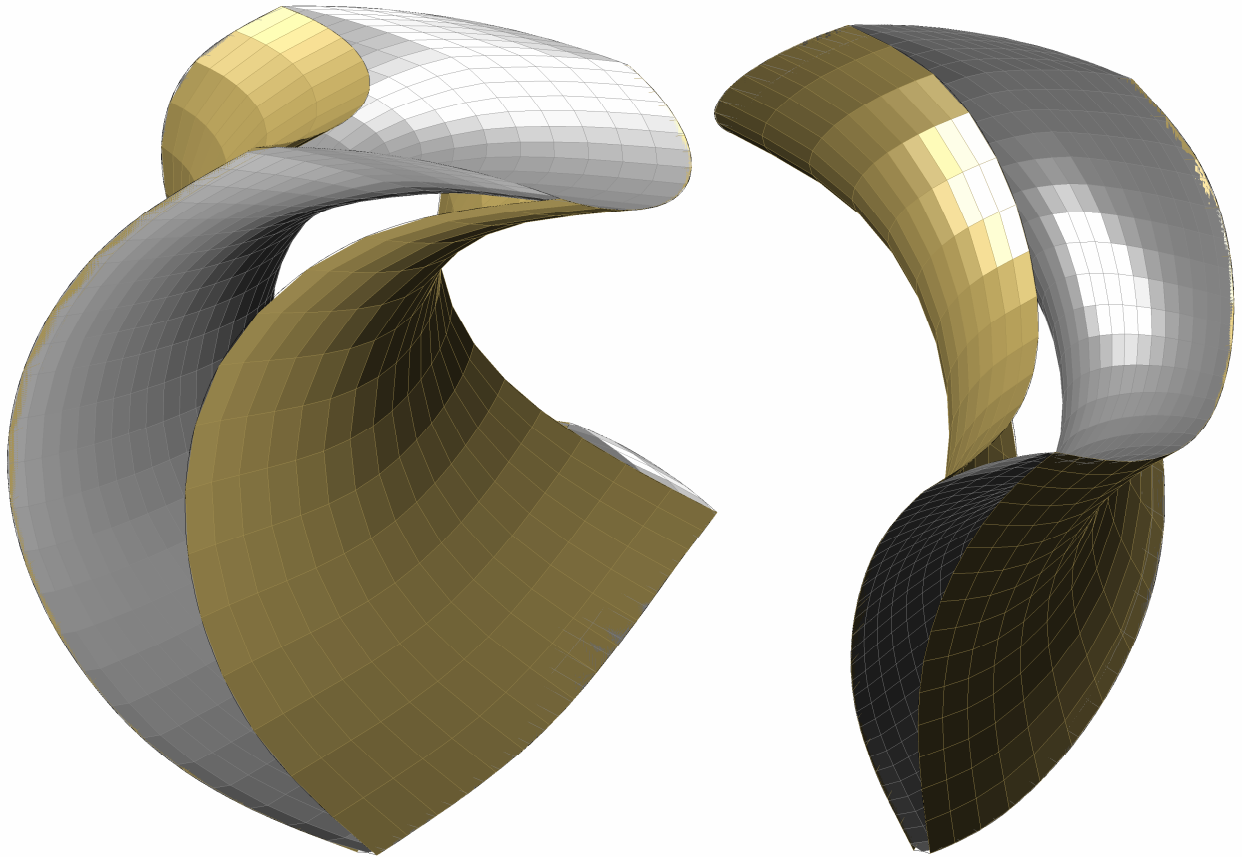


FIG. 12

El flujo radial puede entenderse como un caso límite del flujo mixto en el que la curvatura neta del flujo es nula y, por tanto, sería perfectamente factible un rotor radial diseñado con las mismas técnicas que uno mixto. Sin embargo, la flexibilidad de diseño proporcionada por el criterio de simetría dinámica permite otras soluciones constructivas más ventajosas para el flujo radial. Como se comprobará en las próximas figuras, es posible fabricar un rotor de láminas de simetría dinámica en el que el flujo que se comprime no tiene que cruzarse forzosamente con el flujo que se expande, y en el que no es necesario que los canales queden completamente formados por la superficie activa y la pasiva.

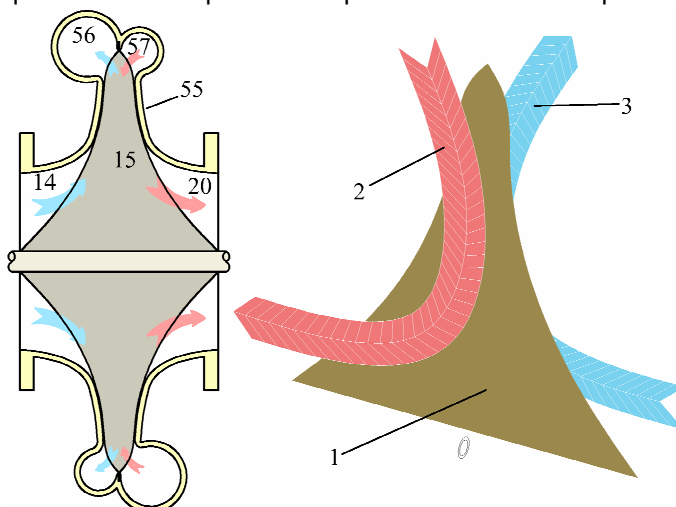


FIG. 13

La figura 13 muestra una sección axial esquemática de una turbomáquina que usa un rotor de láminas de simetría dinámica de flujo radial 15 para intercambiar energía entre dos corrientes de fluido. También se muestra la perspectiva de una superficie activa de simetría dinámica 1 de ese rotor. Pueden verse representadas mediante hileras de flechas las trayectorias del flujo que se expande 2 y del flujo que se comprime 3.

Nótese que en su zona central tanto el flujo que se expande 2 como el que se comprime 3 transcurren aproximadamente paralelos y que sus trayectorias no se cruzan.

El fluido que se comprime entra en la turbomáquina por 14, cerca del eje de giro, y pasa a los canales de compresión del rotor 15 donde recibe energía al circular radialmente hacia la voluta 56 en la periferia. El fluido que se expande llega por la

voluta 57, en la periferia, y pasa a los canales de expansión del rotor 15 donde cede energía al circular radialmente hacia el eje de giro para salir de la turbomáquina por 20.

La figura 14 muestra perspectivas del rotor 15 de la figura 13. Una de las características más diferenciadoras de este rotor de láminas de simetría dinámica para flujo radial respecto a los de flujo axial o mixto es que los canales de compresión y de expansión no quedan cerrados entre la superficie activa y la pasiva sino que una parte de ellos debe cerrarse por la carcasa de la máquina, tal como se ve en el punto 55 de la figura 13. Es una característica también común en las turbomáquinas radiales convencionales. Esta zona de los canales que se cierra por la carcasa coincide con la zona en la que el flujo que se expande 2 y el que se comprime 3 transcurren aproximadamente paralelos.

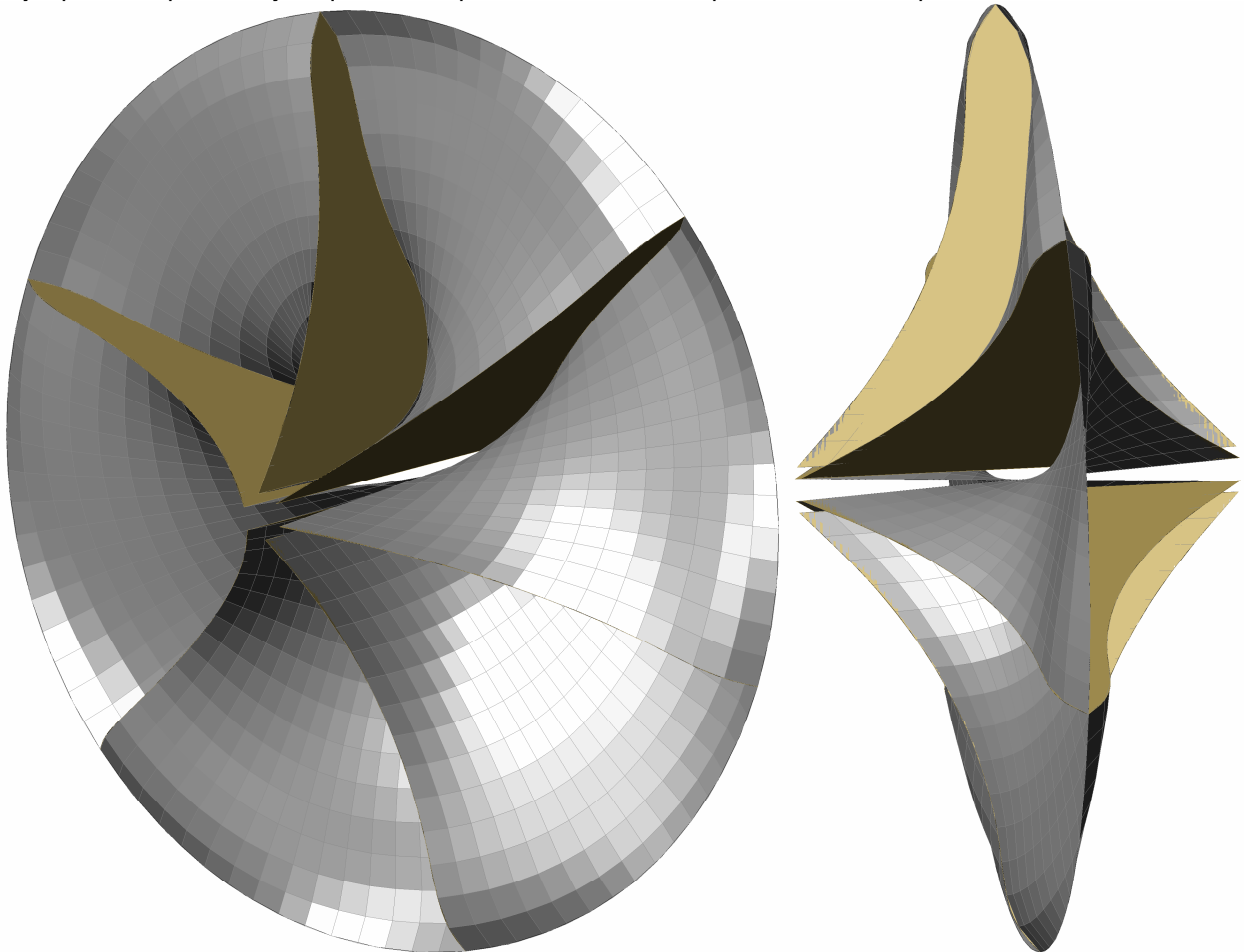
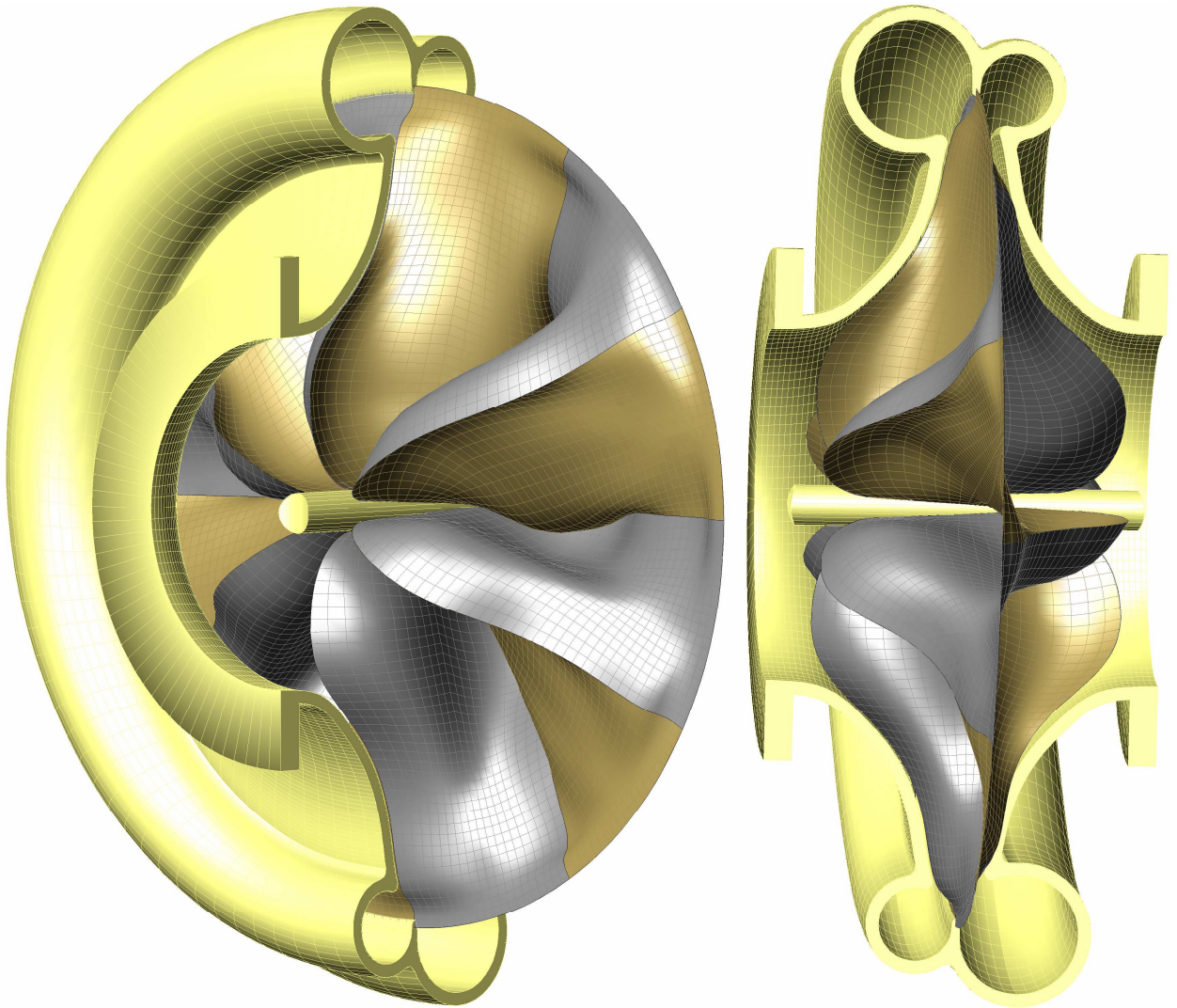


FIG. 14

En este ejemplo la geometría de las superficies es muy simple: una superficie activa plana y una superficie pasiva que se aproxima mucho a una superficie reglada. Si bien este diseño es perfectamente factible, puede ser optimizado dotando a las superficies del alabeo adecuado para que se adapte mejor al flujo de tipo axial que predomina en las zonas próximas al eje de giro tal como se muestra en la siguiente figura.

**FIG. 15**

Esta misma adaptación al flujo de tipo axial que predomina en las zonas próximas al eje de giro puede conseguirse también mediante el uso de aletas logrando un efecto similar pero con geometrías menos forzadas como se muestra en el rotor de la siguiente figura. Estas aletas, al contrario que las superficies de simetría dinámica, están bañadas por el mismo fluido por ambas caras, es decir, son una prolongación porque por sí mismas no cumplen el criterio de simetría dinámica, aunque sí lo cumple el resto de la superficie. Podrían usarse igualmente en rotores de láminas de simetría dinámica de flujo axial o mixto, pero son especialmente convenientes para los radiales ya que suele existir una zona donde el flujo es marcadamente axial.

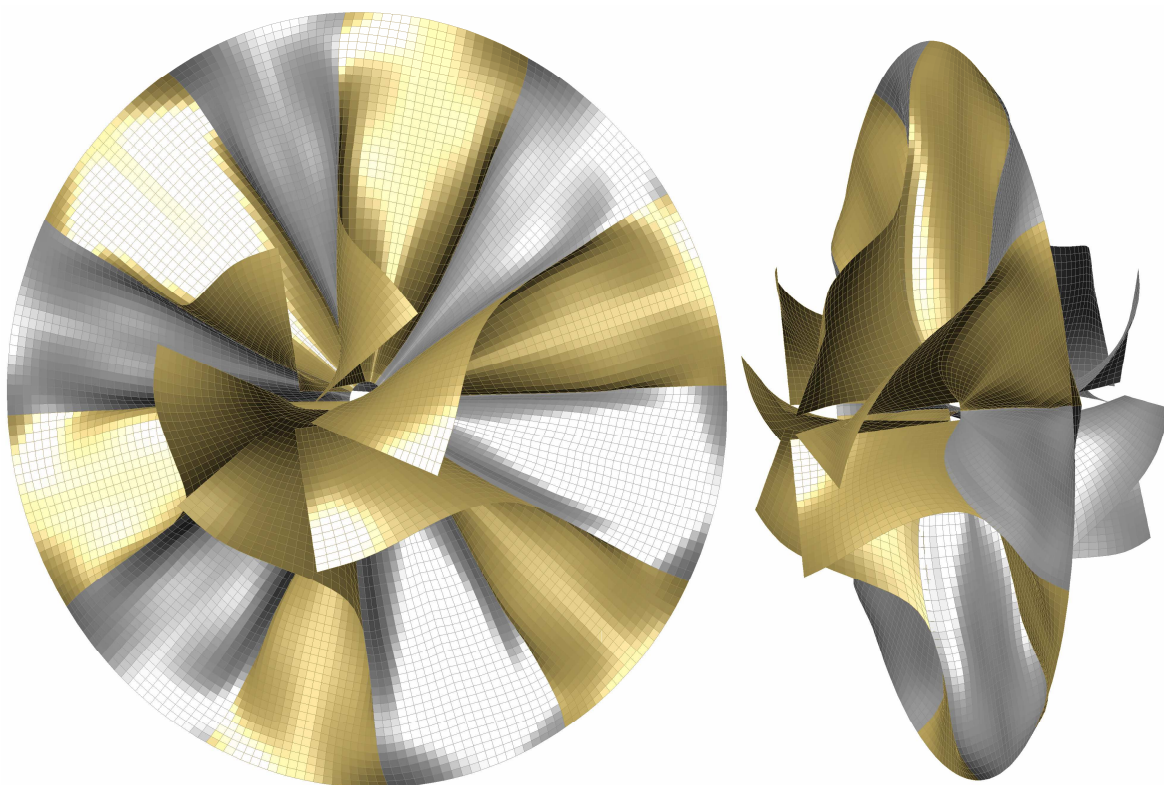


FIG. 16

Los rotores de láminas de simetría dinámica son igualmente susceptibles de ser combinados en soluciones constructivas con varias etapas de compresión-expansión como las mostradas en la siguiente figura.

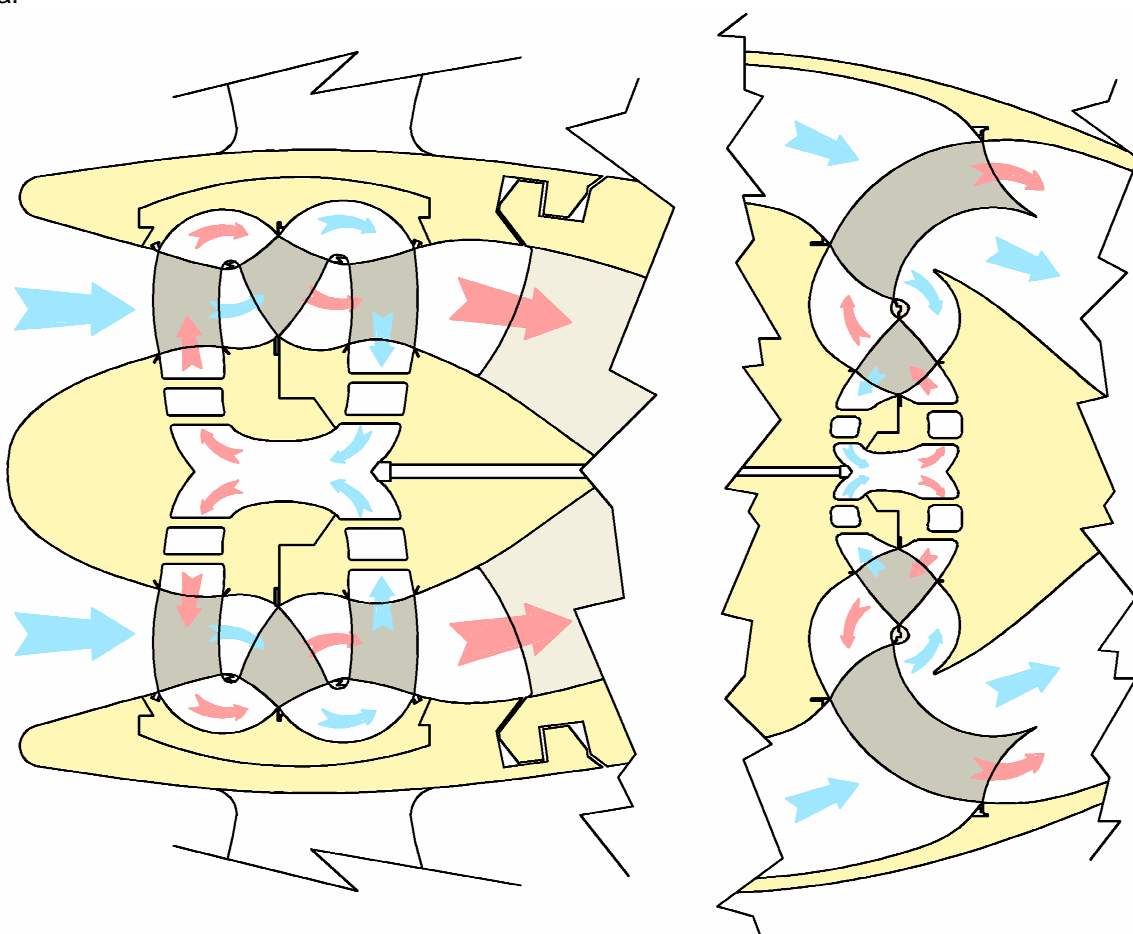


FIG. 17

OTROS DETALLES CONSTRUCTIVOS

Puesto que los rotores no solo interactúan con el fluido sino que están integrados en una máquina, será necesario, en general, que estén adaptados para desempeñar otras funciones por lo que opcionalmente las láminas pueden contar con apéndices en partes concretas de sus bordes a modo de ala de montaje que sirven como cojinete, como sello de estanqueidad, como equilibradores, como puntos de anclaje para las láminas en rotores desmontables o para albergar otros accesorios.

La figura 18 muestra la perspectiva de una superficie pasiva de simetría dinámica en la que se han añadido sobre sus bordes libres unos apéndices denominados alas de montaje. Estas alas de montaje son simplemente prolongaciones de la estructura de la superficie que pueden ser empleadas de diversas formas según la conveniencia de la aplicación. Están presentes en la superficie pasiva porque tiene bordes libres, pero podrían estar en la activa si también los tuviera. Normalmente servirán como cojinete para transmitir esfuerzos a la estructura de la turbomáquina en la que el rotor se integra, también como superficie contra la que realizar un sello de estanqueidad, como soporte para accesorios que deban ser accionados directamente por el rotor y como punto de anclaje con otros elementos. Cuando la turbomáquina integre varios rotores es probable que tanto el sellado como la transmisión de esfuerzos deban realizarse entre los propios rotores además de entre los rotores y la turbomáquina. Adicionalmente las alas de montaje acogerán los contrapesos que se deriven de la operación de equilibrado del rotor.

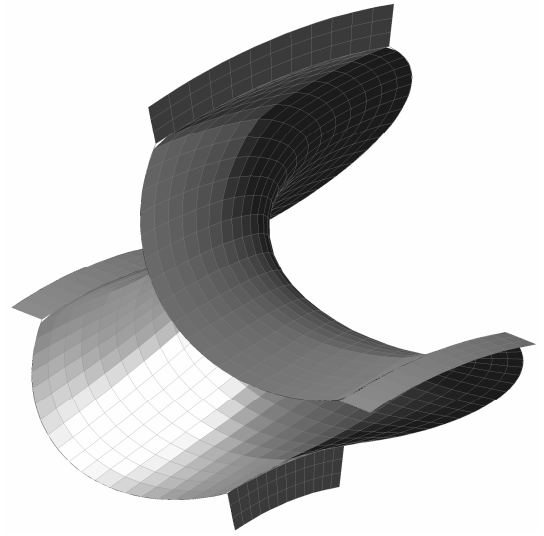


FIG. 18

La siguiente figura muestra perspectivas de un generador eléctrico seccionado que sirve para ilustrar diversos aspectos. El rotor de láminas de simetría dinámica para flujo axial está dotado de alas de montaje 22 que permiten realizar la función de cojinete y sello de estanqueidad así como soporte para un anillo exterior 23 y otro interior 21.

Si bien, desde el punto de vista operativo, esos anillos no son imprescindibles, se hacen convenientes por tratarse de elementos estructuralmente continuos que pueden conformarse con diseños más elaborados exigiendo para ello tan solo un torneado. Obviamente los anillos podrían unirse a las láminas sin requerir la existencia de alas de montaje. Pueden ser empleados para desempeñar las mismas funciones que las alas de montaje y, en particular, como chasis de anclaje para las superficies de simetría dinámica en rotores desmontables. Una técnica razonable para la construcción de rotores desmontables para flujo axial o mixto será utilizar como elemento constructivo al conjunto resultante de unir mediante soldadura una superficie activa, que no tiene alas de montaje, y una superficie pasiva, que sí tiene alas de montaje en sus bordes libres.

Adicionalmente, el anillo exterior 23 alberga como accesorios a los elementos electromagnéticos móviles 9 que interactúan con los elementos fijos 10 alojados en la estructura de la máquina.

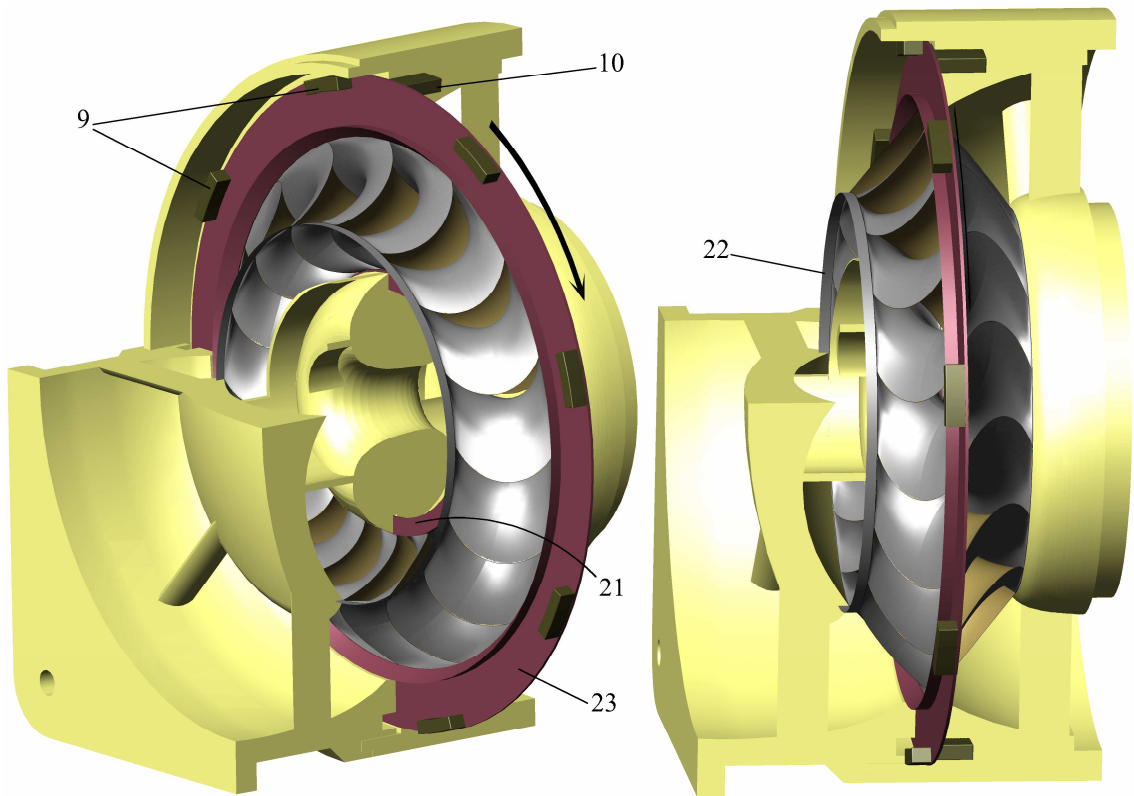


FIG. 19

Tras eliminar de la vista al rotor y sus anillos se muestra a continuación un detalle de la cámara de combustión de ese generador que se encuentra en su zona central. El flujo de aire que se comprime 3 entra en la voluta espiral de compresión tras abandonar los canales de compresión del rotor y llega, ya comprimido, a la cámara de combustión donde recibe energía térmica. Después el flujo de gases calientes 2 es conducido desde la cámara de combustión a los canales de expansión del rotor a través de la voluta espiral de expansión.

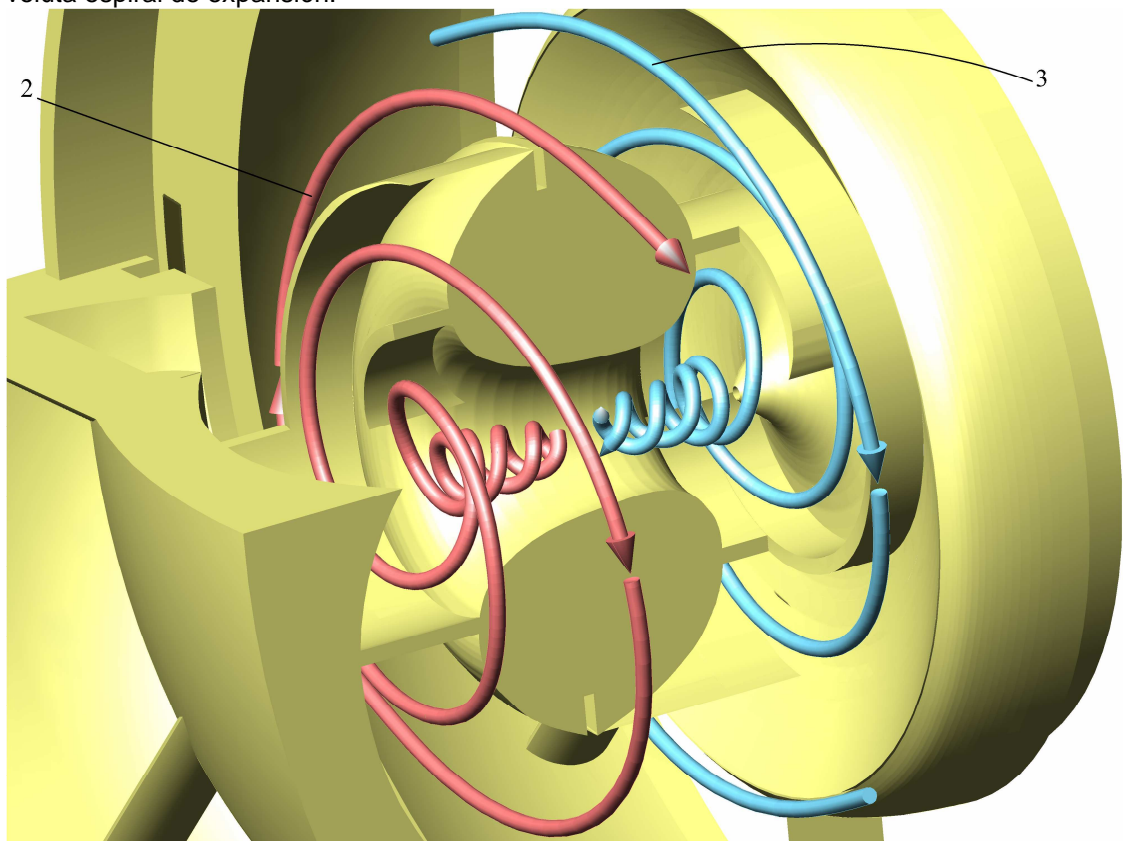


FIG. 20

VENTAJAS

Es de esperar que este tipo de diseños presente varias ventajas ya que se acorta la longitud y el peso del motor eliminando la necesidad de un eje que transmita la potencia desde la turbina hasta el compresor, se refrigeran los materiales de los rotores permitiendo mayores temperaturas y menor proporción de exceso de aire, la propia acción de refrigeración implica un efecto recuperador de calor que mejora la eficiencia térmica, las láminas están sometidas a una menor tensión mecánica gracias a la compensación parcial de la presión del fluido por ambas caras de sus superficies. La obligación de cruzar el fluido que se comprime y el que se expande en el mismo rotor no implica necesariamente tener que provisionar secciones sensiblemente mayores que en un rotor convencional, pues lo que se consigue con la simetría dinámica es aprovechar los espacios sin uso que quedarían en el interior de los álabes del rotor convencional, sobre todo si se pretenden usar geometrías de alta presión. Tampoco es desdeñable el hecho de que la menor inercia de los rotores pueda permitir emplear como procedimiento de arranque la proyección de un chorro de aire comprimido directamente en las cámaras de combustión pudiendo así reemplazar otros sistemas convencionales más pesados y lentos.

Con el criterio de simetría dinámica se renuncia a la metodología clásica de diseño 2D y se aprovecha la potencia de las herramientas de ingeniería actuales para concentrar el esfuerzo tecnológico en el diseño de la geometría 3D no convencional de dos tipos de lámina alabeada y su posterior manufactura. Aunque esta tecnología se encuentra en una fase muy temprana de su desarrollo, es necesario mencionar que, aparte de las ventajas operativas, también se han depositado esperanzas en que la técnica de construir los rotores esencialmente uniendo dos tipos de lámina alabeada constituya un importante avance en el proceso industrial de la fabricación de turbinas de gas.

APLICACIÓN INDUSTRIAL

Si bien las ventajas pretendidas son deseables en cualquier aplicación de motores de turbina de gas, el concepto de simetría dinámica puede ser particularmente útil en la fabricación de turbinas para pequeñas potencias y microturbinas, unidades de generación de energía portátiles, generación de energía eléctrica distribuida, motores auxiliares para sustentación vertical en aviones VTOL, generadores primarios en la propulsión híbrida, motores de turbina de arranque rápido, turbosoplantes, etc.

Una aplicación prometedora de esta tecnología se encuentra en el campo militar donde la fabricación automatizada de rotores de láminas de simetría dinámica desechables daría lugar a una nueva generación de plantas motrices muy económicas para accionamiento de máquinas de combate no tripuladas o misiles de crucero. En este tipo de plataformas, de un solo uso o con una esperanza de vida operativa limitada, en las que resulta deseable la máxima sencillez sin renunciar a la eficiencia, permitiría abaratar no solo los costes de producción sino también los de mantenimiento preventivo reduciendo estas operaciones a la sustitución integral de los rotores.

COMPARATIVA CON EL ESTADO DE LA TÉCNICA ANTERIOR

Es bien conocido que uno de los factores más limitantes para el diseño de turbinas de gas es la alta temperatura de combustión necesaria para un buen rendimiento, pero que afecta negativamente a la resistencia de los materiales. Para solventar este problema, aparte de mejorar las aleaciones, se han propuesto diversas técnicas cuyo objetivo es refrigerar los álabes de la turbina de gases calientes permitiendo que trabajen a mayores temperaturas. Existen sistemas basados en proveer a los álabes de circuitos de refrigeración mediante esquemas de acanaladuras más o menos complejos por donde debe circular un fluido refrigerante. Otro sistema consiste en emplear materiales porosos o practicar orificios en puntos estratégicos para conseguir que la superficie del álabe quede recubierta de una fina película de un gas frío inyectado a presión desde su núcleo que lo aísla de la alta temperatura de los gases procedentes de la combustión. Hay otro sistema más en el que se explota la idea de emplear los álabes huecos de una turbina axial convencional también como compresor radial haciendo circular el aire fresco a través de su interior antes de entrar en el combustor para después redirigir mediante un bucle los gases calientes procedentes del combustor contra los álabes de la turbina axial. De este modo se consigue refrigerar los álabes de la turbina que son simultáneamente bomba radial y motor axial.

Este sistema de los álabes huecos, aunque no puede considerarse propiamente un antecedente, sí presenta un importante paralelismo con el criterio de simetría dinámica ya que también aquí es el aire fresco que se va a comprimir el que se encarga de refrigerar directamente las superficies del rotor que están en contacto con los gases procedentes del combustor haciendo que funcione a la vez como bomba y como motor. Sin embargo, la idea de concebir un álabe hueco como un tubo por el que también puede circular radialmente el aire, aunque útil y muy intuitiva, impone ciertas limitaciones potencialmente incómodas pues condiciona definitivamente la configuración de la máquina al disponer la salida de aire comprimido hacia la periferia y, a la vez, condiciona las transiciones del flujo radial desde y hacia el rotor

por la geometría tubular de los álabes. Estas limitaciones pueden soslayarse gracias a la estrategia de la simetría dinámica que proporciona perfiles de entrada y salida suaves sin la necesidad de añadir elementos extraños para eliminar discontinuidades en el flujo y, al mismo tiempo, permite soluciones constructivas innovadoras respecto a la de los álabes huecos eliminando los condicionamientos de la compresión radial y de las formas convencionales de álabes existentes.

ADVERTENCIA POR PREJUICIO DE RECHAZO A LO DESCONOCIDO

El miedo y el escepticismo ante una idea nueva o un cambio radical es una reacción natural, pero puede resultar en una percepción engañosa de una realidad que es mucho más simple de lo que parece. Todos los motores de turbina de gas tienen un compresor, una turbina de gases calientes y, si las circunstancias lo permiten, un sistema de refrigeración y un recuperador de calor para aumentar su rendimiento. Las turbinas de simetría dinámica tienen exactamente los mismos elementos, pero gracias a su arquitectura innovadora todos esos elementos se integran de forma simple en un único rotor ligero y compacto. Por todo ello la simetría dinámica no ha sido concebida en ningún momento como una tecnología hipotética, es decir, **no se investiga para averiguar si puede funcionar, sino para averiguar la mejor manera de que funcione**. Sin embargo, durante la fase de difusión de esta tecnología se ha podido constatar que algunas personas sufren un "efecto rechazo" inmediato e irreflexivo al ver la geometría de un rotor de láminas de simetría dinámica. El funcionamiento de los rotores y las curvaturas de las superficies, muy alejados de lo convencional, a veces provocan que la primera impresión sea que se trata de algo extraordinariamente complejo y que, probablemente, presente problemas de calidad de flujo que lo hagan difícilmente viable. Es cierto que los canales por los que circula el fluido en un rotor de láminas de simetría dinámica están cerrados por superficies con alabeos llamativos que confieren a los mismos formas caprichosas.



FIG. 38



FIG. 39

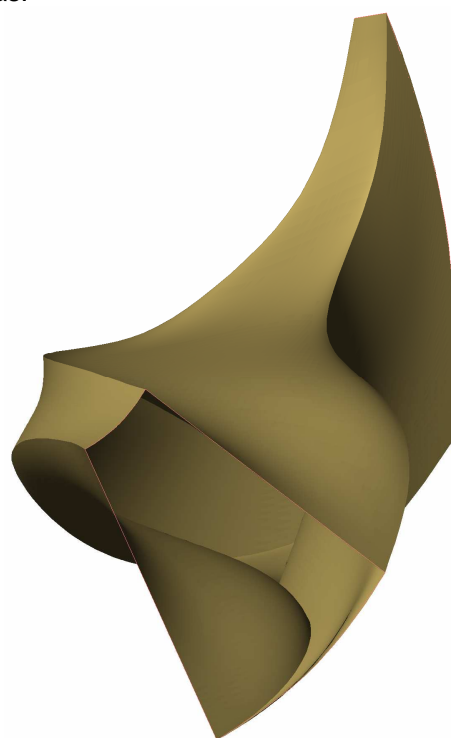


FIG. 40

En las figuras anteriores se han ilustrado diferentes perspectivas de uno de estos canales con formas tortuosas y delimitados por superficies con alabeos extraños. A primera vista se podría intuir que semejante geometría no es la idónea para conseguir un flujo en condiciones óptimas para el trabajo de una turbina.

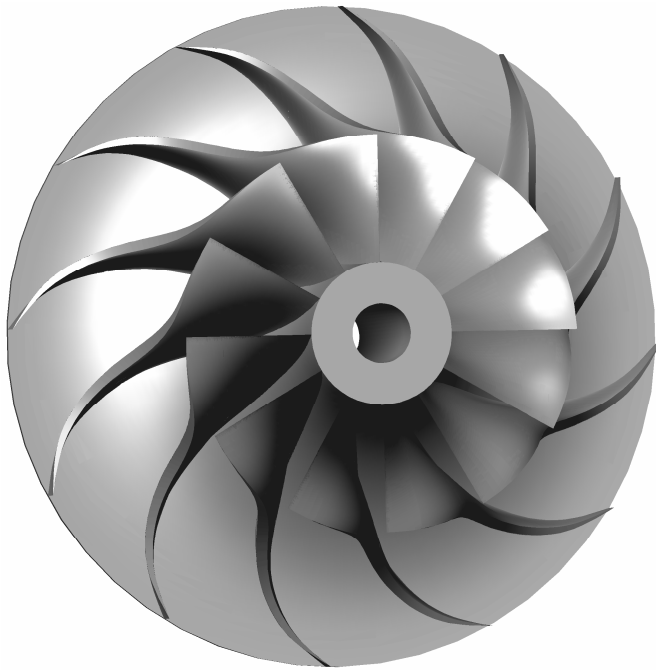


FIG. 41



FIG. 42

El rotor de las figuras anteriores corresponde a un compresor centrífugo, absolutamente convencional y no particularmente moderno, similar al que se usa en muchas turbinas de gas de pequeña potencia o en los sistemas de sobrealimentación de los motores de explosión. Puesto que es convencional, su visionado no provoca la impresión de que sea especialmente probable que aparezcan problemas de calidad de flujo cuando el fluido circule por sus canales. Las figuras 38, 39 y 40 no corresponden al canal de un rotor de láminas de simetría dinámica sino al de este rotor centrífugo convencional. Y a pesar de la convencionalidad de su arquitectura, cualquier experto sabe que si está mal diseñado o simplemente se le hace funcionar fuera de sus parámetros de diseño, también funcionará de manera deficiente.



FIG. 43

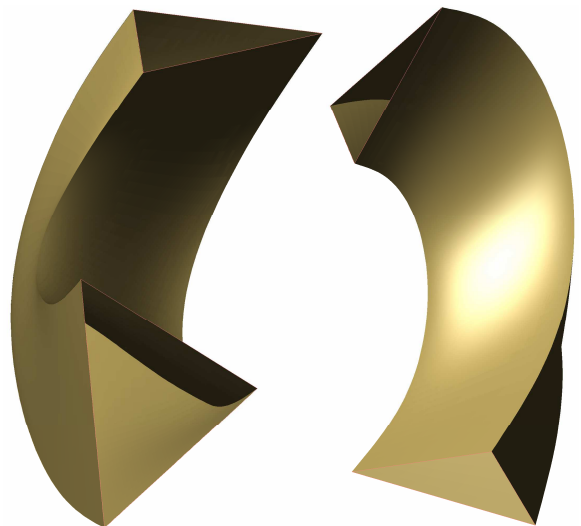


FIG. 44



FIG. 45



FIG. 46

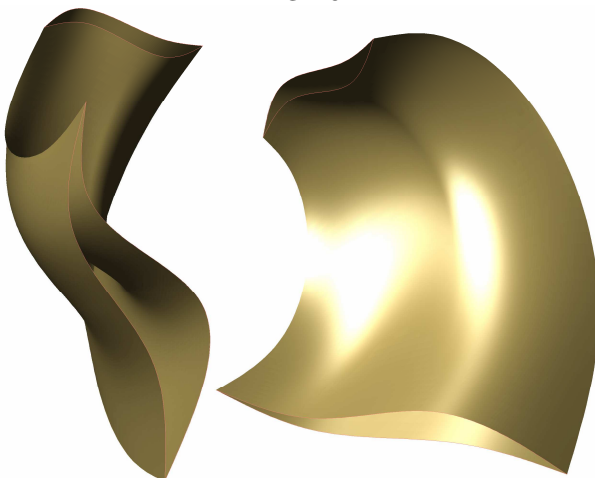


FIG. 47

La simetría dinámica es un concepto de diseño muy innovador desde un punto de vista arquitectónico, pero desde un punto de vista fluidodinámico, las turbinas de simetría dinámica no son tan distintas de las convencionales. En todas existen unos canales de compresión y otros de expansión delimitados por superficies currentiformes con las curvaturas y orientaciones necesarias para realizar sus respectivas funciones. Los canales solo son conductos por los que circula un fluido y podrían concebirse de muy diversas formas. Unas resultarán aparentemente más convencionales y otras menos, pero el comportamiento del fluido no queda condicionado por el mero hecho de que esa geometría sea o no convencional. Como consecuencia, no hay razones objetivas para predecir problemas en la simetría

dinámica que no puedan presentarse igualmente en un diseño convencional y que no puedan tratarse exactamente de la misma manera.

Su viabilidad física nunca ha estado en cuestión, pero, como con cualquier otra novedad, existe incertidumbre y la prudencia exige que se proceda de modo sistemático llevando a cabo investigaciones que arrojen resultados cuantitativos. Simplemente se planifican estudios de detalle que permitan descubrir las mejores prácticas de diseño al aplicar la filosofía de simetría dinámica con el fin de poder aprovechar sus ventajas y conocer sus limitaciones y peculiaridades.

Asociar un alto grado de innovación con una alta probabilidad de mal funcionamiento sin ninguna explicación es, sencillamente, una predisposición conductual absurda. Al final, el buen o mal funcionamiento de un diseño dependerá de la calidad del trabajo de ingeniería que se haya invertido en él, tanto en una turbina convencional como en una no convencional. Y por este motivo **el experto que estudia por primera vez el criterio de simetría dinámica debe estar prevenido ante la posibilidad de sufrir este prejuicio cognitivo**, relativamente común, que desencadena conclusiones espurias no fundadas en un análisis científico cuidadoso sino en una primera impresión subjetiva y precipitada de algo que rompe con lo establecido.

Aunque el criterio de simetría dinámica pretende simplificar y mejorar la construcción de turbinas de gas, se debe tener presente que las características de las láminas de simetría dinámica casi nunca podrán ser asimiladas a una geometría bidimensional por lo que su comprensión requiere de una capacidad de visión espacial suficientemente desarrollada y herramientas de ingeniería 3D.

INVESTIGACIONES EN CURSO

Consideraciones de diseño elementales para una microturbina

Uno de los grandes desafíos actuales en la industria de las turbinas de gas es la fabricación de turbinas de muy pequeña potencia que sean capaces de ofrecer rendimientos similares a los de las grandes turbinas. La microturbina más sencilla posee una etapa de compresión y una de expansión acopladas en el mismo eje. Con esta premisa se efectúa un análisis cualitativo de algunas de las características que

influirían en el diseño de una microturbina equipada con un único rotor de láminas de simetría dinámica.

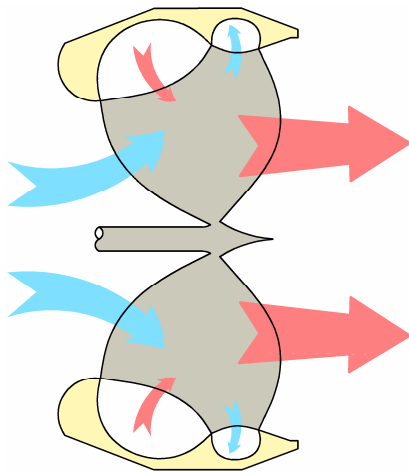


FIG. 22

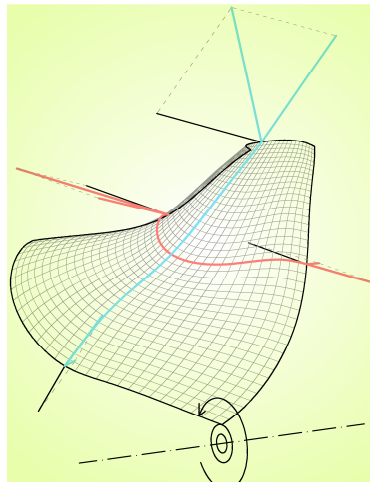


FIG. 23

La configuración más simple para el objetivo pretendido es la correspondiente a un rotor de flujo mixto, es decir, una etapa de compresión-expansión como la representada por la sección axial de la figura 22. Se podría usar igualmente un rotor de flujo radial de láminas de simetría dinámica, pero se ha estimado que el de flujo mixto tiene la ventaja de que solo está en contacto con la carcasa a través de las alas de montaje y ello exige una menor precisión en su fabricación.

Por lógica, la parte accesible del eje se encuentra en la zona de

aspiración protegido del calor y elementos agresivos de los gases de exhaustación. Además, ello permite equilibrar un poco la geometría del rotor ocupando espacio en la abertura de aspiración, que por cuestiones termodinámicas necesita una sección de paso menor que la de exhaustación.

Hay que recordar que tanto la superficie de presión como la de succión delimitan simultáneamente tanto a los canales de compresión como a los de expansión y, por consiguiente, la geometría de cualquiera de ellas influye en ambos tipos de canales. Sin embargo, es cierto que en los canales de compresión influye principalmente la curvatura en una determinada dirección, mientras que en los canales de expansión influye principalmente la curvatura en la otra dirección, tal y como se representa en la figura 23.

La corriente de fluido más energética es la que sale de la cámara de combustión, motivo por el cual las consideraciones que se realicen respecto a las curvaturas principales de los canales de expansión van a condicionar la velocidad de rotación, velocidad a la que posteriormente habrá que adaptar las curvaturas principales de los canales de compresión.

La amplitud de la sección de entrada de los canales de expansión será mayor cuanto menor sea la componente paralela al plano axial del vector velocidad absoluta con el que los gases que salen del combustor inciden sobre los canales de expansión. Aunque la simetría dinámica permite un diseño flexible, para conseguir geometrías menos forzadas, sobre todo la superficie de succión, se hace conveniente proveer una sección de entrada no demasiado estrecha en los canales de expansión. Ello se consigue haciendo que el ángulo de incidencia de los gases procedentes del combustor sea lo suficientemente tangente a la turbina. Esto también contribuirá a que el empuje aerodinámico axial correspondiente a los canales de expansión sea más reducido.

Una vez elegida la velocidad de rotación en función de las necesidades de los canales de expansión, normalmente se obtendrá como resultado que la salida de los canales de compresión es sensiblemente estrecha en comparación con la entrada. Ello no supone ningún problema de diseño ya que por la otra cara de esa zona de la superficie activa el canal de expansión es muy fino y conduce una pequeña proporción del flujo de expansión.

Para conseguir una velocidad de rotación no demasiado alta en una turbina con una sola etapa de expansión, que tiene que absorber toda la potencia, se trabajará con geometrías de alta presión lo que implica que el área de paso de los canales se estrecha en su parte central respecto a la entrada o salida (fig. 50). Eso es algo que se consigue de forma natural al emplear la estrategia de simetría dinámica. Aun así, el diseño ofrece muchos grados de libertad y se puede recurrir a la técnica de ensancharlos por el centro para adecuar la sección de paso como se ilustra en las figuras 48 y 49.

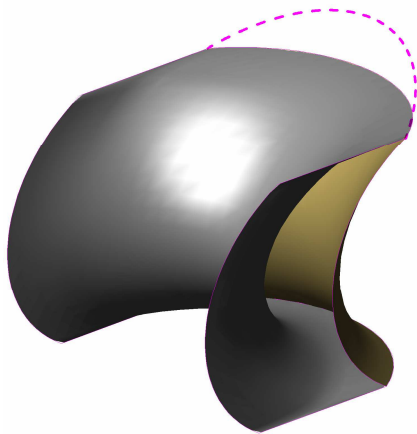


FIG. 48

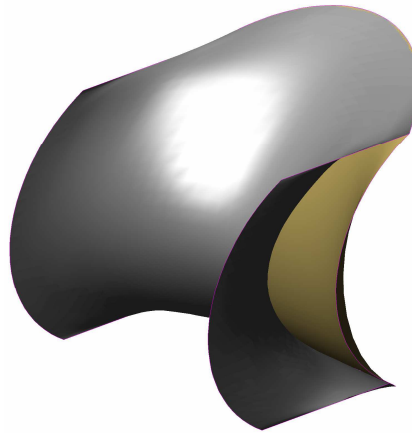


FIG. 49

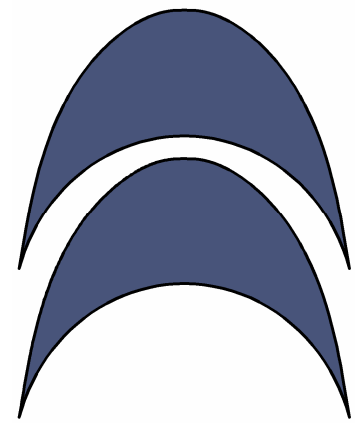


FIG. 50

En realidad, conseguir una velocidad de rotación baja no es el único factor a considerar para la geometría. En una turbina de simetría dinámica hay que diferenciar claramente entre refrigeración y recuperación de calor. Ambos objetivos se consiguen mediante un mismo mecanismo físico, la transferencia de calor entre los canales de compresión y expansión, pero implican condiciones distintas. Si solo interesara la refrigeración sería conveniente usar algún material de recubrimiento sobre la superficie de los canales de expansión que, aparte de protección química, proporcionara aislamiento térmico. En el caso de la recuperación de calor habría que evaluar la repercusión de dicho recubrimiento y también de la superficie de intercambio relacionada con el número de pares de láminas del rotor. Además, la recuperación de calor es efectiva cuando lo que se recupera es calor residual, es decir, posterior a la extracción de la potencia útil de los gases calientes y ello implica que dichos gases circulen en unas determinadas condiciones que finalmente tendrán gran influencia en la geometría de las láminas.

El uso de geometrías de alta presión también conllevaría, en general, el uso de bordes de ataque afilados. Si bien es una decisión que depende de criterios fluidodinámicos, los bordes afilados pueden resultar particularmente interesantes si se prevé que la construcción del rotor se lleve a cabo mediante la soldadura de las láminas.

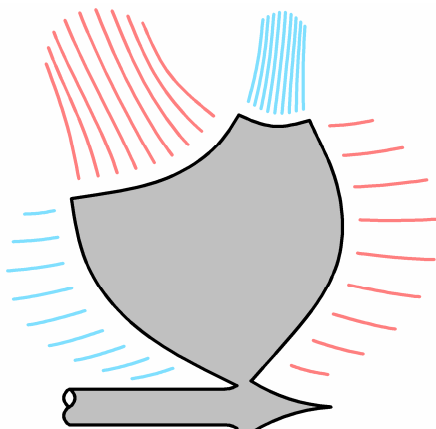


FIG. 51

Al contrario que en los diseños convencionales, aquí la sección de los canales no es aproximadamente trapezoidal sino con forma de vaina afinada en los extremos. Ello puede repercutir en que las velocidades del fluido a la entrada y salida de los canales presenten una distribución tal que sea menor cerca de los extremos y mayor en el centro.

Para comprobar hasta qué punto se manifiesta este fenómeno se puede realizar un cálculo de mecánica de fluidos simple con la geometría preliminar del rotor obteniendo un conocimiento cualitativo de dicha distribución que mejorará el cálculo inicial de dimensiones de las secciones de entrada y salida de los canales del rotor.

Adicionalmente, mediante este cálculo también puede obtenerse conocimiento cualitativo útil sobre las distancias más adecuadas entre la superficie de presión y la de succión con el fin de evitar separación de flujo o vorticidad excesiva.

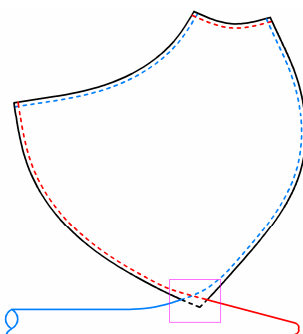


FIG. 52

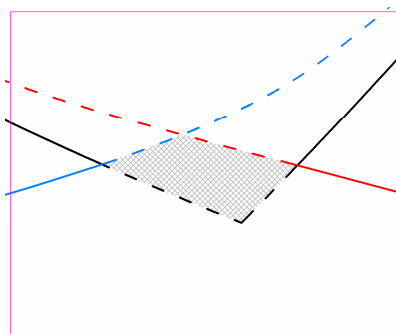


FIG. 53

La región de unión de las láminas al eje debe ser capaz de transmitir el par aerodinámico al mismo. Una superficie de presión se une a la siguiente superficie de succión por los bordes rayados en azul en la figura 52 para formar el canal de compresión. A su vez, esa superficie de succión se une a la siguiente superficie de presión por los bordes rayados en rojo para formar el canal de expansión, y así sucesivamente.

En la zona de unión con el eje (fig. 53) la interferencia entre las láminas crea un mazacote de material que sirve para unirlos con él. Aunque la geometría de la región de unión puede modelarse de una manera currentiforme sin problemas, esta zona no es particularmente importante desde el punto de vista fluidodinámico por lo que puede adaptarse fácilmente para cumplir su función. Dimensionar el eje es sencillo y como regla de diseño preliminar se puede establecer la norma de que el área de la superficie cilíndrica en la que las láminas se unen al eje sea igual o mayor que el área de la sección del propio eje.

Microturbina de 100 kW: geometría del rotor

Como primer ejercicio de aplicación de la estrategia de simetría dinámica se proyecta una microturbina de gas con 100 kW de potencia al eje configurada con un único rotor de flujo mixto. Este estudio permitirá visualizar geometrías más realistas y comparar los resultados obtenidos con los de otras microturbinas convencionales. Para el diseño se considerarán los siguientes condicionantes:

- La potencia al eje será de 100 kW \pm 5 kW.
- El rotor estará fabricado en INCONEL 738 o material similar para turbinas.
- El combustible será gasolina o un combustible líquido similar.
- Aire estándar: 15 °C, 760 mm Hg.
- Se utilizarán los márgenes de seguridad habituales en la industria.

El proceso de optimización del diseño deberá buscar el máximo rendimiento y el mínimo peso del rotor cumpliendo los anteriores requisitos. A continuación se describen los pasos que conducen al modelo preliminar que después será evaluado y optimizado mediante el software de cálculo numérico.

El primer paso para trabajar con la filosofía de simetría dinámica es liberarse de los prejuicios y condicionamientos que bloquean la originalidad y aclarar algunos conceptos que habrá que tener presentes durante todo el proceso:

- Innovar es esencialmente romper con lo establecido, pero que algo no sea convencional no significa que sea absurdo o muy complejo.
- Las trayectorias del fluido no necesitan ser bidimensionales o casi bidimensionales. El fluido puede describir trayectorias tridimensionales pues lo realmente importante son las condiciones termodinámicas al inicio y al final de dichas trayectorias.
- Las superficies por las que transcurre el fluido no necesitan ser aproximadamente desarrollables ni responder a perfiles bidimensionales extrudidos. Una geometría tridimensional con alabeo irregular también puede conducir correctamente al fluido si está adecuadamente diseñada.
- En muchas ocasiones un factor que produce efectos negativos simultáneamente provoca otros positivos que deben ser ponderados antes de descartarlo.
- Un rotor de láminas de simetría dinámica es a la vez compresor, turbina y recuperador de calor. Esa interacción provoca que su diseño tenga más grados de libertad que los que hay en cada uno de los elementos por separado, pero solo se diseña un elemento y no tres.

Teniendo en cuenta los anteriores condicionantes, asumiendo valores tentativos para ciertos parámetros y mediante la formulación termodinámica elemental del ciclo Brayton es posible estimar las variables de funcionamiento de la turbomáquina y las secciones que han de tener las entradas y salidas de los canales de compresión y expansión del rotor. Con esos datos se puede esbozar una sección axial de la microturbina. Con diagramas de velocidades se calculan las orientaciones principales del fluido en las entradas y salidas de los canales lo que, a su vez, permite dibujar las curvas tridimensionales básicas que van a definir la geometría de las láminas del rotor.

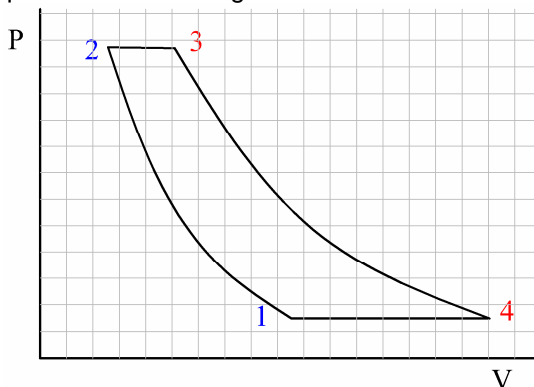


FIG. 21

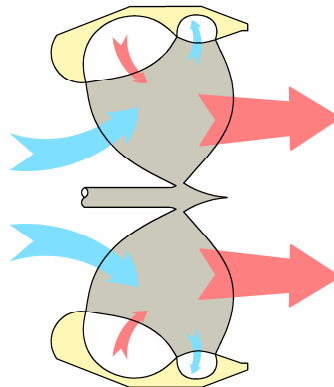


FIG. 22

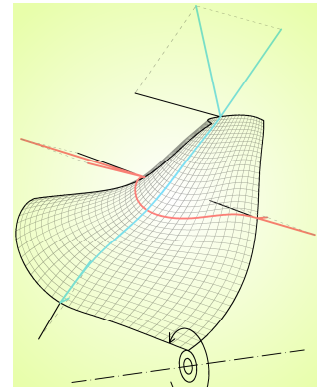


FIG. 23

A continuación se trabaja en el modelador 3D para diseñar una superficie de presión de simetría dinámica suavizada y con los bordes orientados según los vectores de velocidad del fluido relativos a la superficie.

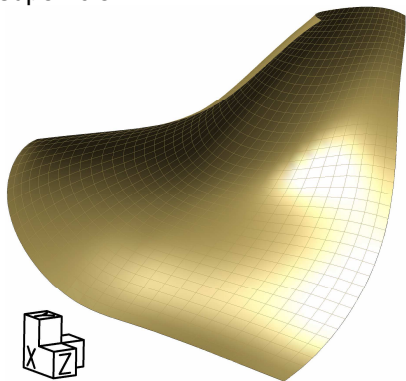


FIG. 24

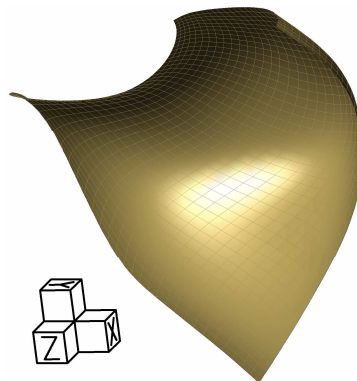


FIG. 25

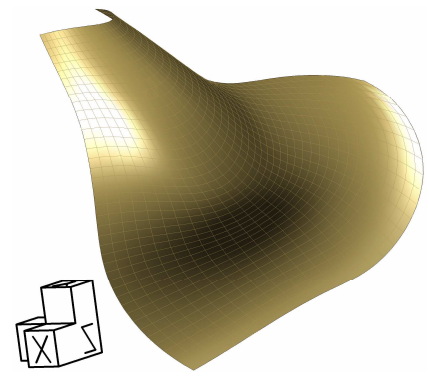


FIG. 26

Como era previsible, las muy diferentes propiedades termodinámicas del fluido que se comprime y el que se expande provocan que la geometría real se aleje bastante de la teórica simetría. Obsérvese que los canales de compresión tienen su salida orientada perpendicularmente al eje de giro para evitar la componente axial de los empujes generados por el flujo de aire que se comprime a la vez que ese mismo empuje contrarresta la fuerza centrífuga sobre las láminas. Disminuir la presión en la descarga de los canales de compresión fuerza a que la velocidad del flujo aumente. Ello podría no tener sentido en un diseño convencional, pero en el rotor de láminas de simetría dinámica la consiguiente disminución de temperatura podría mejorar la refrigeración por lo que es un factor a ponderar.

Tras elegir de manera tentativa el número de superficies de presión ya puede visualizarse el aspecto del rotor a falta de las superficies de succión. Hay que considerar que un número elevado de láminas empeora la fabricabilidad y aumenta la superficie de contacto con sus pérdidas asociadas, pero a la vez disminuye la carga sobre las mismas y mejora el efecto recuperador de calor.

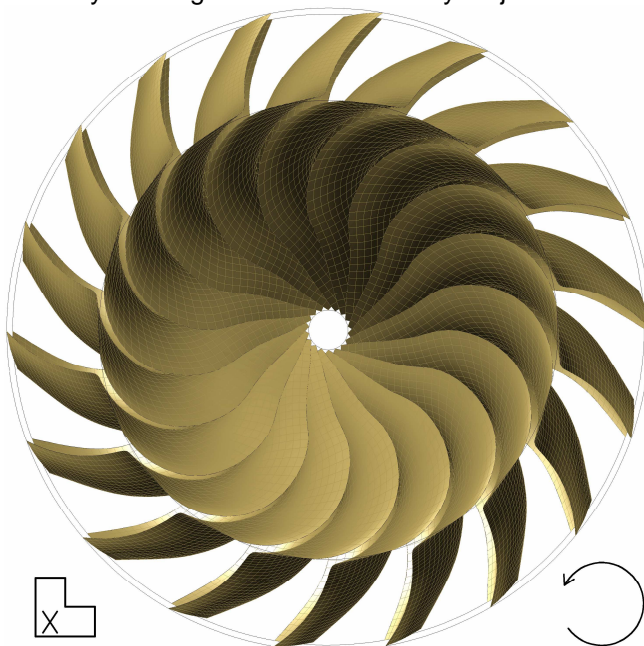


FIG. 27

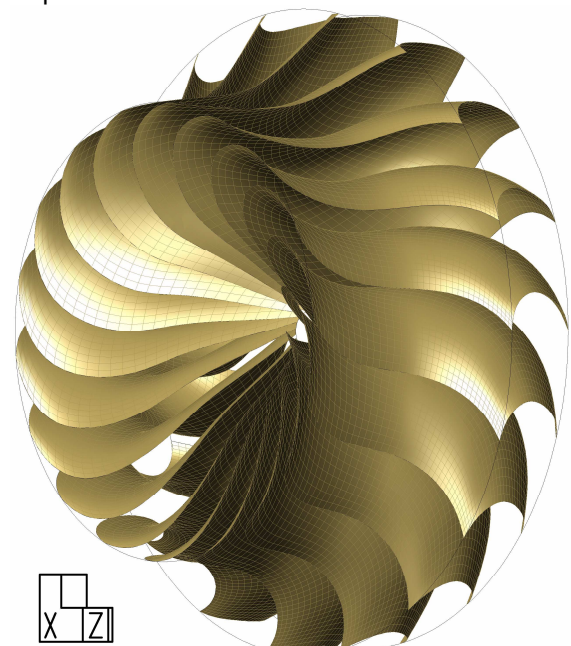


FIG. 28

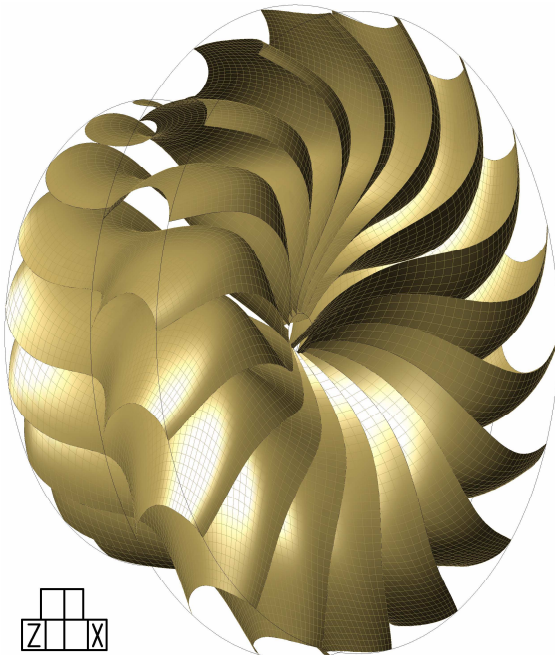


FIG. 29

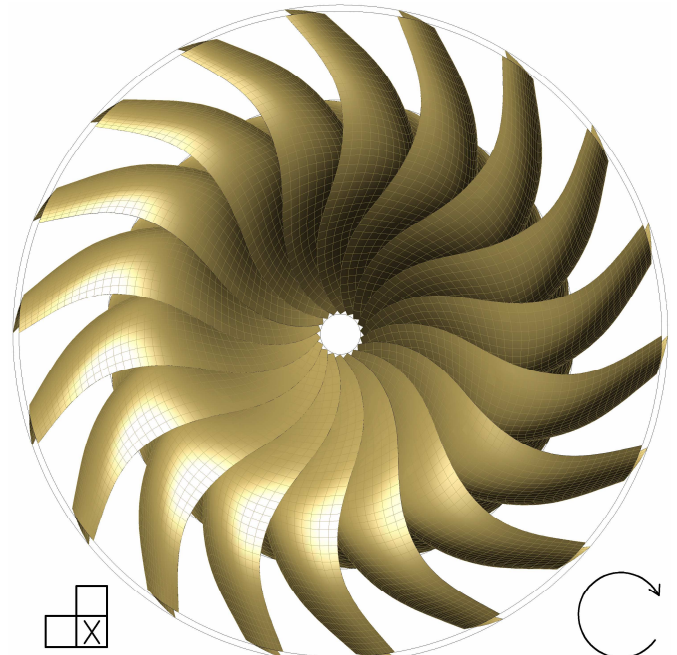


FIG. 30

Para diseñar la superficie de succión de simetría dinámica se parte de las curvas que definen la de presión y se deforman convenientemente para que los canales de compresión y expansión tengan la dimensión adecuada a las condiciones termodinámicas de sus respectivas corrientes de fluido. Obsérvese que en el rotor de láminas de simetría dinámica los canales son afinados en la zona de unión de la lámina de presión con la de succión por lo que el diseño de la geometría de la zona central es prioritario respecto al diseño de los bordes que conducen una proporción menor del flujo.

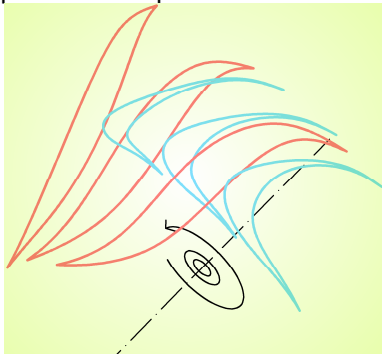


FIG. 31

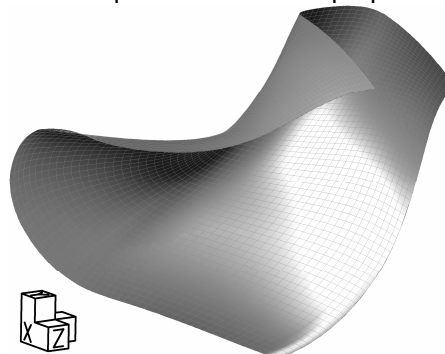


FIG. 32

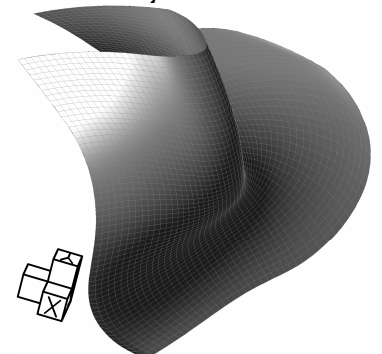


FIG. 33

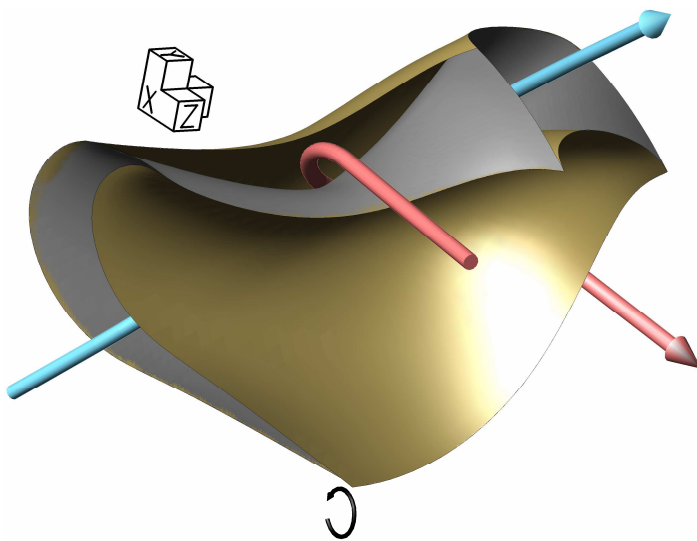


FIG. 34

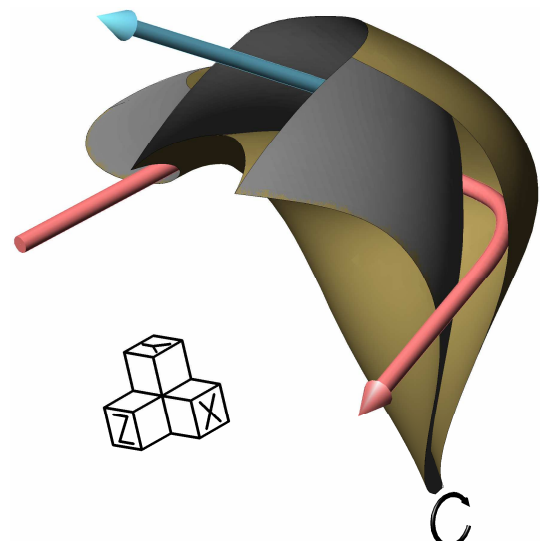


FIG. 35

Finalmente se obtiene el diseño preliminar completo del rotor de la microturbina. Tras asignar espesores provisionales a las láminas y mallar el modelo, este puede ser introducido en el programa de cálculo en el que se irán ensayando distintas configuraciones de cantidad de combustible inyectado, velocidad de rotación, espesores, número y geometría de las láminas hasta obtener el resultado óptimo. A pesar de que este diseño preliminar esté fundamentado en cálculos técnicamente coherentes, son muchos los grados de libertad y es de esperar que el proceso de optimización conduzca a un diseño sustancialmente evolucionado. Además, fenómenos a prevenir como separación de flujo, inestabilidad o vibraciones también pueden influir decisivamente en el diseño final.

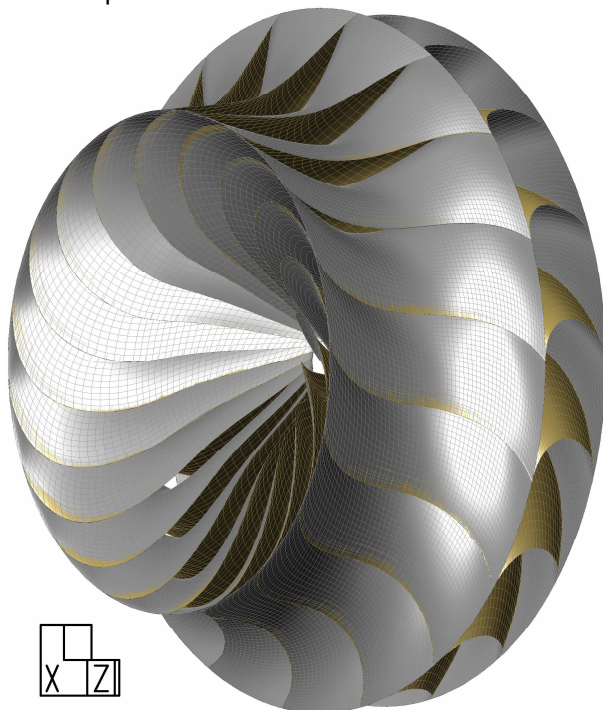


FIG. 36

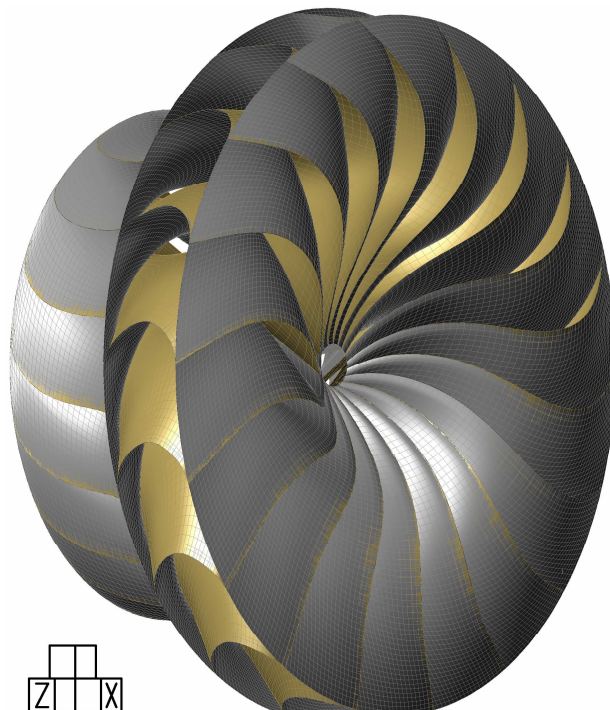


FIG. 37

Microturbina de 100 kW: configuración final

Vistas ilustrativas del rotor deshojado resultante de la optimización:



FIG. 54

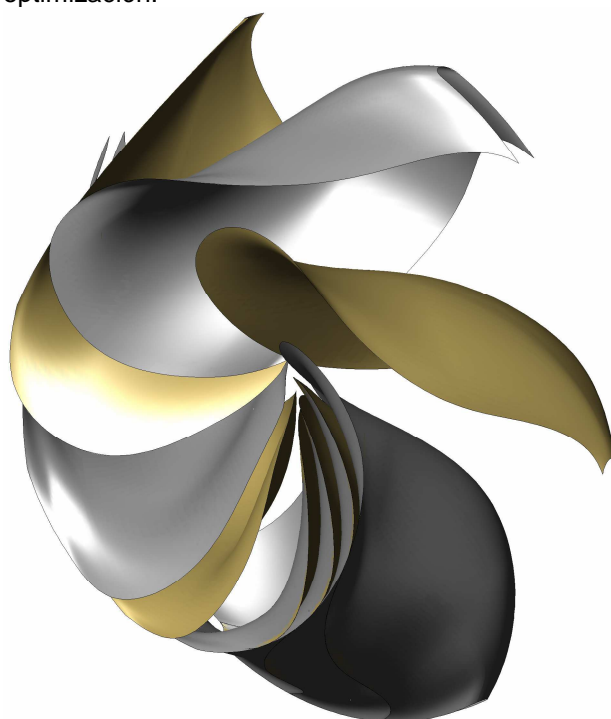


FIG. 55

Una vez optimizada la geometría de las láminas queda ultimar los detalles pertinentes para su configuración final. Las alas de montaje 22 en los bordes libres de la superficie pasiva servirán como apoyo para transmitir los esfuerzos a la carcasa y como sello de estanqueidad. La disposición elegida permite el fácil ensamblaje axial de toda la turbomáquina. Asumiendo que para el prototipo se empleará un combustor simple externo en vez de una cámara de combustión anular, solo son necesarias tres piezas para la carcasa: una tobera de aspiración; un bloque que integra el difusor, el inductor y los colectores de compresión y expansión; una tobera de descarga. Normalmente las alas de montaje del rotor apoyarán sobre unos cojinetes específicamente diseñados para ello.

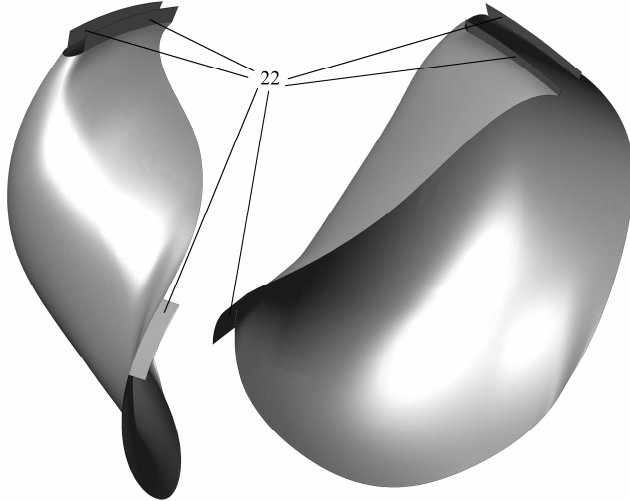


FIG. 56

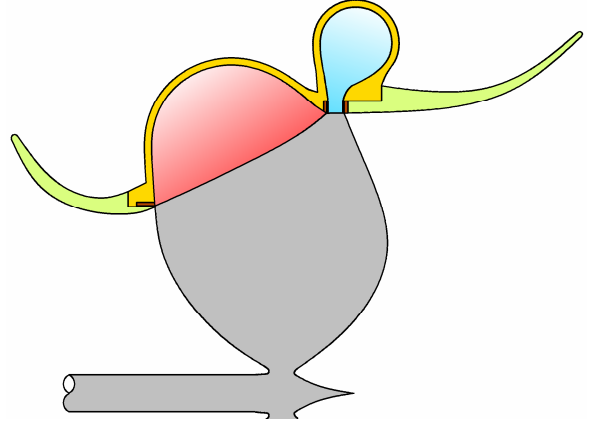


FIG. 57

En el caso de que el rotor se manufacture soldando las láminas, el procedimiento sugerido consistiría en una primera fase en la que se sueldan por parejas una lámina de presión y una de succión. En la siguiente fase se colocan todas las parejas del rotor en un bastidor de posicionado para soldarlas entre sí. En la última fase se suelda el eje al conjunto de láminas obtenido en la fase anterior. Normalmente habrá una fase adicional en la que se rectificarán las alas de montaje para asegurar que su geometría está dentro de tolerancia y se repasarán las uniones soldadas.

Finalmente se obtiene un rotor compacto, ligero, autorrefrigerado y con un intercambiador de calor integrado. A continuación se muestran varias vistas del rotor con el eje y las alas de montaje (se ilustran todos los elementos en el mismo color).

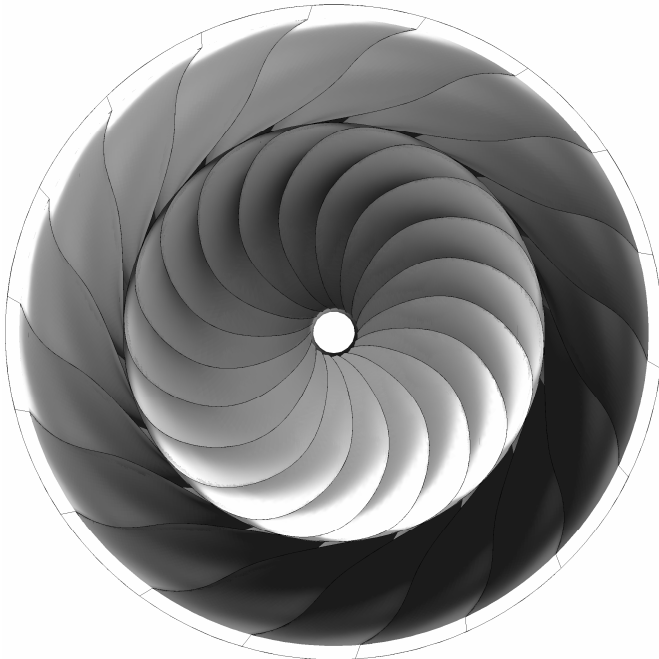


FIG. 58

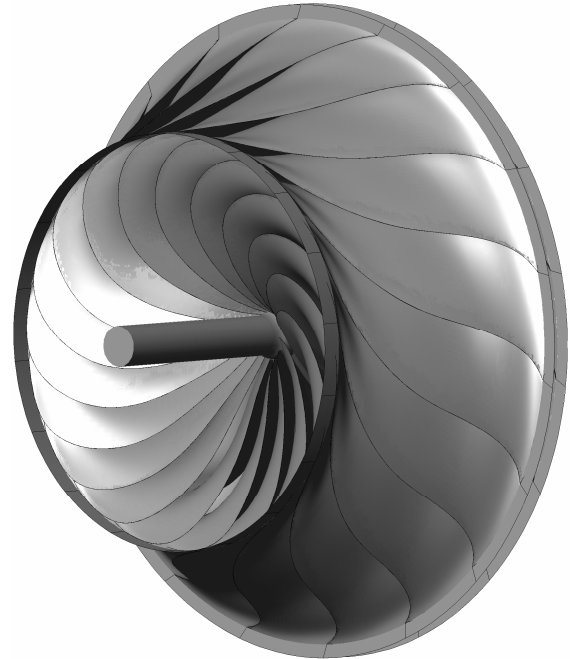


FIG. 59

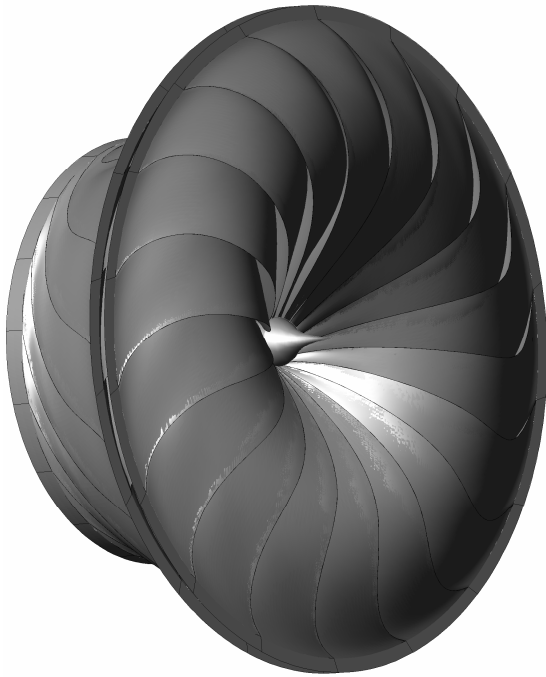


FIG. 60

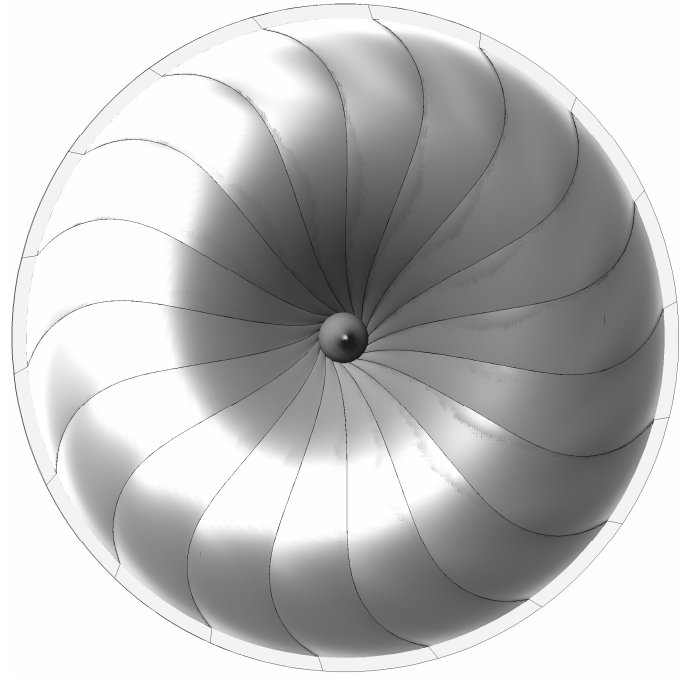


FIG. 61

La turbomáquina ensamblada lista para conectar al combustor:

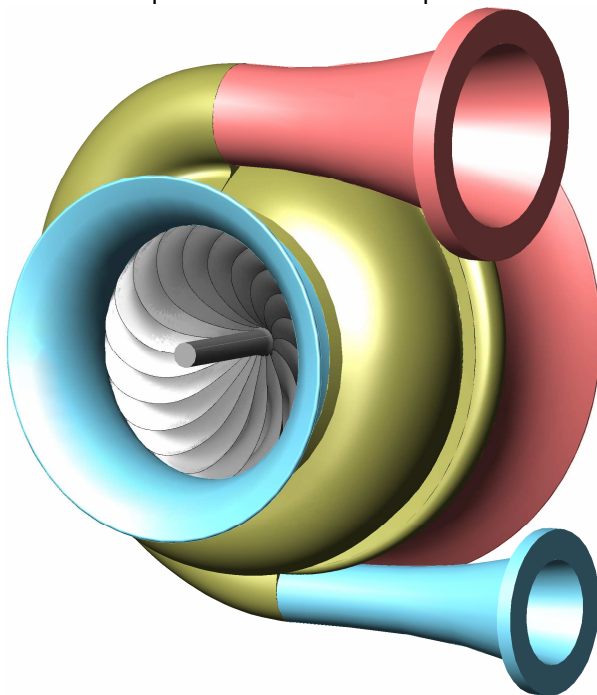


FIG. 62

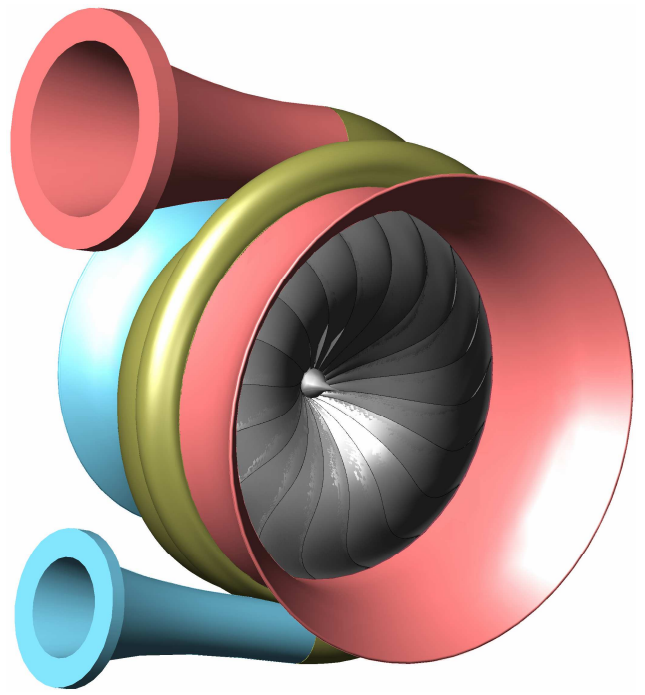


FIG. 63

La configuración de la turbomáquina permite un fácil ensamblaje axial. En la siguiente figura se muestra un despiece que, en orden de montaje de izquierda a derecha, comprende: tobera de aspiración, bloque de volutas, cojinete de empuje transversal, cojinete de empuje axial, rotor, cojinete de empuje axial, tobera de descarga.

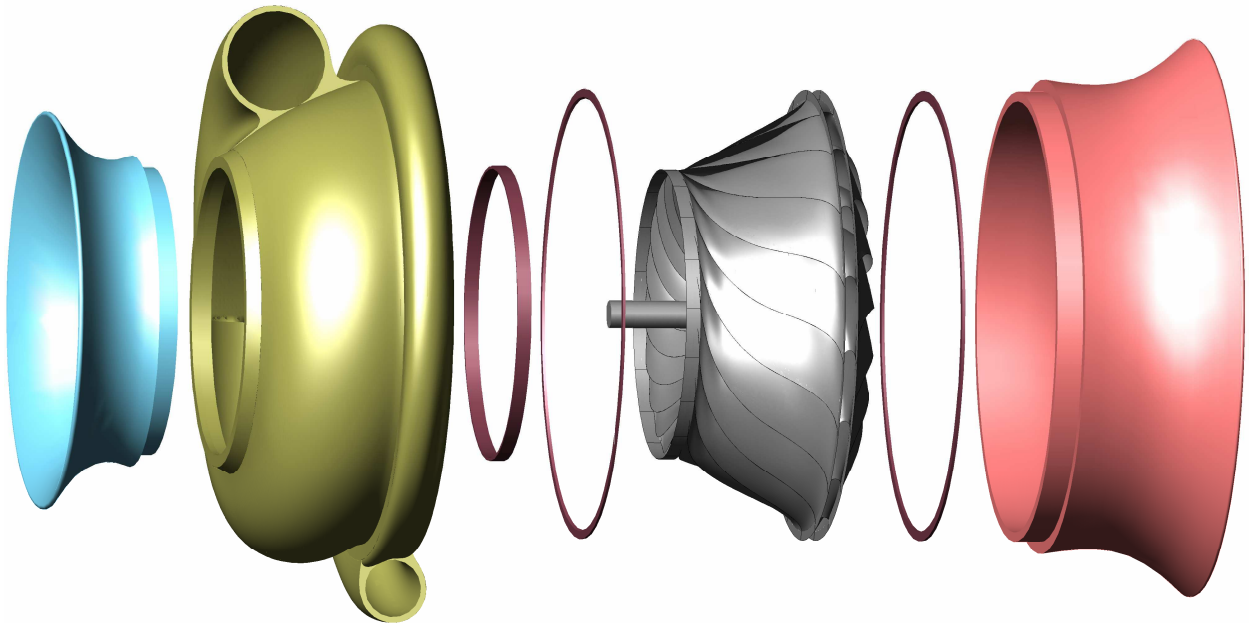


FIG. 64

Las siguientes figuras muestran un corte de la turbomáquina:

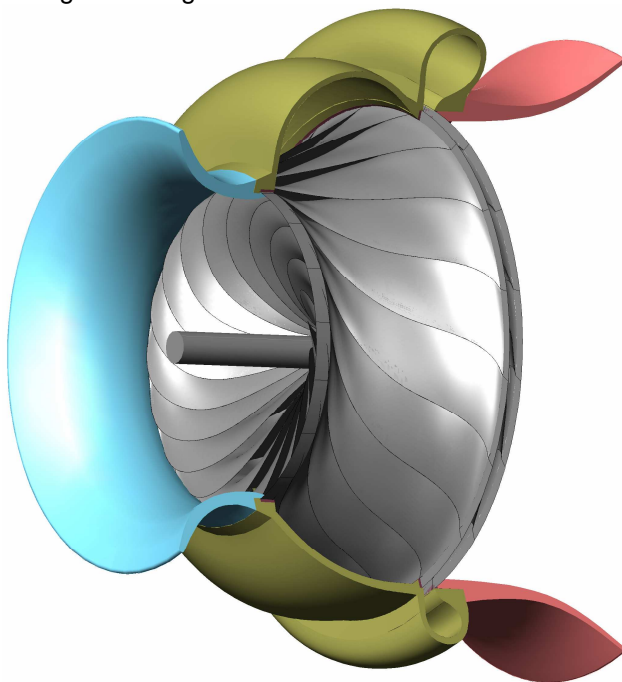


FIG. 65

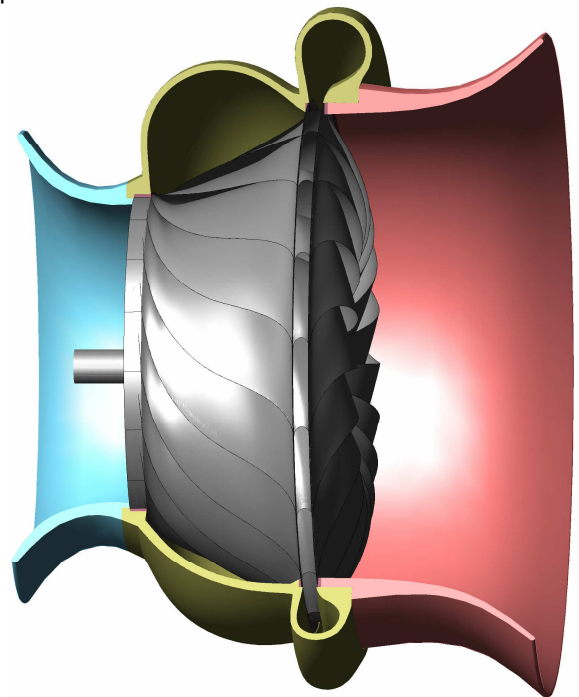


FIG. 66

Todos los ejercicios realizados en las anteriores investigaciones constituirán una valiosa guía de buenas prácticas y lecciones aprendidas para el diseño definitivo de un demostrador tecnológico que pueda ser ensayado en un banco de pruebas. Antes de dar este paso deberán tomarse algunas decisiones trascendentes como elegir el proceso de fabricación del rotor, seleccionar la aleación con la que se va a manufacturar el rotor adecuada a dicho proceso, o si se va a aplicar algún material de recubrimiento, sobre todo si afecta a la conductividad térmica de las láminas.