



Ciemat

Centro de
Investigaciones Energéticas,
Medioambientales
y Tecnológicas

Miner

Diseño de un Almacenador Cinético de Energía

S. Cavia Santos

L. García-Tabarés Rodríguez

29 - 50

Informes Técnicos Ciemat

851
julio, 1998

Diseño de un Almacenador Cinético de Energía

S. Cavia Santos

L. García-Tabarés Rodríguez

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M-14226-1995
NIPO: 238-98-002-5
ISSN: 1135-9420

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

250500

FLYWHEELS; FLYWHEEL ENERGY STORAGE; MAGNETIC BEARING; TENSILE
PROPERTIES; DRAG; TORQUE; SUPERCONDUCTORS; LEVITATION; GYROSCOPES

"Diseño de un Almacenador Cinético de Energía"

Cavia Santos, S. - CIEMAT; García-Tabarés Rodríguez, Luis - CIEMAT/CEDEX
20 pp. 3 figs. 0 refs.

Resumen:

La posibilidad de almacenar energía cinética en una masa giratoria, ya era conocida desde hace siglos. Sin embargo la aplicación de volantes de inercia para almacenar durante largos periodos de tiempo, como baterías electroquímicas es mucho más reciente. En la actualidad este desarrollo es posible gracias al avance de la Ciencia de los Materiales, que ha conseguido compuestos muy resistentes a las fuerzas centrífugas de rotación y a la tecnología de los cojinetes magnéticos, capaz de hacer girar el rotor en suspensión, eliminando fuerzas de rozamientos y lubricantes.

Este informe presenta un estudio de la evolución de los almacenadores cinéticos de energía, tanto en sus características mecánicas, geométricas como en los últimos descubrimientos en materiales y sistemas de suspensión.

Finalmente se presenta las características del primer prototipo de volante de inercia que se está construyendo de forma convencional.

"Design of a Flywheel Storage System"

Cavia Santos, S. - CIEMAT; García-Tabarés Rodríguez, Luis - CIEMAT/CEDEX
20 pp. 3 figs. 0 refs.

Abstract:

Storing mechanical kinetic energy for short time with flywheels has been known for centuries. However the application of flywheels for longer storage times like electrochemical batteries is recent. Advanced flywheels have been possible thanks to the development from materials science with high tensile strength composite materials, and bearing technology with magnetic bearings, which suspend rotating shaft or rotor by magnetic forces.

This summary report provides a study of the mechanics of flywheel, design considerations, material for advance flywheels, and magnetic bearing.

Finally a brief description of a conventional flywheel prototype is given.

1 INTRODUCCIÓN :	3
2 MECÁNICA BÁSICA	5
2.1 ANILLO	5
2.2 CILINDRO MACIZO	6
2.3 ANILLO CON AGUJERO CENTRAL	6
2.4 CILINDRO DE ALTURA VARIABLE ; PERFILES HIPERBÓLICOS.	7
3 GEOMETRIA	8
3.1 CONCLUSIONES	9
4 MATERIAL	10
5 COJINETES MAGNÉTICOS	12
6 MOTOR/GENERADOR Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA	12
ESTUDIO APLICADO, PROTOTIPO	13
1 INTRODUCCIÓN	13
2.GEOMETRÍA Y DISEÑO	14
2.1-Elementos	15
2.1.1. Contenedor	15
2.1.2 Rotor	15
2.1.3. Estator	17
2.2 Componentes :	17
2.2.1 Imanes	17
2.2.2.Arandelas	17
2.2.3 Motor de continua	17
2.2.4 Cojinetes	17
3. CÁLCULOS	18
3.1 Momento de inercia	18
3.2 Energía :	19
3.3 Potencia de pérdidas	20

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

1 INTRODUCCIÓN :

ACE -Almacenador Cinético de Energía-

Un almacenador cinético de energía consiste básicamente en una masa giratoria capaz de almacenar energía cinética, que puede ser absorbida o cedida a la red a través de un sistema de electrónica de potencia. También se llaman volantes de inercia por la forma de volante que suelen tener , y por la inercia que presentan al movimiento.

El principio básico de un almacenador ya era conocido en la Edad Antigua, cuando los alfareros modelaban las vasijas de barro en tornos giratorios a costa de los impulsos que daban con el pie. Ellos sabían muy bien que el tiempo que duraba girando y por tanto la energía, dependía de la inercia del torno y el impulso que le imprimían con cada patada.

Muchos siglos después, en la Revolución Industrial, las máquinas de vapor que alimentaban a las fabricas y a los molinos no hubieran funcionado sin la acción estabilizadora de sus volantes. Hoy en día los motores de combustión interna de los algunos coches y camiones , los utilizan para contrarrestar los pulsos de energía entregada por los pistones.[4]

Pero las aplicaciones mas modernas que aun están en desarrollo, son la utilización de volantes de inercia como sistema de acumulación de energía en coches eléctricos, y en el campo de las energías solar y eólica. También hay proyectos mas ambiciosos, que pretenden alcanzar 1Gwh de energía almacenada, para regular las fluctuaciones de la red eléctrica.

En el campo de las energías renovables, la aplicación de volantes de inercia puede ayudar a solventar dos problemas importantes:

1. La variabilidad del recurso disponible en el caso de generación aislada de la red, que obliga a la utilización de sistemas de acumulación energética para garantizar el suministro, o bien a disponer de un sistema generador redundante de tipo convencional (como un grupo electrógeno).Actualmente esta cuestión se solventa por el uso de baterías, con los consiguientes problemas de mantenimiento , rendimiento etc., por lo que parece interesante la posibilidad de sustituirlas por acumuladores inerciales.
2. En el caso de la eólica, las rápidas fluctuaciones de la velocidad del viento (ráfagas) implican saltos casi instantáneos tanto en las cargas mecánicas como en la potencia eléctrica generada. En este caso, el empleo de volantes de inercia permite amortiguar estas variaciones, ya que el incremento repentino de la potencia sería absorbido, en gran medida en forma de energía cinética que acumularían dichos volantes.

Normalmente la electricidad debe ser consumida simultáneamente con su generación. Los métodos de almacenamiento convencionales, dependen de condiciones geográficas, y son muy caros como por ejemplo, el bombeo de agua en las centrales hidráulicas para aprovechar su potencial, en los picos de demanda. Sin almacenamiento de energía las compañías eléctricas se ven obligadas a forzar a sus centrales de base, (nucleares y térmicas grandes) a seguir las fluctuaciones de la demanda, que oscilan un 30% , cada 12h., lo cual reduce su rendimiento, su vida media, y supone enormes costos. En la siguiente tabla se comparan las ventajas e inconvenientes de cada sistema de almacenamiento de energía eléctrica.

	ACE	Baterías	Bombeo Hidráulico	Aire/Gas comprimido	Micro SMES	SMES	Turbina de combustión
Rendimiento	si	si	no	no	si	no	>30MW
Densidad Energética	alta	media	alta	alta	muy baja	alta	N/A
Modular	si	si	no	no	si	no	>30MW
Ciclos de vida	ilimitada	x100	x1000	x1000	ilimitada	ilimitada	x1000
Tiempo de recarga	minutos	horas	horas	horas	minutos	horas	N/A
Emplazamiento	Muy fácil	medio	difícil	difícil	fácil	muy difícil	medio
Tiempo de construcción	semanas	meses	años	años	semanas	años	meses
Impacto medio-ambiental	nulo	grande	muy grande	muy grande	nulo	muy grande	grande
Condiciones térmicas	Nitrógeno Líquido (LN2)	elevadas	ninguna	altas	Helio Líquido (LHe)	LHe	altas
Consecuencias accidente	bajas	medias	altas	medias	bajas	altas	media
Disponibilidad actual	En desarrollo	inmediata	inmediata con limi.s geog.	inmediata con limi.s geog.	En desarrollo	En desarrollo	inmediata

Tabla 1. [15]

Se puede apreciar las ventajas de utilizar aceleradores cinéticos de energía, frente a otras formas de energía, y se pueden resumir en las siguientes:

- Alta densidad de potencia por unidad de masa
- Alto rendimiento en la recarga. [1]
- Rapidez. La velocidad de carga y descarga de una batería depende de la velocidad de la reacción química, en cambio en un volante solo esta limitada por el sobrecalentamiento del motor.[2]
- Fácil disposición al poder instalarse por módulos de potencia media.
- Bajo riesgos de accidentes.
- No contaminante.

Para confirmar su alta densidad de energía se adjunta la tabla 2, que da una información cuantitativa respecto a las baterías químicas convencionales.

Sistema	densidad de energía Wh/kg	densidad de potencia W/kg
Batería ácida	30-50	60-90
Batería NI-Cd	40-70	160-185
Almacenador	100-250	500-5000

Tabla 2

Debido a la necesidad de un sistema de almacenamiento de energía y las ventajas de un ACE frente a otros sistemas, se ha decidido construir un prototipo de volante de inercia en colaboración CEDEX-CIEMAT, cuya descripción es ampliamente desarrollada en el apartado de Estudio de Aplicaciones, que se presenta en este informe.

A continuación se presenta un estudio de cuales son las mejores características para la construcción del almacenador ideal, tanto para aplicaciones en automóviles eléctricos como para aplicaciones a la red. Se compararán con las del primer prototipo que se ha construido para mejorarlo en la medida que sea posible en los sucesivos modelos.

2 MECÁNICA BÁSICA

Se presenta un resumen de las magnitudes que interviene en la DINÁMICA DE ROTACIÓN del sólido rígido, y en la TEORÍA DE RESISTENCIA DE MATERIALES, para que combinando ambas, seamos capaces de diseñar el mejor prototipo posible.

La energía de rotación de un sólido rígido en movimiento es : [3],[4]

$$W = 1/2 I \omega^2$$

donde :

I = momento de inercia , o inercia que presente un cuerpo a la rotación que depende no solo de su masa sino también de la distancia al eje de giro " r ".

$$I = \int r^2 dm(r)$$

ω = velocidad angular del sólido.

Por lo tanto la energía cinética almacenada por un sólido rígido en rotación es directamente proporcional a la masa , al cuadrado del radio, y al cuadrado de la velocidad angular. Se verá mas adelante que cuando se estudia la energía específica, estas magnitudes se traducen a la geometría o factor de forma adecuada, y a los máximos esfuerzos que soporta el material.

2.1 ANILLO

Sea un anillo en el que toda la masa se encuentra uniformemente distribuida a una distancia R del eje de giro, el valor de la energía es:

$$W = \frac{1}{2} \int r^2 dm(r) \omega^2 = \frac{1}{2} R^2 \int dm \omega^2 = \frac{1}{2} R^2 m \omega^2$$

si se agrupan términos, $\sigma = \rho R^2 \omega^2$ es la **presión de diseño** (tensile stress, design stress) del anillo.

ρ : densidad del material empleado

ω : velocidad angular del volante

R : radio del volante

Se puede dar la energía por unidad de masa o volumen obteniendo :

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\rho}$$

$$W_v = \frac{1}{2} \sigma$$

El factor $\frac{1}{2}$ de la fórmula de la energía se agrupa con el factor que sale de la integral del momento de inercia (en este caso 1) y se denomina **factor de forma K** , que es una **medida de la eficiencia con la cual la geometría del volante aprovecha los esfuerzos que soporta el material.**

Las expresiones que quedan, y que a partir de ahora son las que se van a emplear para el estudio de la energía almacenada, son :

$$E_m = \frac{\sigma k}{\rho} \quad (1) \quad E_v = \sigma k \quad (2)$$

2.2 CILINDRO MACIZO

Sea un **cilindro macizo** de altura h y radio R que gira en torno a su eje central ;

$$I = \int r^2 dm(r) = \rho \int r^2 dv(r) = \rho \int r^2 2\pi r dr h = 2\pi\rho h \int r^3 dr = 2\pi\rho h \frac{R^4}{4} = \rho(\pi R^2 h) \frac{R^2}{2} =$$

$$I_{cilindro} = \frac{1}{2} mR^2$$

$$E = \frac{1}{4} mR^2 \omega^2$$

$$E_m = \frac{1}{4} R^2 \omega^2 \quad (3) \quad E_v = \frac{1}{4} \rho R^2 \omega^2 \quad (4)$$

Para escribir estas expresiones en función del factor de forma “k” y la presión máxima que soporta el cilindro ; “ σ ”, se ha de obtener la expresión de “ σ ” para un cilindro. Para ello se toman elementos diferenciales de cilindro y se estudian las fuerzas internas y externas a la que está sometido. Se supone que el esfuerzo es radial, y que se transmiten de una capa y se aplica el principio de equilibrio de fuerzas que establece $\Sigma F_y=0$ $\Sigma F_x=0$, y se iguala a la fuerza centrífuga a la que está sometido. Operando se llega a :[12]

$$\sigma_\theta = \frac{(3+\nu)\rho\omega^2 R^2}{8} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \left[\frac{1+3\nu}{3+\nu}\right]\right) \text{ cuyo valor maximo es } \sigma_{\theta x} = \frac{(3+\nu)\rho\omega^2 R^2}{8} \quad (5)$$

$$\sigma_r = \frac{(3+\nu)\rho\omega^2 R^2}{8} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \text{ cuyo valor maximo es } \sigma_r = \frac{(3+\nu)\rho\omega^2 R^2}{8} \quad (6)$$

Juntando ecuaciones (1), (2), (3),(4) ,(5), y (6)

$$E_{mx} = \frac{2\sigma_{\theta x}}{(3+\nu)\rho} \text{ siendo } k = \frac{2}{3+\nu} = 0.606 \quad E_{vx} = \frac{2\sigma_{\theta x}}{3+\nu}$$

2.3 ANILLO CON AGUJERO CENTRAL

Para un cilindro con un agujero central de radios exterior e interior R_2 y R_1 respectivamente, las expresiones de la densidad de energía, de los esfuerzos mecánicos, y el factor de forma son :

$$E_m = \frac{1}{4} \omega^2 (R_1^4 - R_2^4) \qquad E_v = \frac{1}{4} \rho \omega^2 (R_1^4 - R_2^4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(3 + \nu) \rho \omega^2 R^2}{8} \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} + 1 + \frac{R_1^2}{r^2} - \left(\frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} \right) \frac{r^2}{R_2^2} \right)$$

$$\sigma_r = \frac{(3 + \nu) \rho \omega^2 R^2}{8} \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} + 1 - \frac{R_1^2}{r^2} - \frac{r^2}{R_2^2} \right)$$

con valor máximo en $r = R_1$ para la componente azimutal.

$$\sigma_\theta = \frac{(3 + \nu) \rho \omega^2 R^2}{8} \left(1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} \left(\frac{1 - \nu}{3 + \nu} \right) \right)$$

En este caso las ecuaciones se complican a la hora de expresar la densidad de energía en función de σ . Por eso se supone R_1 muy pequeño, despreciable frente a R_2 y el valor de σ_θ que sale es el doble que en el caso del cilindro macizo y por lo tanto su factor de forma queda reducido a la mitad.

Los resultados obtenidos para los tres casos, analizados se comparan en la siguiente tabla.

Formas del volante	Factor de forma K
Anillo	0.5
Cilindro macizo	0.606
Cilindro con agujero	0.303

Tabla 3

Como se aprecia en esta tabla, al hacer un agujero central en el cilindro la tensión, que soporta el material se duplican, y por lo tanto el riesgo de rotura también, para una determinada velocidad, por lo que no es conveniente practicar orificios en futuros diseños.

2.4 CILINDRO DE ALTURA VARIABLE ; PERFILES HIPERBÓLICOS.

A continuación se dan unas pinceladas del método de resolución de la **ecuación de equilibrio de esfuerzos radiales**, que permite hallar las expresiones de “ σ ”, para un disco de altura o grosor variable. Como se ha ido viendo en diseños anteriores el problema resulta bastante complicado de resolver analíticamente, por lo que hay que recurrir, a métodos numéricos, con programas complejos, que para una geometría dada te dan el valor de los esfuerzos. Con tal fin se utilizará Quick Field, programa basado en Elementos Finitos para nuestra aplicación.

Sea un disco de altura variable de la forma; $h=h_i(R_i/r)^q$ donde h_i y R_i son constantes a determinar, y q es el exponente. Se acepta este perfil hiperbólico porque partimos de la hipótesis de Stodola [14], y de la tabla 4 sobre la mejor geometría posible.

Suponiendo pequeñas deformaciones, esfuerzos planos y despreciando fuerzas gravitacionales y mecánicas, la ecuación de equilibrio para un disco giratorio de altura variable se puede escribir como :

$$\frac{d}{dr}(h\sigma_r) - h\sigma_\theta = -h\rho\omega^2 r^2$$

utilizando las ecuaciones esfuerzos - desplazamientos, y sustituyendo por el perfil hiperbolico.

$$r^2 \frac{d^2}{dr^2}(h\sigma_r) + r(1+q) \frac{d}{dr}(h\sigma_r) - (1+\nu q)(tr\sigma_r) = -(3+\nu)\rho\omega^2 r^3 h$$

se obtiene una ecuacion diferencial de Cauchy Euler de segundo grado y de coeficientes variables, de difícil resolución para lo que es necesario las condiciones de contorno;

$$\sigma_r = -P_i \text{ a } r = R_i$$

$$\sigma_r = -P_o \text{ a } r = R_o$$

la solución que se obtiene es bastante y compleja y depende de seis coeficientes,

$$\sigma_r = (P_1 A + P_0 B + \omega^2 C)(r/R_i)^{(n_1+q-1)} + (P_1 D - P_0 B + \omega^2 L)(r/R_i)^{(n_2+q-1)} - (\omega^2 F)(r/R_i)^2$$

en función de otros tantos parámetros. Para más información véase ref. [6]

3 GEOMETRIA

No conviene olvidar que el objetivo de diseño, es maximizar la energía cinética almacenada en función de restricciones geométricas, y de esfuerzos que soporta el material.. Es decir encontrar una función perfil o altura del volante $h(r) \in C^0$ para la cual :

$$E(\sigma, h) \rightarrow \text{MAX}$$

Para operar el profesor M. Berger de la Facultad de Ingeniería Mecánica de Haifa, Israel propone pasar todas las magnitudes a unitarias. Se toma como unidad base de energía la almacenada por un anillo delgado de dimensiones equivalentes, y entonces las ecuaciones quedan :

$$e(k, \omega) = k^2 \left[\int_0^1 r^3 h(r) dr / rh(r) dr \right] \quad (1)$$

$$\text{donde } k = \frac{V_d}{V_r}$$

$$V_r^2 = \sigma_{max} / \rho = R^2 \omega^2 \text{ que equivale a la velocidad tangencial máxima del anillo}$$

V_d ; velocidad tangencial considerada

$r = R/R_o$, con R_o , radio máximo considerado.

manteniendo las siguientes restricciones:

$$0 \leq r \leq 1$$

$$h_{max} \leq h(r) \leq h_{min} \quad (2)$$

$$\sigma_r(r) = \sigma(R) / \sigma_{rmax} \leq 1 \quad (3)$$

$$\sigma_t(r) = \sigma_t(R) / \sigma_{imax} \leq 1 \quad (4)$$

$$0 < r < 1$$

Resolver la ecuación con estas restricciones y obtener las expresiones de los esfuerzos, " σ " resulta realmente complicado como se ha visto en el apartado de mecánica básica. Además para hallar σ_{rmax} y σ_{tmax} hay que hallar la derivada respecto el radio, que encuentra una singularidad en el origen por lo que hay que recurrir a L'Hopital. Como no tiene fácil solución se discretiza el problema y se resuelve con un programa que divide el volante en N anillos concéntricos, de forma cónica, igualmente separados por N+1 puntos r_i con $i=1, \dots, N+1$.

La ecuación (1), con las restricciones (2), (3) y (4) se discretizan, y se tratan (3) y (4) como funciones no lineales, de variables h_i . El algoritmo del programa no lineal correspondiente se detalla en Gill and Murray, 1974, ref.[8], pero no se desarrolla, en este informe porque lo que interesa son las conclusiones que se sacan del mismo.

Para facilitar la comprensión de las conclusiones, se adjunta la siguiente figura que representa, la forma óptima del volante en función, de la velocidad. Conjuntamente se muestran como varía las presiones radial y tangencial unitarias con el radio del volante.

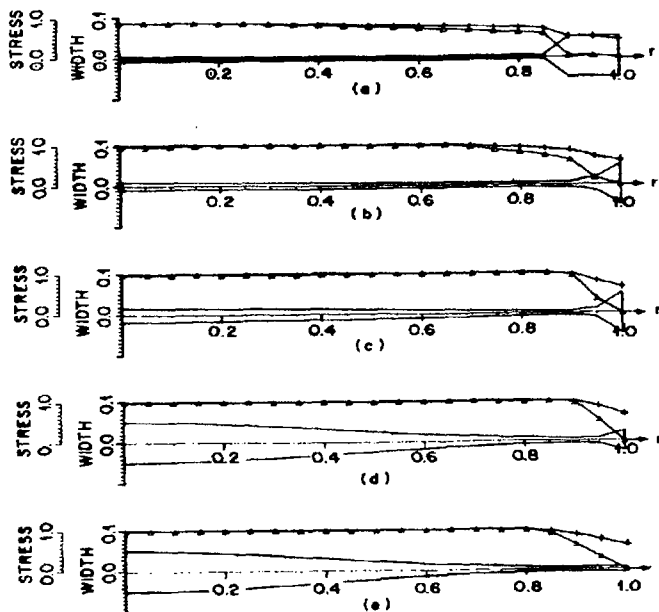


Figura 1 Formas óptimas y esfuerzos, en función del radio . Las cruces + y los triangulitos, Δ representan la σ_r y la σ_t en función del radio, y según los distintos rangos de velocidad : (a) $k^2=1.0$; (b) $k^2=2.1$; (c) $k^2=3.1$; (d) $k^2=5.5$; (e) $k^2=6.0$.

3.1 CONCLUSIONES

La máxima presión que soporta el volante se ejerce siempre, en la zona axial, y disminuye en el extremo. Es como si las capas exteriores tiraran de las interiores al girar el volante de forma que se ejerce mayor presión en el eje.

Para bajas velocidades, las restricciones de presión son despreciables y solo se consideran las geométricas. Esto hace que se minimice el grosor en el centro y se maximice en el extremo, para concentrar masa a mayor radio y obtener mayor energía. Velocidades medias, los parámetros

geométricos siguen preponderando. A altas velocidades la parte central se refuerza de forma exponencial a medida que aumenta la velocidad, a partir del punto en el que se supera la presión máxima. De este modo la presión cae en todo el disco por debajo de la permitida.

Para nuestro prototipo de velocidad media, se ha dado una geometría cuasicilíndrica, ligeramente mas gruesa en el centro, pero se tenderá a perfiles hiperbólicos a medida que aumentemos la velocidad.

4 MATERIAL

El material mas empleado en la construcción de almacenadores, ha sido el acero de alta resistencia, como el 4340, el 18Ni maranging , o el 19Ni-4.5Co-1Mo.

El acero tiene la ventaja de ser barato, fácil de modelar para conseguir un factor de forma alto, y proporciona un camino magnético al flujo procedente del motor que se incluye en el volante. Por estas razones de simplicidad hemos empleado este material para la primera fase de nuestro prototipo,

Sin embargo el reciente desarrollo de la Ciencia de Materiales, impulsado por la industria aerospacial, ha permitido cambiar el concepto tradicional de volante grande y pesado, por el de volante ligero capaz de alcanzar velocidades antes inimaginables.

Este cambio tiene una consecuencia inmediata ; conseguir densidades de energía mayor puesto que la energía almacenada es proporcional al cuadrado de la velocidad.

Para constatar estos hechos se muestran la siguiente tabla :

Material	Densidad de Energía (Wh/kg)
Volante de acero Maranging	55.5
Volante de acero 4340	33.3
Volantes de compuestos de fibra	213.8*

Tabla 4

*Utilizando fibras longitudinales de Kevlar sin ningún factor de forma.[18] [19].

Una de las últimas creaciones son las fibras híbridas de Boro-Grafito, que aguantan hasta 2400Mpa de presión.

El inconveniente de la fibras es que no pueden ser modeladas a antojo, para conseguir un factor de forma alto, pero es sobradamente compensado por la velocidad. El segundo inconveniente es que no son materiales magnéticos, pero este problema se está subsanando insertando partículas magnéticas en la fibra.

Para conseguir mayores esfuerzos las fibras deben situarse paralelamente unas con otras. La resina que las mantiene unidas (epoxy generalmente) las protege y amortigua la transmisión de esfuerzos.

Para solventar problemas de laminación, se construyen volantes multianillos pegados entre si, de forma que cada anillo sea lo suficientemente fino como para minimizar los esfuerzos radiales y que tales fuerzas no se transmitan en la medida de lo posible de anillo a anillo.

Este ensamblaje de anillos acoplados resulta práctico para la construcción de un volante de fibras compuestas pero aún se puede mejorar. Puesto que la fuerza centrífuga es más débil en los anillos internos que en los externos, estos se expanden menos y corren el riesgo de separarse de los externos cuando el rotor está girando. Este problema se resuelve una vez más; Cada anillo se fabrica de un material diferente de manera que la razón de su módulo de elasticidad partido la densidad sea menor que la del anillo inmediatamente posterior que lo rodea. De este modo un simple acoplamiento de estructuras puede ser empleado, para unir los anillos. Esta última configuración es la que consigue mayor densidad de energía por unidad de volumen y masa. El volante del rotor del Chrysler Patriot, lleva fibras mucho más resistentes en los anillos exteriores capaces de contener la expansión de los interiores, y por supuesto mucho más caros \$120/kg. afirma su presidente Mr Maas [18]

Una vez conseguida la mejor configuración, desde el punto de vista de la densidad de energía ¿cual es el principal problema que debe tenerse en cuenta?. La estabilidad.

Los anillos y los cojinetes tienen una velocidad crítica, a la cual se puede alcanzar la frecuencia natural de vibración del material, y haga vibrar el conjunto de forma destructiva.

Este problema ha sido analizado teóricamente por la empresa de Ingeniería de William M. Broebeck (El trabajo fue subvencionado por la Compañía de Eléctrica del Pacífico, y la Compañía de Gas de San Diego) y se demuestra que se puede obtener fácilmente un criterio de diseño para volantes multianillo que asegure que las frecuencias de resonancia del volante multianillo caen muy por debajo de la más alta velocidad de funcionamiento del volante.

Además el uso de fibras compuestas, minimiza el peligro, por rotura del volante, y simplifica enormemente el diseño del contenedor de seguridad que soporta al almacenador.

En la siguiente tabla se recogen los principales materiales utilizados para la construcción de volantes, tanto en su versión de materiales magnéticos como en compuestos de fibras, y sus principales características.

Materiales	Esfuerzo Máximo, “ σ_m ”(MPa)	Densidad, ρ (g/cm ³)	σ/ρ kJ/Kg (Wh/Kg)
Monolíticos			
7075-T6 Alumium	572	2.76	208 (57.8)
Ti-6Al-4V Titanium	1103	4.43	249 (69.2)
4340 Acero	1517	7.7	197 (54.7)
18 Ni Maranging	2070	8.0	259 (71.8)
Fibras compuestas			
E-glass/epoxy	1034	2.10	492 (136.8)
S-glass/epoxy	1751	1.99	880 (244.4)
Kevlar/epoxy	1241	1.39	893 (248.0)
Graphite/epoxy	1586	1.54	1030 (286.1)
Otros			
Metglass	2627	8.0	328 (91.1)

Tabla 5

5 COJINETES MAGNÉTICOS

El propósito de los cojinetes es proporcionar un soporte estable al rotor en dirección axial y radial, con el mínimo esfuerzo, y con la mayor durabilidad posible.

Hay **cojinetes convencionales de bolas** de acero o cerámicas, que han sido mejorados notablemente, alcanzando hasta las 48.000 rpm, y que son los que se utiliza para nuestro primer prototipo. Pero los que cobran mayor interés para el diseño de volantes avanzados, son los **cojinetes magnéticos**, dentro de los cuales se distingue los **activos** y los **pasivos** con superconductores de alta temperatura.

Los cojinetes activos consisten básicamente en imanes permanentes (PM) enfrentados a electroimanes o bobinas cuya corriente se regula con circuitos de retroalimentación, y con sensores de posición. Los sensores proporcionan un flujo continuo de datos de posición del eje, y los circuitos electrónicos emplean estos datos para ajustar y controlar la posición radial del rotor.

Un sistema desarrollado en la Universidad de Maryland consiste en un volante unido a un anillo en suspensión que actúa de cojinete, siendo pasivo axialmente y activo radialmente.

Este tipo de cojinetes requiere de un equipo electrónico bastante complejo, por eso se propone el desarrollo de cojinetes pasivos, aprovechando las propiedades de los superconductores de alta temperatura crítica (HTS).

Los cojinetes superconductores consisten en un imán permanente levitando frente a un HTS, enfriado a 77°K. Existe la posibilidad de suspender un PM entre dos superconductores. Además es conveniente trabajar a una presión de 10^{-5} Torr. para eliminar pérdidas de fricción con el aire.

La característica más destacada de este tipo de cojinetes es su estabilidad. La utilidad de los HTS, reside en que permite la penetración del flujo magnético (fluxones) por determinadas regiones no superconductoras, (pinning centers). El cojinete es estable en todas las direcciones gracias a que si intentamos desplazarlo de su posición original, las líneas de flujo se oponen a ello intentando mantener su cuantía. Por lo tanto para obtener fuerzas de levitación altas es importante disponer de SC con buenos centros de anclaje. Esto es posible con SC que han cristalizado en monodominios o dominios de diámetro lo más grande posible.

6 MOTOR/GENERADOR Y ELECTRÓNICA DE POTENCIA

La carga y descarga de la energía almacenada puede ser realizada mecánica y/o eléctricamente. El volante puede girar por acoplamiento directo o indirecto con el eje de un motor, y puede ser descargado eléctricamente por medio de un generador exterior. Esta era la disposición de la mayoría de los diseños tradicionales. Los sistemas de los volantes más actualizados son casi siempre eléctricos; un solo motor -generador hace rotar al volante hasta alcanzar su velocidad nominal y extrae la energía generando electricidad.

El motor propuesto por el Prof. Alcarnely, consiste en un motor de imanes permanentes, con la peculiaridad de poseer flujo axial. Esto se consigue colocando PM en la superficie superior e inferior del rotor, enfrentados a dos estatores superior e inferior que permiten flujo axial. Los motores de flujo axial tienen la ventaja de proporcionar la misma potencia con la mitad de peso, lo cual puede ser muy recomendable para coches eléctricos. No obstante su elevado coste hace inviable su utilización sistemática.

El alto desarrollo de la electrónica de potencia puede conseguir que la onda de salida se aproxime a una función senoidal donde los ruidos y los armónicos son reducidos para ajustarse a las exigencias de la red. Por esta razón una conversión de potencia eficaz es fundamental. Las pérdidas en esta conversión se concentran en tres etapas:

- rectificación

- inversión y conmutación del motor
- filtrado de la señal de salida.

La combinación de la nueva tecnología con los GTO, IGBT, circuitos de conversión avanzada y transformadores hacen posible esta conversión eficaz.

ESTUDIO APLICADO, PROTOTIPO

1 INTRODUCCIÓN

Se está diseñando un prototipo de volante de inercia, para almacenamiento de energía eléctrica en colaboración CEDEX-CIEMAT.

La idea fundamental es diseñar un volante con el motor-generador incorporado en la masa giratoria. El motor es de imanes permanentes, con un rotor construido de una sola pieza y dos estatores gemelos enfrentados que permiten flujo axial

El proyecto tiene tres fases:

Una primera fase, “ensayo de continua” que consiste en acoplar externamente un motor de continua que mueva el volante a una velocidad máxima de 16000 r.p.m., y que permita estudiar las pérdidas por rozamientos con el aire, pérdidas en los cojinetes y los posibles problemas de estabilización y equilibrado que se puedan plantear.

Los cojinetes empleados en esta primera fase van a ser de bolas de acero de alta calidad, para ser sustituidos a continuación por cojinetes de bolas cerámicas de alta precisión capaces de soportar hasta 48.000 rpm, ambos suministrados por SKF.

En la segunda fase se realiza el diseño eléctrico del motor, es decir se determina el número de polos, bobinas, fases, etc. del motor para alcanzar una velocidad máxima de 50.000 r.p.m..

En la tercera fase, se sustituyen los cojinetes convencionales, por cojinetes superconductores, para lo que se ha realizado un profundo estudio de Medidas de Fuerza de Levitación, con distintos superconductores, y se ha desarrollado un modelo teórico, Modelo de Espira Equivalente, que describe el comportamiento de esta fuerza. Esta etapa, está aun sin desarrollar, y depende de los materiales suministrados, también es la mas difícil, pero la mas bonita y novedosa, y debe ser el objetivo del un grupo de investigación. En el apartado de Preguntas y asuntos sin resolver propongo, configuraciones posibles para un futuro ensayo.

La geometría y descripción de los componentes del prototipo, así como los cálculos de potencia se exponen a continuación.

2.GEOMETRÍA y DISEÑO

Se muestra un esquema general de los elementos y componentes. Se explica porque se ha elegido este diseño con los conocimientos y los medios de que se disponen. El volante consta de los siguientes elementos y componentes.

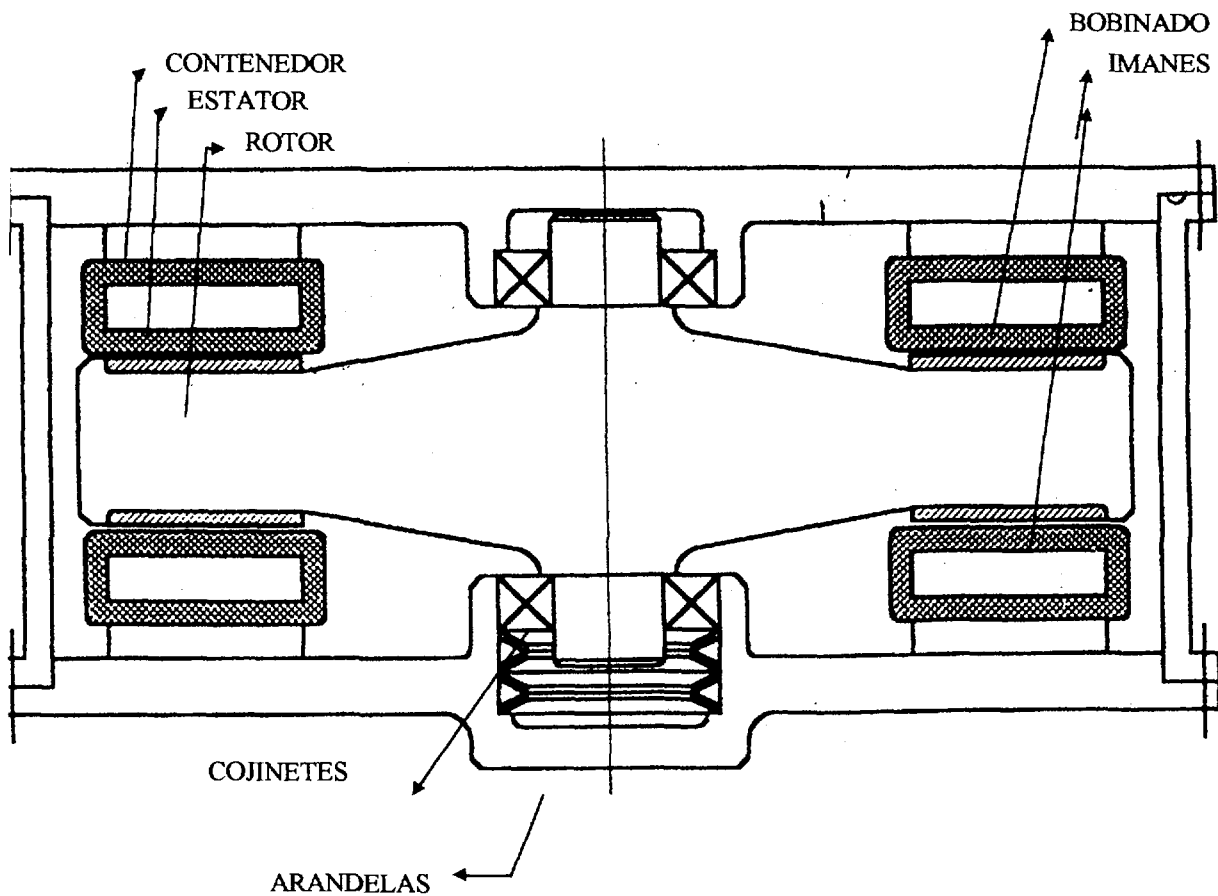
2.1-Elementos

- 2.1.1 contenedor
- 2.1.2 rotor
- 2.1.3 estator

2.2-Componentes

- 2.2.1 imanes
- 2.2.2 arandelas
- 2.2.3 motor
- 2.2.4 cojinetes

Esquema General



2.1-Elementos

2.1.1. Contenedor

Su finalidad es servir de soporte a todos los elementos del volante, y de primer escudo ante una posible rotura.

La tapa inferior se ha dividido en tres piezas con el fin de poder abrir por debajo el conjunto y resolver los posibles problemas con los cojinetes y las arandelas sin tener que desmontar el conjunto.

La tapa superior tiene dos piezas con el mismo fin. Ambas tapaderas se cierran con un conjunto de 24 tornillos. Para mayor seguridad se van a encerrar el prototipo en una especie de jaula anclada en el suelo, por medio de esparragos (diseño aun sin determinar) que permita trabajar con total seguridad.

La masa es de 5900 gr.

2.1.2 Rotor

El rotor se ha construido con una aleación de acero F-127 elástica de CrNiMb, especial para piezas sometidas a los mayores esfuerzos de fatiga. Aunque no es una de las aleaciones propuestas en el estudio teórico, cumple los requisitos necesarios para la primera fase, y es un material muy fácil de conseguir en el mercado.

Características mecánicas medias :

MARCA	Normalizado	Recocido	Temple y revenido	R (Kg/mm ²) carga de rotura	E (Kg/mm ²) módulo de Young
F-127	390	215	Temple a 825° aceite y revenido a 650° aire	100 100	88 86

Tabla 6.

Está construido de una sola pieza sin ejes ni agujeros, para evitar que en zonas delicadas se produzca la rotura del material.

La forma del rotor es un compromiso entre los esfuerzos que puede soportar el disco, el factor de forma y la necesidad de sujetar los imanes. Las limitaciones técnicas del taller no permiten construir piezas de radios mayores ni con curvas más redondeadas.

Para calcular la máxima velocidad que puede alcanzar nuestro volante sin romperse, se ha empleado un programa de Elementos Finitos Quick-Field (QF), que dada una geometría, las características de los materiales, calcula el esfuerzo máximo que soporta el material en sus zonas más conflictivas. Este valor se puede restringir por el límite plástico del acero inoxidable $\sigma_e=135\text{MPa}$ en el caso más pesimista, que será el que tomemos por cuestiones de seguridad, o por la carga de rotura del material dada por el fabricante $R=1000\text{MPa}$ en el más optimista.

Los datos usados en la simulación QF del volante de acero son :

$\rho=8000\text{kg/m}^3$ densidad .

$E_z=E_r=E_\theta=2.0e11\text{ N/m}^2$. Modulo de Young

$\nu=0.28$.Radio de Poisson

$\alpha=0$ coeficiente de expansión térmica, se supone que trabajamos a temperatura cte.

$F_r=\rho\omega^2r$. Body Force o fuerzas a las que está sometido el cuerpo Fuerza centrífuga de rotación, que se calcula para cada velocidad.

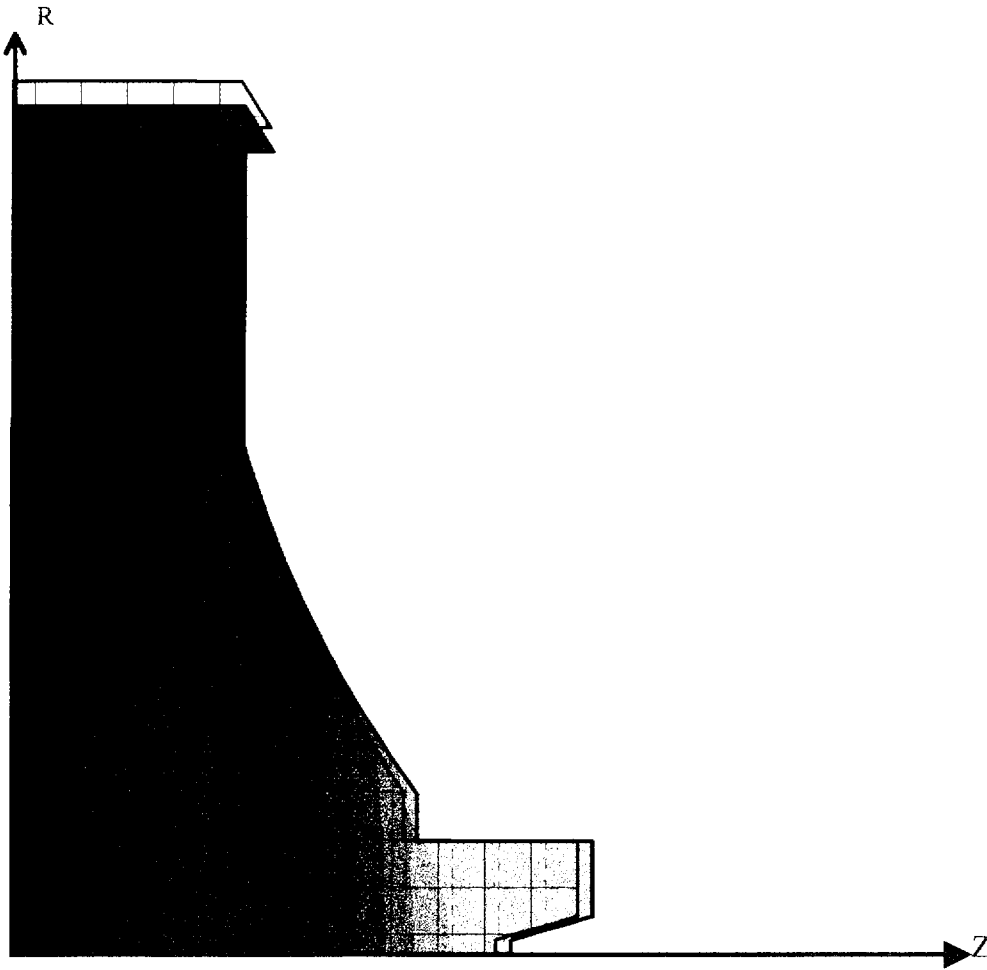


Figura 2

En la figura se observa con línea gris la deformación sufrida por la cuarta parte del volante, que se ha simulado con QF, suponiendo simetría axial y radial. Las tonalidades más oscuras muestran donde la componente azimutal σ_θ es mayor

Veamos los resultados :

Criterio	velocidad máxima	σ_{tr} (Tresca stress)
Límite elástico $\sigma_e=1.35e8 \text{ N/m}^2$	25000rpm	$1.34e8 \text{ N/m}^2$
Límite de rotura $R=106e8 \text{ N/m}^2$	50000rpm o superiores	$5.36e8 \text{ N/m}^2$

Tabla 7

Como se observa a 25.000rpm el criterio de rotura de Tresca nos da una presión $\sigma_{tr}=1.34e8 \text{ N/m}^2$, ligeramente inferior a límite elástico, $\sigma_e=1.35e8 \text{ N/m}^2$, por lo tanto no conviene superar dicha velocidad si empleamos el criterio más pesimista.

La masa del rotor es de 5700gr.

2.1.3. Estator

Es un núcleo toroidal hecho de una aleación de acero amorfa llamado METGLAS que permite reducir las pérdidas en el hierro. Existen ocho aleaciones de metglas en el mercado construidas con distintas proporciones de hierro, cobalto, níquel etc.

Siguiendo los consejos de su fabricante Allied Signal, el modelo que mas nos conviene es el 2605 SAI por sus bajas pérdidas en el núcleo y alta permeabilidad. La configuración de doble estator nos permite flujo axial.

El diseño magnético y eléctrico queda pospuesto al ensayo de continua.

2.2 Componentes :

2.2.1 Imanes

Se han elegido imanes de NdFeB por ser las mas fuertes magnéticamente hablando. Se colocarán encima del rotor, en el espacio designado para ello (ver esquema general). Su forma es rectangular, y para que se adapten mejor al borde circular del rotor, se han pensado varias opciones. La mas inmediata es redondear el lado en que se apoyan limándolos con una piedra de esmeril. El problema es que estos imanes se oxidan rápidamente y para evitarlo van recubiertos de Ni pero como no disponemos de una planta de niquelado se está estudiando la posibilidad de barnizarlos con otra sustancia. En cualquier caso esta opción es muy arriesgada y no asegura las propiedades magnéticas del imán. La otra opción es ajustar su forma con la pasta de pegamento con que se adhieran al rotor. En este caso hay que tener sumo cuidado para no desequilibrar la máquina con el peso del pegamento.

2.2.2. Arandelas

Después de una búsqueda exhaustiva de arandelas, las únicas disponibles en el mercado eran demasiado rígidas para amortiguar las vibraciones del motor. Se pensó sustituirlas por muelles, pero finalmente un anillo elástico va a cumplir su misión.

2.2.3 Motor de continua

Las exigencias del fabricante nos obligan a coger un motor de eje horizontal, con lo que nuestro volante va a trabajar en posición horizontal. Esta posibilidad no plantea ningún problema porque los cojinetes que soportan el peso del volante son radiales y funcionan incluso mejor en esta posición.

Cuando tengamos el diseño definitivo, en la segunda fase, se trabajará en posición vertical, tampoco habrá problema porque se han elegido las bolas con un ángulo de trabajo de 15°, que admite carga axial.

Las características eléctricas del motor son :

Alimentación : 48V

Velocidad: 16.000rpm

P=0.35Kw

Dimensiones : L=238mm H=80mm

2.2.4 Cojinetes

Cojinetes híbridos de bolas cerámicas, (de momento se sustituyen por bolas de acero) de alta precisión, y capaces de soportar grandes velocidades. La empresa proveedora SKF nos aconsejó las siguientes especificaciones :

Cojinetes modelo : **7004/CD/HC/P4A/D/B/A** que significa :

70 : Serie de rodamiento. Rodamiento de una hilera de bolas con contacto angular, Serie de dimensiones ISO 10

04 : diámetro del agujero ; 20 mm.

CD : Ángulo de contacto de las bolas y diseño interno ; DC = 15°

HC : Bolas cerámicas, que en principio van a ser sustituidas por bolas de acero, HA

P4A : Clase de tolerancia. Exactitud dimensional según ISO clase 4, y exactitud de giro.

D : Número de rodamientos en el conjunto ; D=2

B : Disposición de los rodamientos en el conjunto. B=back to back ; se eligió esta disposición porque soportan los esfuerzos en los puntos en los que se apoya el volante.

A : Precarga, A= ligera . La precarga es la fuerza que ejerce el contenedor y las arandelas sobre los cojinetes . En nuestro caso unos 60 Nw que en la escala SKF equivale a precarga ligera.

3. CÁLCULOS

3.1 Momento de inercia

Sabemos que el momento de inercia de un sólido rígido "I" respecto al eje que pasa por su centro de masas es :

$$I = \int r^2 dm(r)$$

$$dm = \rho dV = \rho 2\pi r dr h(r)$$

$$I = 2\pi\rho \int rh(r) dr$$

dividiendo la integral en intervalos de h cte. o de expresión determinada tenemos :

$$I = 2\pi\rho \int_{x_i}^{x_{i+1}} r^3 h(r) dr$$

donde los intervalos -en metros- son para :

$$0 < r < 0.01 \quad h = 0.05$$

$$0.01 < r < 0.014 \quad h = 0.035$$

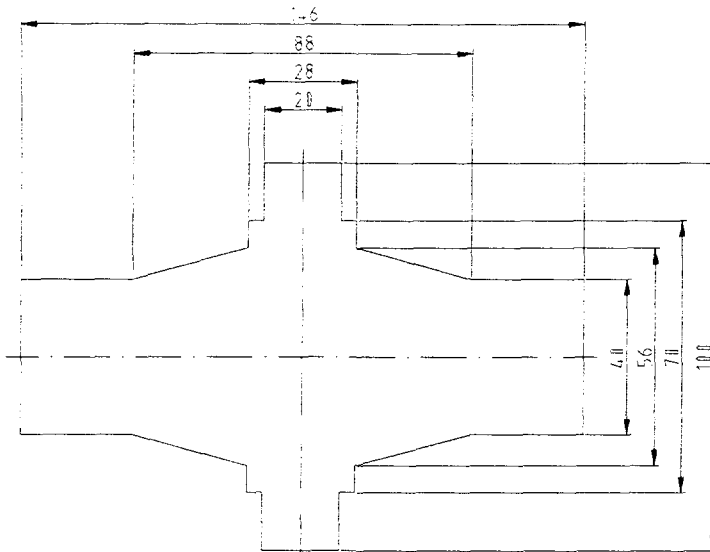
$$0.014 < r < 0.044 \quad h = -0.266r + 24.26$$

$$0.044 < r < 0.073 \quad h = 0.02$$

para simplificar los cálculos solo se ha tomado una sección del primer cuadrante ya que el problema tiene simetría cilíndrica, y se ha supuesto que es simétrico respecto al eje X.

Resultado **I=1.134kg*m²**.

El plano simplificado del rotor sobre el que se han hecho los cálculos, es el siguiente.



Figura

3.2 Energía :

La energía cinética de rotación de un sólido rígido ideal es :

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

donde I es el momento de inercia y ω la velocidad angular de rotación del sólido.

Para nuestro rotor en ausencia de pérdidas:

w(rpm)	w(rad/sg)	E (Julios)
10.000	1047	619.358'09
15.000	1570	1.392.668
20.000	2094.3	2.478.367
30.000	3141.6	5.576.326'5
40.000	4188.8	9.913.469'3
50.000	5235.9	15.489.796

Tabla 8. Valores de la energía en función de la velocidad .

Alcarnley obtiene 240kJ de energía aprovechable.

Potencia :

La potencia que alcance nuestro sólido ideal dependerá del tiempo que tarde en arrancar y transmitir esa energía. Como es un valor desconocido todavía, juguemos con algunos valores.

$$P = E/t$$

Potencia (Kw)	P _{10.000}	P _{15.000}	P _{20.000}	P _{30.000}	P _{40.000}	P _{50.000}
t=10sg	61'935	139'266	247'839	557'632	991'646	1548'979
t=60sg	10'322	23'211	41'306	92'938	165'224	258'163
t=300sg	2'064	4'642	8'261	18'587	33'044	51'632

Tabla 4.

Como puede observarse en ausencia de pérdidas y con tiempos de arranque razonables se obtienen valores muy altos de la potencia.

Alcarnley alcanza 25Kw de potencia transferida.

3.3 Potencia de pérdidas

Los valores de la potencia se han obtenido por extrapolación de los cálculos propuestos por Alcarnley en su tercer artículo [3], teniendo en cuenta las dimensiones de nuestro prototipo.

P_1 y P_2 representan las pérdidas por rozamiento con el aire, de la cara axial y radial del rotor

P_3 son las pérdidas de los cojinetes, en las que los parámetros empleados valen :

$f_0 = 9.2$ o factor de cálculo.

$v = 16 \text{ mm}^2/\text{sg}$ a $T = 100^\circ\text{C}$ o viscosidad dinámica .

$d_m = 10\text{mm}$ diámetro de las bolas.

Con todo esto se obtienen los siguientes resultados :

velocidad (rpm)	$2P_1(\text{W})$	$P_2(\text{W})$	$P_3(\text{W})$	$P_{\text{total}}(\text{W})$
10.000	13.55	14'72	2'69	30'96
15.000	40.7	49.09	5'68	95.47
20.000	90'56	111'42	9'14	211'00
30.000	275.84	360	18	653.7
40.000	608.62	825	29'17	1462
50.000	1123.7	1577	42'21	2742'9

Tabla 9.

Obviamente no podemos incluir las pérdidas en el estátor.

Estos son los cálculos teóricos de las pérdidas del rotor. Estos valores hay que contrastarlos con los experimentales, cuando conectemos el motor de dc. Entonces habrá que restar los 350 W de potencia máxima del motor sin carga ,a la potencia que desarrolle con carga para obtener las pérdidas. Todo lo dicho hasta ahora es válido para el ensayo con el motor dc