



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
PROTOTIPO DE MICROMOTOR
NEUMÁTICO DE ASPAS SIN RESORTES**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

MECÁNICA - DISEÑO MECÁNICO

P R E S E N T A :

FRANCISCO JAVIER NARANJO CHÁVEZ

DIRECTOR:

DR. GABRIEL ASCANIO GASCA

CO-DIRECTOR:

DR. ERNST KUSSUL MIKHAILOVICH

2006





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. RICARDO CHICUREL UZIEL

Secretario: DR. GABRIEL ASCANIO GASCA

Vocal: DR. ERNST KUSSUL MIKHAILOVICH

1er. Suplente: DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ

2do. Suplente: M. I. LEOPOLDO ADRIÁN GONZÁLEZ GONZÁLEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO,
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA,
MEXICO D. F., MEXICO.

TUTOR DE TESIS:
DR. GABRIEL ASCANIO GASCA



FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Yo solo no he conseguido todos estos logros y alegrías que me invaden. Siempre he recibido ayuda de cualquier tipo, por lo que hago patente mi agradecimiento a todos aquellos seres que han estado conmigo en mi desarrollo académico y humano, haciéndome una mejor persona.

La familia es una base importante en la educación de una persona y agradezco de todo corazón a mis parientes cercanos en especial:

- *A mis padres, por su apoyo y cuidado incondicional.*
- *A mis hermanos, por su alegría, sonrisa y apego.*
- *A mi abuelo, por su sabiduría.*
- *A Nadia, por su paciencia.*

Así también, hago constar mi gratitud hacia todos mis compañeros de maestría en ingeniería mecánica e instrumentación: Héctor Cordourier, Alejandro Torres, Felipe Altamirano, Violeta Márquez, Ulises Peñuelas, Rafael Luna; por todos los momentos amenos.

Para poder desarrollarme en el mundo académico es importante la correcta guía de mis pasos, por lo tanto, hago mención de gratitud hacia mis profesores y tutores, en particular:

- *Al Dr. Gabriel Ascanio Gasca, por las bases de conocimiento.*
- *Al Dr. Ernst Kussul, por sus sabios consejos.*
- *Al Dr. Ricardo Chicurel, por su conocimiento transmitido.*

Para lograr metas se necesita ser humilde y saber reconocer a los que saben su trabajo, por ello agradezco a los técnicos que me apoyaron en el desarrollo de este proyecto en específico a: Alejandro Pérez y Juan Arenas del taller mecánico del CCADET; Alejandro Pérez Vargas y Alejandro Maya Trejo del taller mecánico del Instituto de Ingeniería.

En México se esta dando apoyo a todo ciudadano que quiera superarse, y extendo mi agradecimiento al CONACYT por su confianza otorgada para mi desarrollo.

DEDICATORIAS

Dedico todos mis logros pasados, presentes y futuros, y especialmente esta tesis:

A mis Padres

Maria Luisa Chávez Jiménez y Francisco Javier Naranjo Flores

Por su cariño, amor y apoyo

A mis hermanos

Christian Iván y Evelin Hayde Naranjo Chávez

Por tantas horas de buena convivencia

A mi abuelo

Alfredo Naranjo Olguín

Porque ahora tiene algo más que una promesa

A mi complemento

Nadia Paula Sánchez Camargo

Por su apoyo, aunque a veces no me entienda

A mi primo

Adrián Chávez Macías

Por seguir unos pasos nunca trazados

Y a todos mis amigos que he encontrado en la ciudad de Querétaro y México

Por el trabajo en equipo, consejos, y tertulias juntos.

PENSAMIENTO

Posado en un peldaño alto de la pirámide se encuentra el jaguar. Su aliento aún está caliente, su mirada brillante y su valor intacto. El jaguar tiene las garras aún enmugrecidas de lodo y sangre. Muestra con orgullo su presa. El sacrificio y el esfuerzo han valido la pena, y ahora está más cerca del cielo.

Estando en el pedestal, recuerda cuando dejó a su manada y llegó a un lugar nuevo, desconocido y caótico, llamado "selva". El nadar en ríos fríos de soledad y deambular en caminos con cegadora niebla era el martirio diario de su vida. Sin embargo, sus hermanos, el águila y el ave de las mil voces, lo apoyaban. Ellos eran sus ojos en el horizonte y su guía en la batalla. Después de derrotar al terrible espectro de la desesperación, el jaguar llegó al sitio de la decisión. En ese lugar descargó el instinto magno de su espíritu y persiguió su objetivo. Al final, lo capturó a base de perseverancia, sudor y sangre.

Ahora mira a lo lejos y ve el nuevo camino a recorrer. Sabe que debe crecer y convertirse en lo más grande. Entonces, una luz cósmica lo envuelve en un ambiente celestial, lo eleva más allá de lo que alcanza la vista. Se ve una explosión seguida de un estruendo ensordecedor. Todos quedan enmudecidos ante el temible espectáculo. Se ve una luz sagaz descender y colapsar contra lo alto de la pirámide. La luz se extingue lentamente, mientras se logra divisar la figura de un cachorro. ¡Es el jaguar convertido en un pequeño tigre!

Ha terminado la era del jaguar y empieza la del tigre. Es hora de caminar y seguir adelante.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	XIII
RESUMEN.....	XV
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Micromecánica	1
1.1.1. Escalamiento.....	2
1.2 Micromecánica en México	2
1.3 Micromotores en el mundo.....	4
1.4 Micromotores desarrollados en el CCADET.....	5
1.5 Los motores neumáticos	6
1.6 Tipos de motores neumáticos	7
1.6.1. Motores neumáticos de paletas.....	7
1.6.2. Motores neumáticos de pistones.....	7
1.6.3. Motores neumáticos de engranes.....	8
1.7 Prototipos de micromotores neumáticos.....	9
2. GENERALES.....	11
2.1 Definición del proyecto	11
2.2 Justificación.....	11
2.3 Objetivo general	12
2.4 Objetivos específicos.....	12
2.5 Alcances	12
3. MÉTODOS Y MATERIALES.....	13
3.1 Principio de operación.....	13
3.1.1. Análisis teórico.....	15
3.1.1.1. Geometría de los compartimentos del micromotor	15
3.1.1.2. Potencia y par del motor ideal	18
3.1.1.3. Flujo másico	21
3.2 Diseño conceptual	22
3.2.1. ¿Por qué sin resortes?.....	22
3.2.2. Consideraciones de diseño	24
3.3 Descripción.....	24
3.3.1. Partes principales.....	24
3.3.1.1. Estator.....	24
3.3.1.2. Rotor ranurado.....	25
3.3.1.3. Flecha perforada	26
3.3.1.4. Aspas rectangulares	27
3.3.2. Partes auxiliares.....	28
3.3.2.1. Tapas.....	28
3.3.2.2. Tapa portarrodamiento	28

3.3.2.3.	Brida	29
3.3.2.4.	Carcasa	29
3.3.2.5.	Tubo auxiliar de alimentación	30
3.4	Caracterización	31
3.4.1.	Diseño de banco de pruebas	31
3.4.2.	Selección de elementos del banco de pruebas	31
3.4.3.	Condiciones iniciales de operación	32
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS	33
4.1	Velocidad.....	33
4.2	Par a rotor bloqueado.....	35
4.3	Potencia al freno	36
4.4	Especificaciones de operaciones	39
4.5	Aplicaciones posibles	39
	CONCLUSIONES.....	43
	RECOMENDACIONES	44
	TRABAJO A FUTURO	46
	Segundo diseño del micromotor neumático	46
	REFERENCIAS	51
	ANEXOS.....	53
	ANEXO 1. Especificaciones de los componentes del banco de pruebas	53
	ANEXO 2. Tablas de resultados de pruebas	56
	ANEXO 3. Escalamiento de fuerzas neumáticas	59
	ANEXO 4. Planos de detalle del micromotor neumático de aspas.	61

INTRODUCCIÓN

El término micromecánica es muchas veces confundido. Micromecánica no significa hacer o desarrollar dispositivos tan pequeños que sólo los podamos ver con microscopio, sino desarrollar dispositivos que tengan partes con dimensiones y tolerancias del orden de micrómetros. Por ejemplo, un reloj puede ser una micromáquina puesto que tiene elementos muy pequeños, con tolerancias muy estrechas.

La micromecánica, desde el surgimiento de los llamados MEMS (Micro Electro Mechanical System), que empieza con la litografía, ha tenido gran auge y México no es la excepción. En los últimos años, el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (CCADET, UNAM) se ha enfocado al desarrollo de microdispositivos con un concepto generacional, y con técnicas de fabricación convencional como son los centros de maquinado, tornos y fresas, con lo cual el laboratorio se ha involucrado en el ámbito mundial de la micromecánica.

Para la fabricación de piezas industriales se tiene muchas alternativas de manufactura, desde las más rudimentarias como son la fundición o el forjado, hasta las nuevas técnicas como la litografía o los métodos abrasivos de materiales. La fabricación de microdispositivos con técnicas convencionales de manufactura, como son el torneado y el fresado, es una alternativa relevante, porque las técnicas más avanzadas no pueden manufacturar micropiezas tridimensionales de geometría compleja. Pero los métodos convencionales lo pueden hacer.

Una de las teorías que involucra a la fabricación de microdispositivos es la teoría de escalamiento de dimensiones y todos sus efectos en el sistema. Desde hace tiempo, se ha investigado el escalamiento de los fenómenos físicos con modelos matemáticos bien definidos, desarrollados para el entendimiento de microtecnología.

El desarrollo de microfábricas es una tarea de actualidad, el cual consiste en que todos los elementos de una fábrica sean reducidos hasta lograr dimensiones tales que se puedan colocar en una mesa. Estos elementos podrán ser operados desde un centro de mando en la misma habitación donde se encuentra la microfábrica, por uno o dos operadores.

Una parte fundamental de las fábricas y mecanismos son los actuadores, que son dispositivos que dan la movilidad a todos los elementos de un sistema, por lo que el desarrollo de microactuadores se ha hecho una constante para el desarrollo de las llamadas microfábricas. Todas las máquinas y fábricas necesitan actuadores, como son los motores. Entonces se deben desarrollar micromotores para las microfábricas. Los principales micromotores desarrollados en el mundo son accionados con energía eléctrica, pero las alternativas de energía son amplias, como lo son: la energía solar, eólica o calorífica. Los motores neumáticos son una alternativa de investigación en este momento.

Los motores neumáticos presentan ventajas y desventajas con respecto a otros motores. Entonces para la micromecánica, el desarrollo de un micromotor neumático de cualquier tipo podrá tener las mismas ventajas con respecto a otros micromotores con otro principio de operación de similar tamaño. Unas de las ventajas de estos micromotores

neumáticos son: bajo peso, potentes y veloces en comparación con micromotores eléctricos.

El desarrollo de la tecnología depende fuertemente de los recursos económicos disponibles. Por esta razón, el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica ha adoptado una filosofía de bajo costo en el desarrollo de microdispositivos, y así, poder competir con los grandes laboratorios del mundo donde no escatiman en recursos económicos.

La micromecánica es una línea de investigación que tiene muchas ramas, como lo son: Micromecánica de materiales, diseño de microdispositivos, miniaturización, microfluidos, análisis de esfuerzos en microelementos, etc. En un futuro no muy lejano la micromecánica se podrá encontrar en todas partes, así como, la electrónica fue un día un sueño y hoy es una realidad. Porque recordemos que sí existe hoy, mañana se podrá llegar a sistemas más pequeños.

RESUMEN

En el laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como a nivel mundial, se desarrollan microdispositivos y micromáquinas herramientas. Algunos de estos son los micromotores. Los más investigados son los eléctricos y electromagnéticos, pero tiene la desventaja de que su eficiencia decrece conforme su tamaño se reduce. Por lo anterior, desarrolle un micromotor neumático de aspas, el cual consta de cuatro partes principales: un rotor ranurado, una flecha perforada, un estator con un agujero excéntrico y aspas rectangulares, además de partes auxiliares y de unión. La carcasa se diseñó para ser el sistema de alimentación, lo cual da un mejor aspecto y facilidad en el ensamble. Las aspas son fabricadas en PTFE cargado de bisulfuro de molibdeno para evitar la utilización de lubricantes y evitar su desgaste excesivo. El principio de operación del micromotor es descrito mediante un análisis del ciclo termodinámico del funcionamiento. El diseño es novedoso, ya que el micromotor no cuenta con resortes.

Para la caracterización del micromotor se diseñó un banco de pruebas seleccionando elementos electroneumáticos comerciales. Una serie de pruebas fue realizada para medir: par máximo entregado, velocidad máxima y potencia de micromotor a diferentes presiones del aire suministrado. Los resultados son satisfactorios con las expectativas. Por último se dan las aplicaciones para este micromotor, los trabajos a futuro y las bases para seguir con la investigación y desarrollo de estos microdispositivos.

1. ANTECEDENTES

1.1 Micromecánica

La micromecánica o micromáquinado (Madou *et al.* 2001) se refiere a la fabricación de dispositivos con dimensiones en el rango de micrómetros. En los primeros años, esta disciplina de la mecánica y la electrónica se basó en procesos de capas o películas delgadas, así como en materiales corrosivos, todos ellos hechos en los laboratorios académicos de fabricación, haciendo énfasis en procesos como la litografía por rayos ultravioleta, cristal simple de silicio, y policristalina de silicio para aplicaciones mecánicas, tales como sensores de presión, acelerómetros y giroscopios (*Figura 1*). En los años 90, las aplicaciones del micromaquinado se ampliaron, enfatizando la visualización del micromaquinado. Los métodos de fabricación de los circuitos integrados han sido evaluados para la miniaturización; con técnicas como el micromoldeo, maquinado con hilo cargado (WEDM por sus siglas en inglés), maquinado láser, maquinado rayo iónico y de electrones, control numérico computarizado (CNC) y fresado con diamantes ultra finos. Sin embargo, es necesario investigar sobre avances de materiales para la renovación de microdispositivos para nuevas aplicaciones.

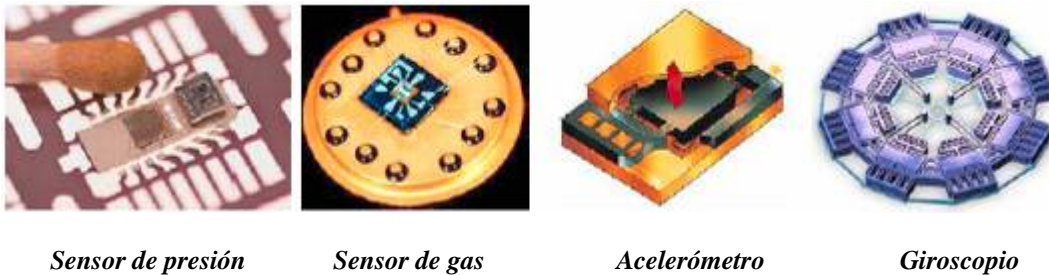


Figura.1 Microdispositivos (Bachean et al. 2005)

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS por sus siglas en inglés) o los llamados BIOMEMS - MEMS aplicados a la medicina o bioquímica - son muy populares en la actualidad, al igual que las técnicas de elaboración de microdispositivos, como es la ingeniería de la miniaturización; disciplina con base en el conocimiento profundo de aplicaciones específicas, pero llevada a una escala menor a las actuales. Es una rama de la micromanufactura con relación al comportamiento de materiales y leyes de escalamiento, donde las estructuras y dimensiones se escalan de forma isomorfa.

Muchos métodos de miniaturización comienzan con la litografía (Brodie and Murray *et al.* 1982; Thompson *et al.* 1994; Maluf *et al.* 2000; Madou *et al.* 2001); esta técnica consiste en transferir copias de un patrón en la superficie de un material sólido, tal como una hostia de silicio (*Figura 2*). El método más usado en la litografía es la fotolitografía, que de forma constante y rápida crecen sus habilidades para realizar piezas cada vez más pequeñas. Para la industria, el desarrollo de este método de fabricación provocó el surgimiento de una nueva alternativa, la litografía por rayos X o litografía de rayo de luz.

Después del método por rayos X, la siguiente generación en la litografía es la técnica LIGA (por sus siglas en alemán), la cual contempla todas las ventajas de la litografía por rayos X y algunas mejoras más (IMM *et al.* 1995; Lehr *et al.* 1995; Madou *et al.* 2001), lo que permite elaborar maquinados de mejor calidad y de menores dimensiones que la de rayos X.

La litografía tiene diferentes modos de erosionar el material a maquinar, que se encuentran en dos grandes grupos; el patrón con técnicas de abrasivo en seco y de aditivos (Zern *et al.* 1978; Madou *et al.* 2001). Por ejemplo, para la construcción de sensores piezoeléctricos se utiliza el micromáquinado de espesor húmedo, donde los materiales manufacturados son el cuarzo o germanio cristalino (Madou *et al.* 2001).

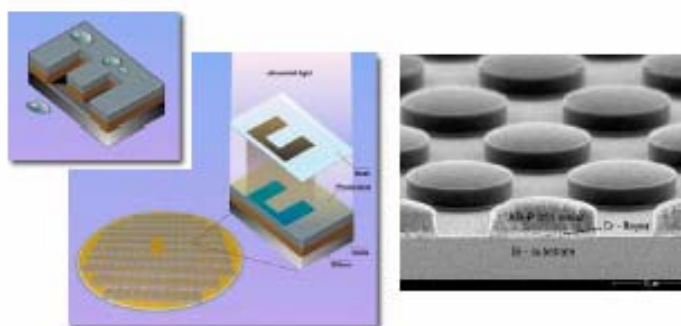


Figura 2. Principio de la Litografía (Bachean et al. 2005).

1.1.1. Escalamiento

Pasando a otro punto, el escalamiento posee ciertas reglas o leyes, aplicables a las técnicas clásicas de fabricación, así como la manufactura de precisión se vuelve más importante. Entonces, la comprensión de tal concepto se debe tener en cuenta al escalar isomórficamente un dispositivo. Por ejemplo, el área del dispositivo miniaturizado se reduce a razón cuadrática comparada con su longitud, o en el caso del volumen decrece cúbicamente, por lo que se pueden hacer modelos matemáticos de escalamiento de fuerzas de cualquier tipo: eléctrico, magnético, neumático, entre otros, y escalamiento de inercia, masa, energía, trabajo, y más (Madou *et al.* 2000).

La naturaleza es una guía para la miniaturización, además de ser una justificación contundente de la importancia de esta rama. Sí se toman de ejemplo a las hormigas que logran cargar hasta cien veces su propio peso, y a los elefantes que no pueden cargar otro elefante, se puede esperar que los microdispositivos tengan mayor fuerza relativa a su tamaño.

1.2 Micromecánica en México

En México, la micromecánica ha tenido un gran avance durante los últimos años. En el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM) del CCADET de la UNAM se ha desarrollado esta línea de investigación desde 1996, con la filosofía de realizar dispositivos a bajo costo. Para lograr esto, se emplea un sistema de fabricación generacional descendente, que consiste en hacer una máquina de ciertas dimensiones y en seguida, con

esta misma máquina, elaborar la siguiente generación, la cual será de dimensiones menores, así, sucesivamente, hasta llegar a sistemas del orden de micrómetros (*Figura 4*) (Kussul *et al.* 1996, 2002).

Dentro del LMM se han desarrollado prototipos de microcentros de maquinado con diferentes conceptos, como el de maquinado CNC (*Figura 3*) (Kussul *et al.* 2002), o la micromáquina basada en paralelogramos (Marín *et al.* 2003, Ruiz *et al.* 2000).

Con el desarrollo de la micromecánica se han perfeccionado sistemas de reconocimiento de imágenes con base en redes neuronales, para observar la calidad de la manufactura de las micropiezas (Baidyk *et al.* 2003, Kussul *et al.* 1997).

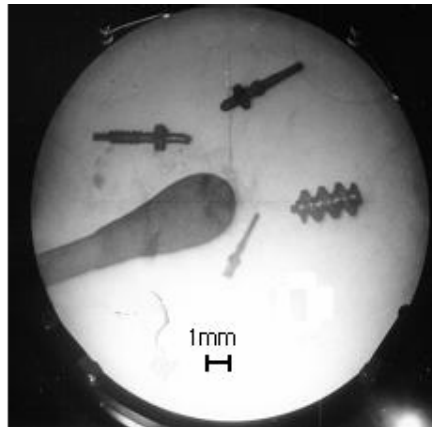


Figura 3. Microdispositivos hechos en México (Kussul et al. 2002)

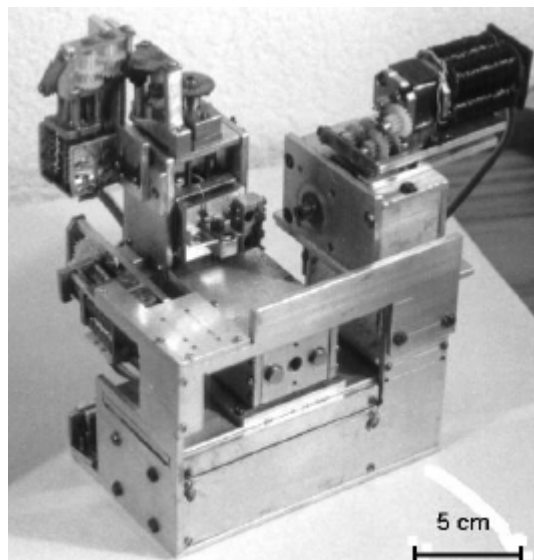


Figura 4. Micromáquina de primera generación (Kussul et al. 2002)

En la actualidad, se están procesando nuevos microdispositivos y formas de control para las micromáquinas, así como micromanipuladores y microactuadores (Naranjo *et al.* 2005; Patiño *et al.* 2005). El LMM cuenta con un gran crecimiento; y la colaboración de otras

instituciones servirá para que la nueva generación de micromáquinas y herramientas evolucionen.

Una aplicación de la micromecánica se encuentra en procesos de microfiltrado. Para obtener una mayor pureza del aire o del fluido con el que trabaja la industria química en sus procesos de destilación, se utilizan filtros llamados de filtración fina con los que se pueden retirar partículas del orden de micrómetros. El doctor Kussul diseñó un filtro mecánico (Kussul *et al*, 2002), cuyo prototipo tiene ranuras de filtración de una micra; se llama mecánico porque está hecho con partes sólidas que no absorben ningún fluido, es de mayor eficacia que los filtros de carbono; ya que en estos últimos, el fluido tarda en salir y lo hace con poca presión. Con un ancho de ranura adecuado para filtrar el agua, este desarrollo podría tener uso doméstico.

Por otro lado, en el Centro de Diseño y Manufactura (CDM) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se desarrolla el proyecto de cuartos limpios, donde se tiene el mejor ambiente para la manufactura de micropiezas.

1.3 Micromotores en el mundo

Los microactuadores son de gran importancia para los microdispositivos. En el ámbito mundial se han generado muchos trabajos con respecto a este tema y en particular, el de los micromotores.

Los motores convencionales se clasifican según la energía aplicada para transformarla en energía mecánica; pueden ser motores electromagnéticos, hidráulicos, neumáticos, térmicos y piezoeléctricos. También pueden dividirse en motores a pasos, continuos, y otros.

Desde el nacimiento de la litografía se han desarrollado micromotores para aplicación en micromanipuladores, microfabricación o transferencia de movimiento. Los más conocidos son los electrostáticos (Trimmer y Gabriel *et al*. 1987; Madou *et al*. 2000), que tienen una configuración parecida a un motor a pasos. Hasta hoy, se ha fabricado un micromotor con un rotor del orden de micrómetros (*Figura 5*). Además, muchos laboratorios han realizado diversos modelos de este tipo de micromotor. Por ejemplo, existe uno eléctrico llamado motor armónico, que consiste en un rotor que se mueve excéntricamente dentro de un estator de mayor diámetro. Sin embargo, la gran desventaja de los micromotores eléctricos es su baja eficiencia conforme su tamaño decrece (Trimmer y Jebens *et al*. 1989). Por lo anterior, se han tenido que investigar otras alternativas de energía como la magnética (Madou *et al*. 2000).

En 1960, William McLellan concedió a Richard Feynman mil dólares por haber fabricado el primer motor eléctrico en operación de sólo 1/64 de pulgada con un rotor de magneto permanente; pero la inducción está limitada a 1.5 T; por lo tanto, es una restricción de los micromotores electromagnéticos.

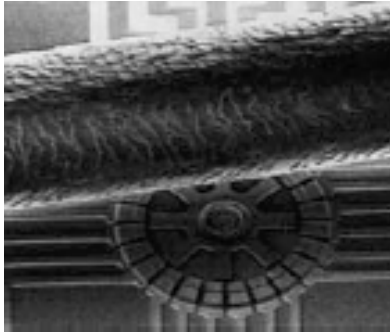


Figura 5. Micromotor eléctrico fabricado con MEM'S, comparado con un cabello humano (Bachean et al. 2005).

Los micromotores piezoeléctricos son de gran densidad de energía y de mucho trabajo útil, pero hacen falta hacer configuraciones (Flynn et al. 1992). Los motores térmicos tienen la misma desventaja que los micromotores eléctricos, la eficiencia disminuye conforme se reducen sus dimensiones. La energía química no se ha utilizado para los micromotores, pero sí para actuadores lineales (Hamberg et al. 1995). Por último, la energía hidráulica es muy poderosa y se ha utilizado desde hace mucho tiempo. No se tienen muchas investigaciones sobre este tipo de micromotores. Sin embargo, en el LMM se está desarrollando un micromotor hidráulico con configuración de engranes, el cual se puede observar en la *Figura 6-b* (Patiño et al. 2005).

1.4 Micromotores desarrollados en el CCADET

En el LMM del CCADET se han fabricado micromotores para aplicaciones en micromáquinas y herramientas desarrolladas en el mismo laboratorio. La mayor parte de los micromotores hechos aquí son electromagnéticos, que como ya se mencionó, reducen su eficiencia al miniaturizarlos. Actualmente, se buscan nuevas alternativas de micromotores, como son el hidráulico y el neumático. El electromagnético más pequeño que se ha desarrollado en dicho laboratorio es de 8 milímetros de diámetro (Caballero et al. 2003). Se han hecho algunas variaciones y mejoras a estos micromotores, aunque de mayor tamaño y eficiencia, comparados con los fabricados en otros países (López et al. 2005).

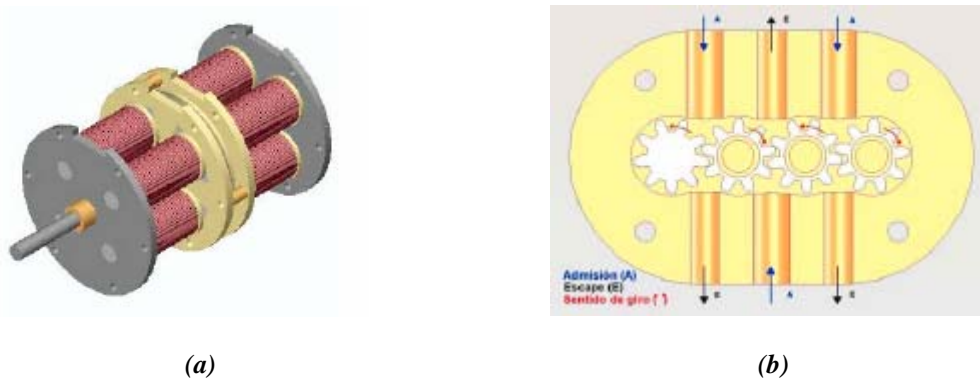


Figura 6. Micromotores desarrollados en el CCADET con distinto principio de operación: (a) Electromagnético (López et al. 2004); (b) Hidráulico (Patiño et al. 2005)

1.5 Los motores neumáticos

Las características generales de los motores neumáticos son:

- Diseño compacto y ligero. Un motor neumático pesa menos que uno eléctrico de la misma potencia y es de menor volumen.
- Los motores neumáticos desarrollan mayor potencia con relación a su tamaño que los motores eléctricos.
- Los motores neumáticos no se dañan cuando se bloquean por sobrecargas y no importa el tiempo que lo estén. Cuando la carga baja a su valor nominal, el motor vuelve a funcionar de manera correcta.
- Los motores neumáticos se pueden arrancar y parar de forma ilimitada. El arranque, el paro y el cambio de sentido de giro son prácticamente instantáneos.
- El control de velocidad tiene una variación infinita. Se logra con una válvula montada a la entrada del motor.
- El par y potencia son regulables, variando la presión de trabajo.
- La posibilidad de que se produzca una explosión en presencia de gases inflamables es por lo general nula.
- Cuando el motor gira, el aire expandido enfría el motor. Por eso, los motores pueden usarse en ambientes de altas temperaturas.
- Mantenimiento mínimo. El aire comprimido debe estar limpio y bien lubricado, lo que reduce desgastes en el motor y elimina tiempos de parada al alargar la vida del motor.
- Los motores neumáticos pueden trabajar en cualquier posición. Y pueden trabajar en ambientes sucios sin que se dañe el motor.
- No pueden quemarse, pues no se calientan cuando se sobrecargan, aún al estar bloqueados durante largo tiempo.
- Las líneas neumáticas de suministro de aire y su mantenimiento son más económicos que las hidráulicas. Las presiones son mucho más bajas.
- Las conexiones y los empalmes de las tuberías neumáticas son limpias.
- Pequeños escapes de aceite en las líneas hidráulicas pueden causar caídas del personal, incendios, atacar partes pintadas o contaminar productos. Los motores neumáticos no tienen este inconveniente.

Estas ventajas suponen un ahorro en el entorno de trabajo de los motores neumáticos.

1.6 Tipos de motores neumáticos

1.6.1. Motores neumáticos de paletas

Estos motores tienen un rotor montado excéntricamente en un cilindro y con paletas longitudinales alojadas en ranuras a lo largo del rotor. El par se origina cuando el aire a presión actúa sobre las paletas. El número de éstas suele ser de cuatro a ocho. En general, cuatro o cinco paletas son suficientes para la mayoría de las aplicaciones. Se utilizan mayor número de ellas cuando se necesita mejorar la confiabilidad de la máquina y su par de arranque. Los motores de paletas giran desde 3 000 a 250 000 rpm. en vacío. En la *Figura 7* se muestra la configuración básica de un motor neumático de paletas.

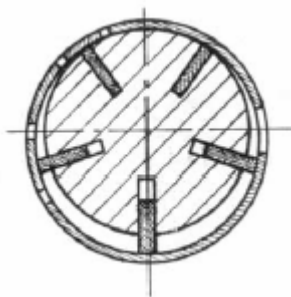


Figura 7. Motor neumático de paletas

Como norma general, los motores deben trabajar con una precarga para evitar que giren a velocidades altas. Cuando el motor vira sin carga, las paletas rozan sobre el cilindro mayor número de veces que cuando el motor trabaja con carga. Esto supone un desgaste innecesario de las paletas y de la pared del cilindro sobre la que se deslizan. La vida de las paletas se prolongará al trabajar el motor a velocidades moderadas y alimentar con aire al motor debidamente limpio y lubricado con aceite en suspensión.

Los motores de paletas giran a velocidades altas y desarrollan mayor potencia en relación con su peso que los motores de pistones, sin embargo, tienen un par de arranque menor. Asimismo, son más ligeros y económicos que los motores de pistones de potencia similar, además de ser los de uso más frecuente.

1.6.2. Motores neumáticos de pistones

Los motores neumáticos de pistones tienen de cuatro a cinco cilindros. La potencia se desarrolla bajo la influencia de la presión encerrada en cada cilindro. Trabajan a velocidades más bajas que los motores de paletas; tienen un par de arranque elevado y buen control de velocidad. Se emplean para trabajos a baja velocidad con grandes cargas; pueden tener los pistones colocados de forma axial o radial. En la *Figura 8-a* se muestra un motor neumático con pistones radiales.

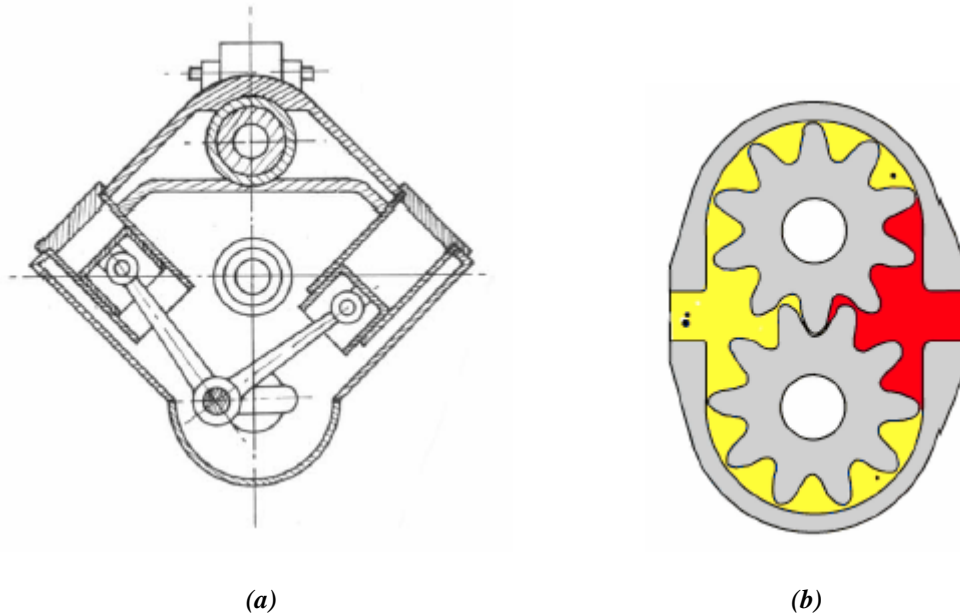


Figura 8. Motor neumático: (a) de pistones; (b) de engranes.

La mayor restricción de los motores neumáticos de pistones es su baja eficiencia comparada con los motores eléctricos, debido a las mermas de aire presurizado dentro de las cámaras, donde éstas han sido poco a poco minimizadas en los cilindros neumáticos por el desarrollo de técnicas de sellado efectivo.

1.6.3. Motores neumáticos de engranes

El funcionamiento de los motores neumáticos de engranes consiste en que el aire comprimido se admite por un lado en la línea de contacto de las ruedas dentadas y escapa por el otro, después de provocar su rotación. Una rueda se acopla solidaria de su eje y la otra montada sobre rodamientos gira "loca". La transmisión del par se realiza por el flanco de los dientes y no tiene influencia sobre el estancamiento de aire. El motor neumático debe ser alimentado a una presión máxima de 7 bar. con aire limpio y lubricado. El par disponible en bajas velocidades y el buen rendimiento en bajas presiones permiten las condiciones ideales de utilización de este tipo de motores, con aire a una presión entre 4 ó 5 bar., por lo general, disponibles en todas las fábricas. En la *Figura 8-b* se muestra la configuración de un motor neumático de engranes.

Los motores neumáticos de engranes tienen dos engranajes iguales cuyas ventajas son bien conocidas:

- Par de arranque y rendimiento elevados.
- Simplicidad de piezas en movimiento, que giran de forma simétrica sin excentricidad ni desequilibrio.
- Completa reversibilidad.

- Medidas y peso reducido.
- Libres de mantenimiento.

1.7 Prototipos de micromotores neumáticos

Como ya se dijo con anterioridad, los motores neumáticos tienen muchas ventajas con respecto a otros de igual tamaño. Esta alternativa de energía no sólo se ha desarrollado en el ámbito mundial para los micromotores, sino para todos los microactuadores en general. Se han fabricado prototipos de todo tipo, desde micromotores hasta microactuadores lineales y músculos neumáticos, así como microturbo maquinaria. Para este tipo de microactuadores ha surgido una rama de la micromecánica llamada microfluidos (Hseih, Lin, Huang *et al.* 2004; Löfdahl, Gad-el-Hak *et al.* 1999; Gad-el-Hak *et al.* 2003). Se han desarrollado microbombas (Gad-el-Hak *et al.* 2003; Yin, Prosperetti *et al.* 2005), microventiladores (Grimes, Quin, Kunz *et al.* 2003), microturbinas (Govardhan, Dhanasekaran *et al.* 2001; Gad-el-Hak *et al.* 2003) y más. Las técnicas de fabricación de MEMS tienen la dificultad de no poder adaptar la manufactura de piezas tridimensionales ni el ensamble de componentes. Por ello, no se han podido generar micromotores neumáticos del orden de micrómetros. En Estados Unidos se han perfeccionado microturbinas a partir de una configuración de la microbomba (Bart, 1990; Ritcher, 1991; Fuhr, 1992 y Shartchandra, 1998). Ésta es del tipo centrifuga de álabes. DeCourtey, en 1998, propuso que esta configuración puede utilizarse también como una microturbina de álabes. En Alemania, se desarrolló un microventilador de hasta 150 micrómetros de diámetro con una velocidad de operación de 44 800 rpm (R. Grimes, D. Quin, S. Kunz *et al.* 2003). Este microventilador sólo tiene cinco álabes y no se puede usar como una microturbina, porque es difícil mantener una velocidad constante con tan pocos álabes. Japón es el lugar donde se han desarrollado más dispositivos de este tipo; tienen varios diseños de motores neumáticos con miras a ser reducidos (Suzumori y Hashimoto *et al.* 2002). Pero tienen el problema de un alto costo de producción. En el centro de investigación y desarrollo de Toshiba se ha fabricado un micromotor neumático a pasos de tan solo 9 mm de diámetro (Suzumori *et al.* 1998), el cual consiste en tres partes principales: un rotor de engrane con dientes exteriores, un estator con engrane de dientes interiores y un hule especial unido al rotor. Dicho hule fue desarrollado en el mismo laboratorio teniendo propiedades elásticas peculiares, con el fin de aprovechar la deformación para el movimiento del rotor. El micromotor es alimentado de aire presurizado por medio de 6 puertos de entrada. Pero este prototipo de micromotor neumático tiene la desventaja de ser pobre en velocidad y tener un alto costo la manufactura del hule especial.

Desde hace varios años, el desarrollo de micromotores con principios de operación como el neumático ha despertado gran interés. En el presente trabajo se describe el desarrollo de un micromotor neumático de aspas sin resortes, que se inició desde septiembre del 2004 (Naranjo *et al.* 2005).

2. GENERALES

2.1 Definición del proyecto

El trabajo pretende desarrollar un prototipo de micromotor neumático de aspas para el uso del LMM del CCADET de la UNAM.

2.2 Justificación

Como se mencionó, en el mundo se han desarrollado micromotores con diferentes principios de funcionamiento; los más investigados son los electromagnéticos y electrostáticos. Sin embargo, la experiencia y las leyes de escalamiento muestran que el uso de este tipo de micromotores en las futuras microfábricas, demandará un mayor consumo de energía respecto a la disminución de su tamaño. Además, los micromotores electrostáticos producidos por medio de la tecnología MEMS, no tienen suficiente potencia para ser empleados en micromáquinas-herramientas y micromanipuladores.

Hasta hoy, dentro del LMM se han desarrollado solamente micromotores electromagnéticos, así que dicho laboratorio se ha visto en la necesidad de investigar otras alternativas de energía para los micromotores, por ejemplo, los hidráulicos y neumáticos, ya que presentan ventajas que pueden ofrecer las futuras generaciones de las micromáquinas-herramientas.

Por todo lo anterior, el desarrollo de un micromotor neumático está justificado por: la necesidad de tener mejores alternativas de micromotores para aplicar en las próximas generaciones de las micromáquinas-herramientas. Sin embargo, no sólo se podrán utilizar estos micromotores en esta línea de investigación, sino que en medicina y en especial en la odontología pueden ser aplicados.

2.3 Objetivo general

- Desarrollar un prototipo de micromotor neumático de aspas sin resortes.

2.4 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema que permita mantener las aspas en contacto con la pared interior del estator sin necesidad de utilizar resortes.
- Desarrollar un micromotor neumático que no requiera el empleo de fluidos lubricantes.

2.5 Alcances

- Diseñar y construir un prototipo físico de micromotor neumático de aspas sin resortes.
- Desarrollar un banco de pruebas y la metodología para la caracterización del micromotor neumático.
- Establecer las guías y metodología para el escalamiento descendente, con el fin de sentar las bases para el desarrollo de micromotores de nuevas generaciones con dimensiones menores.

3. MÉTODOS Y MATERIALES

3.1 Principio de operación

El micromotor neumático de aspas sin resortes tiene un funcionamiento similar a un motor neumático de aspas típico. A continuación se describe el funcionamiento.

Primero, es necesario mencionar que el aire será suministrado a dos diferentes presiones: una presión (P_{flecha}) aplicada a la flecha y otra para el movimiento del rotor (P_1).

Inicialmente, se aplica aire presurizado al *racor* central del sistema de alimentación (P_{flecha}) que entra a la flecha hueca hasta llegar a la sección donde se encuentra el rotor. En seguida, se introduce a los canales entre el interior de la flecha y las ranuras del rotor; aunque la presión disminuye por la diferencia significativa en los diámetros de los ductos, el aire proporciona la suficiente fuerza para empujar las aspas y mantenerlas en contacto con la pared interior del estator, formando las cámaras de trabajo. En la *Figura 9* se muestra a grandes rasgos el flujo del aire dentro de la flecha hasta provocar el movimiento radial de las aspas.

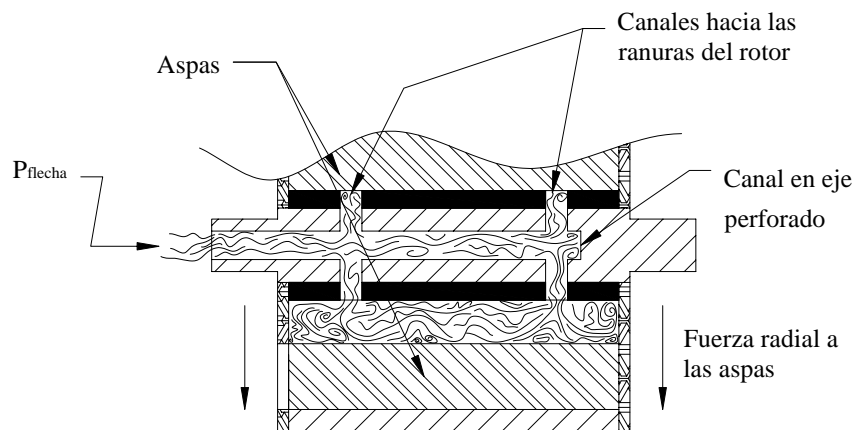


Figura 9. Entrada de aire presurizado al eje perforado

La simetría del diseño permite que la fuerza neumática para mantener en contacto cada una de las aspas con el estator sea la misma (*Figura 10*).

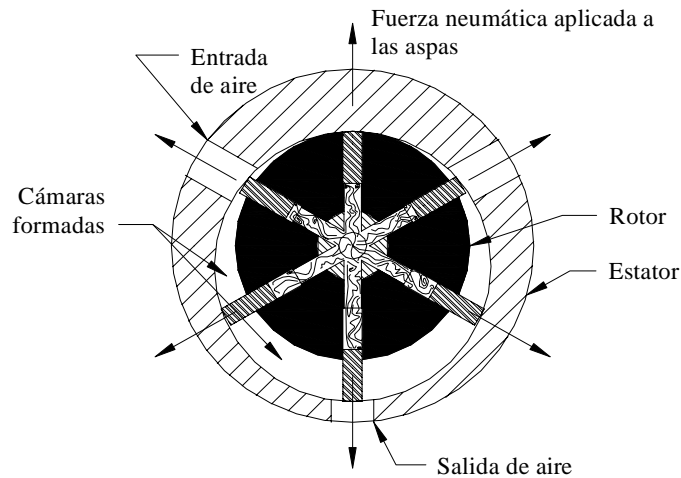


Figura 10. Formación de cámaras por medio de fuerza neumática

Una vez que las cámaras de trabajo están formadas, se puede aplicar aire presurizado por uno de los puertos de entrada del arreglo del sistema de alimentación. Para describir el funcionamiento del micromotor se inyecta aire presurizado por el puerto izquierdo, según la *Figura 10*. La fuerza neumática y el flujo del aire, que chocan contra la pared lateral del aspa, provoca el giro del rotor en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta el momento que el aspa inmediata cierra la cámara. A continuación, el aire sufre una expansión y se enfría. La cámara llega al puerto de salida y el aire sale por el último *racor* del sistema de alimentación. El rotor sigue en movimiento por la acción de la cámara siguiente.

Se cierra nuevamente la cámara en estudio y el aire que queda dentro se comprime. La fuerza equivalente a esta compresión no es suficiente como para hacer bloquear al motor. Al final, la cámara llega al puerto de entrada de la derecha, que se encuentra cerrado, mientras al rotor gira en el sentido antihorario. En la *Figura 11* se muestra el resto del recorrido del aire presurizado dentro del funcionamiento del micromotor.

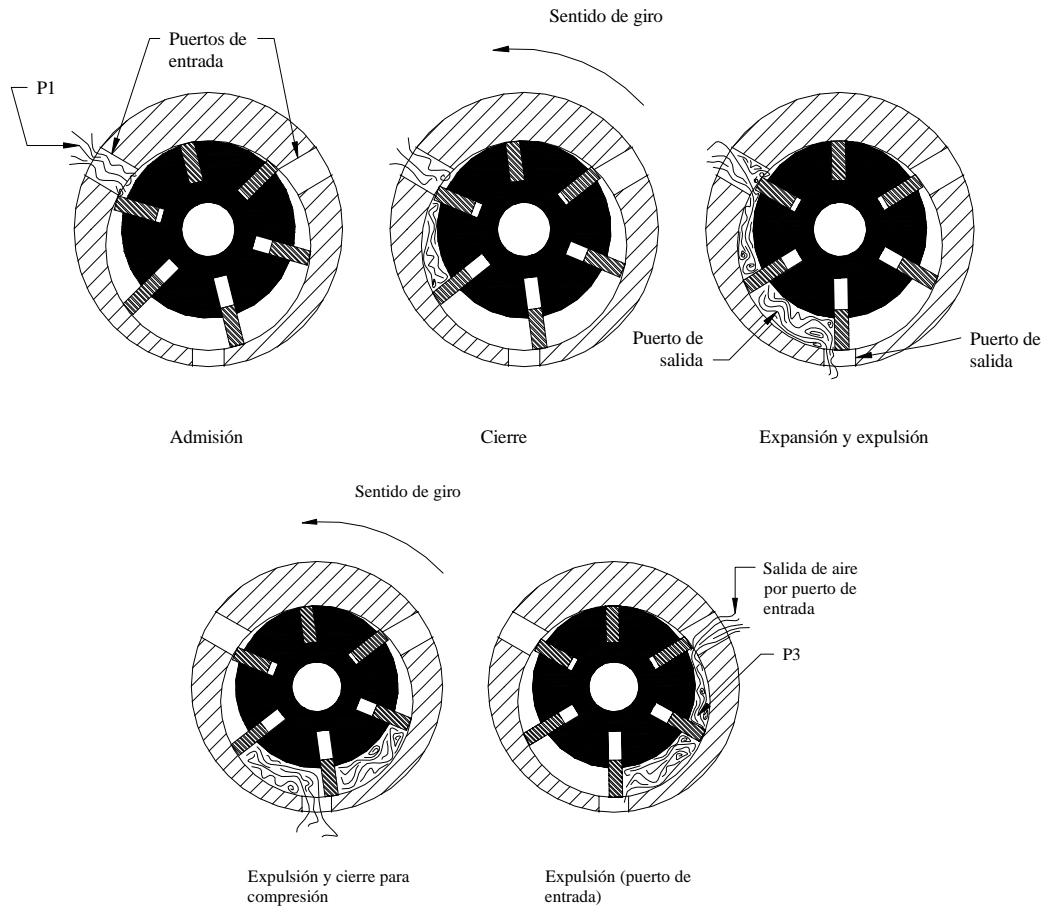


Figura 11. Funcionamiento del micromotor de aspas sin resortes

3.1.1. Análisis teórico

3.1.1.1. Geometría de los compartimentos del micromotor

Para hacer un análisis del ciclo termodinámico de funcionamiento de este micromotor neumático, primero es necesario hacer un análisis geométrico. Se tomará como base la *Figura 12* para el cálculo del volumen de trabajo del aire presurizado en el micromotor neumático en cada momento del ciclo.

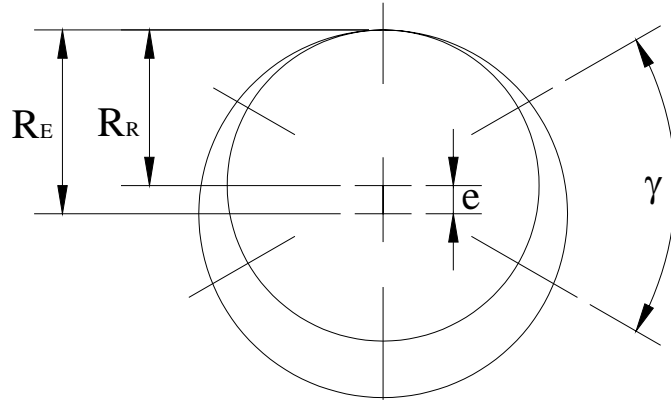


Figura 12. Configuración básica del micromotor neumático de aspas

La *Figura 12* muestra la configuración básica del micromotor. Como se observa, se necesitan definir algunos parámetros, como son el ángulo γ , que es el que se encuentra entre aspas y está dado por la siguiente ecuación

$$\gamma = \frac{2\pi}{z} \quad (3.1)$$

Donde z es el número de aspas del micromotor.

La excentricidad, e , entre el rotor y el centro del estator, está dada por la diferencia de radios del interior del estator (R_E) y el radio del rotor (R_R).

$$e = R_E - R_R \quad (3.2)$$

Mediante un análisis trigonométrico con: el centro del rotor “a”, el centro del interior del estator “b”, el punto de contacto entre el aspa y la pared interior del estator “c”, y el punto tangente del rotor y el estator; como se observa en la *Figura 13-a*; se obtiene un arreglo trigonométrico de dos triángulos con un lado en común. Así se pueden conocer todos los ángulos interiores del triángulo inferior (*Figura 13-b*).

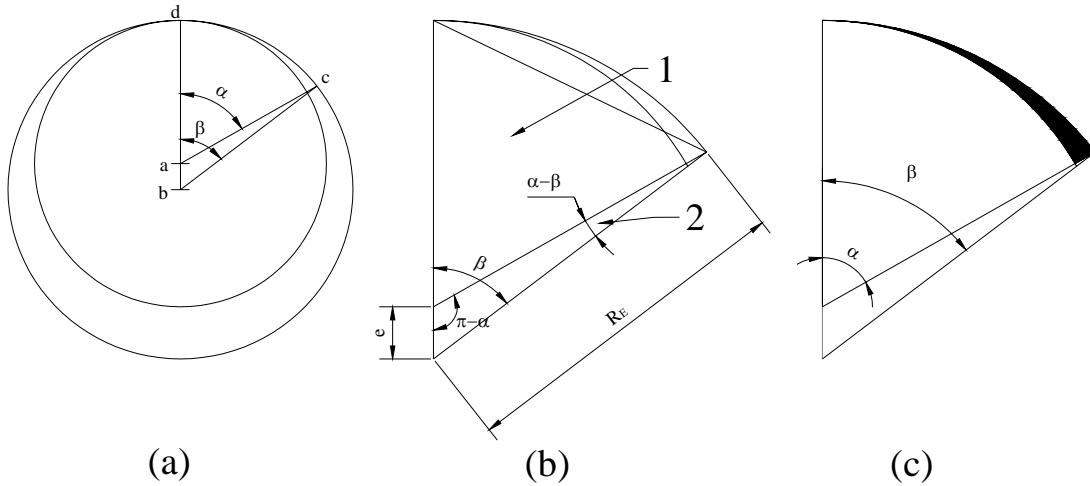


Figura 13. Definición de ángulos de rotación y área de trabajo del aire presurizado

Ahora se conocen los tres ángulos interiores y dos lados del triángulo inferior; aplicando la ley de senos, se obtiene:

$$\frac{e}{\text{sen}(\alpha - \beta)} = \frac{R_E}{\text{sen}(\pi - \alpha)} \quad (3.3)$$

Sin embargo, $\text{sen}(\pi - \alpha) = \text{sen} \alpha$, y despejando β , queda el ángulo del estator en función del ángulo del rotor.

$$\beta = \alpha - \arcsen \frac{e \cdot \text{sen} \alpha}{R_E} \quad (3.4)$$

Para encontrar el volumen de trabajo es necesario encontrar el volumen en función del ángulo de giro. Para esto, es necesario encontrar el área entre las dos secciones de círculo expuestas en la Figura 13-c. El cálculo es muy fácil, sólo se precisa encontrar el área de la porción del círculo con respecto al ángulo β , restarle la porción α y el triángulo formado entre los puntos a, b y c de la Figura 13-a. El área se calcula con la siguiente expresión:

$$\int_a^b r \theta dr \quad (3.5)$$

Por lo que las dos áreas en función de los ángulos son:

$$\int_0^{R_E} r \beta dr = \frac{r^2}{2} \beta \Big|_0^{R_E} = \frac{R_E^2}{2} \beta$$

$$\int_0^{R_R} r \alpha dr = \frac{r^2}{2} \alpha \Big|_0^{R_R} = \frac{R_R^2}{2} \alpha \quad (3.6)$$

Para el cálculo del ángulo α :

$$\alpha = \frac{e \cdot R_e \cdot \text{sen}(\beta)}{2} \quad (3.7)$$

Entonces, el volumen de trabajo en función de la rotación del micromotor será:

$$Vol(\alpha) = \frac{L}{2} \left(R_E^2 \beta - R_R^2 \alpha - e \cdot R_E \cdot \text{sen}(\beta) \right) \quad (3.8)$$

Donde L es el largo del cilindro. Sustituyendo la expresión 3.4 en la ecuación 3.8, el volumen de trabajo queda en función de un solo ángulo (α).

$$Vol(\alpha) = \frac{L}{2} \left(R_E^2 \left(\alpha - \arcsen \frac{e \cdot \text{sen} \alpha}{R_E} \right) - R_R^2 \alpha - e \cdot R_E \cdot \text{sen} \left(\alpha - \arcsen \frac{e \cdot \text{sen} \alpha}{R_E} \right) \right) \quad (3.9)$$

Con la ecuación 3.9 se puede calcular el volumen de las cámaras en cada momento del giro del micromotor. Sin embargo, el volumen de trabajo está limitado por el ángulo γ entre las aspas. Por lo tanto, el volumen de trabajo será

$$V_w = \begin{cases} V_\alpha & 0 < \alpha \leq \gamma \\ V_\alpha - V_{\alpha-i\gamma} & \text{para } \gamma < \alpha \leq 2\pi \\ V_{2\pi} - V_{\alpha-\gamma} & 2\pi < \alpha \leq 2\pi + \gamma \end{cases} \quad (3.10)$$

Con esta última expresión se puede calcular el volumen muerto V_m , el de llenado V_F y el volumen expandido V_{exp} . Estos datos son indispensables para el cálculo del ciclo termodinámico del micromotor y la potencia del mismo.

3.1.1.2. Potencia y par del motor ideal

La razón entre el volumen expandido y el volumen de llenado determina la energía interna del aire usada. Esta relación es llamada razón de expansión ε y está dada por la siguiente expresión matemática:

$$\varepsilon = \frac{V_{exp}}{V_F} \quad (3.11)$$

Brückner (1967) midió valores de la razón de expansión desde $\varepsilon=1.0$ hasta $\varepsilon=1.43$ para motores no reversibles. Cuando están es 1.0, es decir, donde el volumen expandido y el de llenado son iguales, la expansión no existe, como sucede en un motor de engranes. Esto quiere decir que la energía interna del aire no es usada y la temperatura de expulsión es cercana a la del ambiente. Sí la razón de expansión es muy alta, la eficiencia del motor se incrementa. No obstante, la temperatura del aire en la salida puede bajar tanto que el agua, que se encuentra en el aire, se condensa o congela y provocar que el motor se bloquee.

El volumen de desplazamiento nominal está dado por:

$$V_{desp.nom} = V_F \cdot z \quad (3.12)$$

Para realizar un modelo matemático del par se tomará como base la termodinámica del ciclo de trabajo del micromotor. Se obtendrá el trabajo neto que entregará el micromotor, el cual se deriva con respecto al tiempo obteniendo el modelo necesario para la potencia y par del micromotor.

En la *Figura 14* se presenta el volumen de una cámara en función del ángulo de rotación. Al suponer un giro antihorario, en el estado *a* se observa el volumen muerto, éste no hace ningún trabajo. En el estado *b* la cámara está completamente llena con aire presurizado a una presión P_1 .

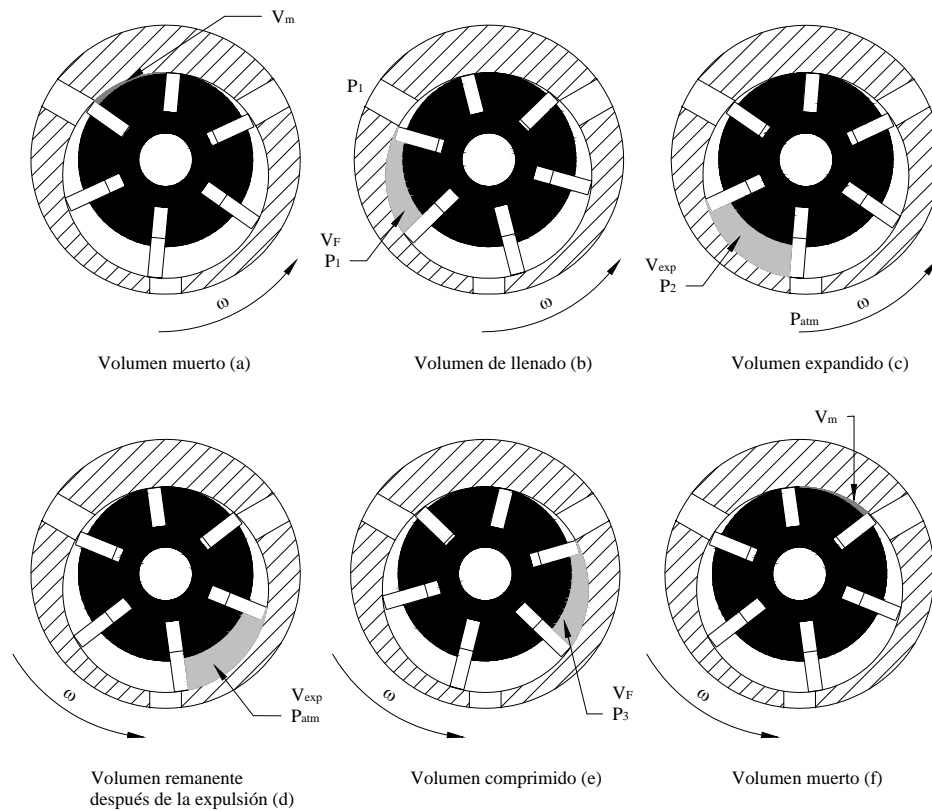


Figura 14. Volumen de trabajo de una cámara en función del ángulo de rotación

Mientras el rotor sigue girando, en el estado *c* el aire experimenta un incremento de volumen. Este proceso se puede considerar como politrópico y la presión del aire puede calcularse con la siguiente expresión:

$$P_1 V_F^n = P_2 V_{exp}^n \quad (3.13)$$

Entonces,

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_F}{V_{\text{exp}}} \right)^n = P_1 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^n, \quad (3.14)$$

donde n es el índice politrópico, que será $1 \leq n \leq k$, donde k es el cociente de los calores específicos a presión y volumen constantes ($k=C_p/C_v$), $k=1.4$ para el aire. Por lo general, el valor utilizado para este proceso es de $n=1.3$ (Daser *et al.* 1969; Sabih *et al.* 1992). Cuando la cámara llega hasta el puerto de salida, se libera el aire y la presión cae hasta la presión atmosférica P_{atm} . En el estado d la cámara se cierra nuevamente con aire a presión atmosférica y un volumen similar al expandido. Luego, la cámara sufre una reducción de volumen y se comprime el aire, que igual que la expansión, es un proceso politrópico. La presión en el estado e puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$P_3 = P_{\text{atm}} \left(\frac{V_{\text{exp}}}{V_F} \right)^n = P_{\text{atm}} \varepsilon^n \quad (3.15)$$

La cámara se abre una vez más y libera el aire por el segundo puerto de entrada, lo que provoca que la presión baje hasta la atmosférica. El ciclo termina con una reducción del volumen, igual en valor al muerto con una presión semejante a la atmosférica, estado f . La compresión del estado d al estado e a veces es despreciada, (e. g. Hannson, 1975; Barth, 1978), porque es muy insignificante y cercano a la presión atmosférica, en este caso se considera el estado e' para facilitar los cálculos de trabajo del ciclo.

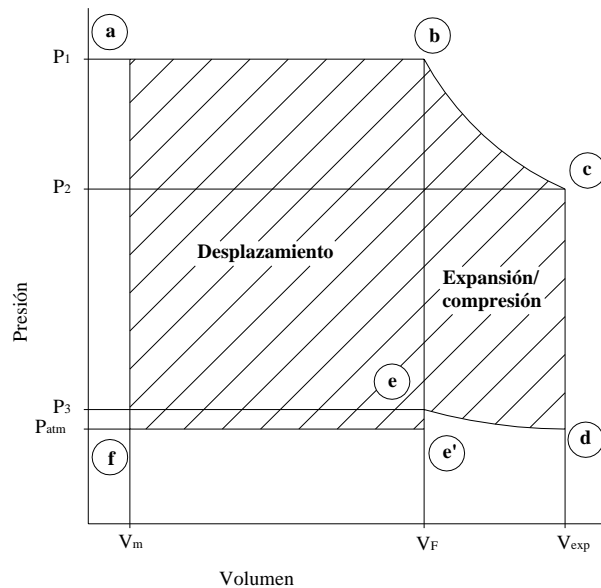


Figura 15. Diagrama $p - V$ de un motor neumático de aspas.

El trabajo neto que realiza el motor es la suma del trabajo de desplazamiento, de expansión y de compresión (*Figura 15*).

$$W = W_{\text{desplazamiento}} + W_{\text{expansión}} + W_{\text{compresión}} \quad (3.16)$$

$$W_{\text{desplazamiento}} = -\int PdV = (P_1 - P_{\text{atm}})(V_F - V_m) \quad (3.17)$$

$$W_{\text{expansión}} = -\int_c^b PdV = \frac{P_1 V_F}{n-1} (\varepsilon^{1-n} - 1) \quad (3.18)$$

$$W_{\text{compresión}} = -\int_e^d PdV = \frac{P_{\text{atm}} V_{\text{exp}}}{n-1} (\varepsilon^{1-n} - 1) \quad (3.19)$$

La potencia del micromotor puede ser calculada por la diferenciación del trabajo neto, W , con respecto al tiempo. El par entregado por el micromotor será:

$$T = \frac{\text{Potencia}}{\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{dW}{dt} \quad (3.20)$$

3.1.1.3. Flujo másico

Antes de que el aire entre a las cámaras, éste tiene un flujo a través de ductos, que generan una resistencia que no puede ser calculada fácilmente. Asimismo, es necesario considerar las pérdidas dentro de los puertos de entrada y los rodamientos del motor. Con todas estas diferencias, la razón de flujo másico es aproximadamente un 65% de la máxima razón de flujo (Gerts y Gerts *et al.* 1999). En el micromotor hay tres puntos donde se admite o expulsa volumen, los cuales son los puertos de entrada y salida del estator (*Figura 16*). Para obtener la razón de flujo másico, se hace un balance de masa. Para calcular la presión se utiliza la ley de los gases ideales en función de los volúmenes de entrada y salida. Con el fin de facilitar los cálculos, se considera al ciclo como isotérmico, con lo cual:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{\text{puerto}_1} + \dot{m}_{\text{vol}_1} \quad (3.21)$$

$$p_1 = \frac{m_1 \cdot R \cdot T_0}{V_1} \quad (3.22)$$

El flujo másico \dot{m}_{vol_1} depende de la presión en el puerto de entrada. El que entra al micromotor puede ser calculado con el volumen de la cámara y la presión de entrada P_1 . Se asume, que la rotación del micromotor es en sentido contrario a las manecillas del reloj con $\omega > 0$; entonces, la razón del flujo másico a través puerto 1 del estator, está dado por

$$\dot{m}_{\text{puerto}_1} = \frac{p_1 \cdot \omega \cdot V_{\text{desp.nom}}}{2\pi \cdot R \cdot T_0} \quad (3.23)$$

Donde $V_{desp.nom}$ es el volumen de desplazamiento nominal

Para el flujo másico que sale del puerto 2, \dot{m}_{vol_2} , será

$$\dot{m}_{vol_2} = \frac{p_3 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot V_{desp.nom}}{2\pi \cdot R \cdot T_0} \quad (3.24)$$

El flujo másico a través del puerto de salida puede ser calculado por el hecho de que el neto dentro del micromotor debe ser cero, entonces se tiene

$$\dot{m}_{vol_2} + \dot{m}_{vol_e} = \dot{m}_{puerto_1} \quad (3.25)$$

En un motor real hay que considerar las pérdidas por flujo entre las aspas y el estator, la fricción mecánica, la inercia y las pérdidas de flujo en los conectores de entrada.

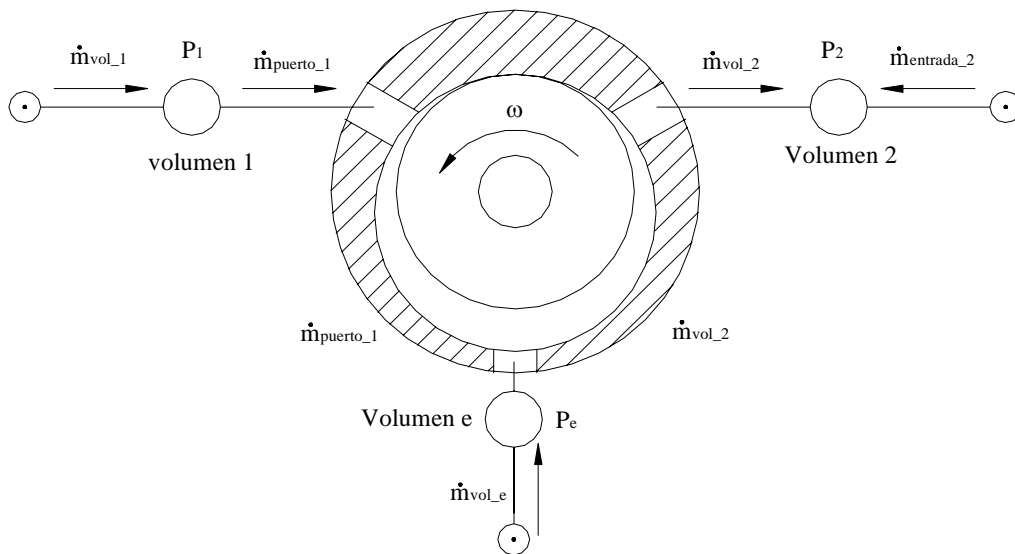


Figura 16. Flujo másico en el micromotor

3.2 Diseño conceptual

Como se dijo, los motores neumáticos tienen ventajas y desventajas con respecto a otros, y al miniaturizarlos se generan otros problemas.

3.2.1. ¿Por qué sin resortes?

Las dificultades de miniaturización del micromotor comienzan con los resortes. Estos al ser más pequeños se vuelven más frágiles por el tratamiento térmico que recibe el alambre. Los resortes se fabrican mediante procesos de trabajo en frío o en caliente, dependiendo del tamaño del material, del índice del resorte y de las propiedades deseadas. En general, no debe usarse alambre pre-endurecido, si $D/d < 4$ o si $d > 6.35 \text{ mm}$ ($1/4 \text{ in}$). El enrollado de los resortes induce esfuerzos residuales mediante flexión, los cuales son normales a la

dirección de los esfuerzos torsionales de trabajo en un resorte helicoidal, este tipo es el empleado en los motores neumáticos de aspas. Con mucha frecuencia, en la manufactura de los resortes los esfuerzos residuales se alivian después del enrollado, a través de un tratamiento térmico moderado.

Para tener una idea más clara de la razón de la inconveniencia en utilizar resortes durante la miniaturización, se analizan los esfuerzos internos en estos elementos.

La *Figura 17* presenta un resorte helicoidal de compresión, fabricado en alambre de sección circular sometido a una fuerza axial F . Se designa con D al diámetro de la hélice del resorte y con d el diámetro del alambre. Ahora, se toma una sección en algún punto y se colocan los efectos de las fuerzas internas, la parte seccionada ejercerá una fuerza cortante F y un par de torsión T sobre la parte restante del resorte.

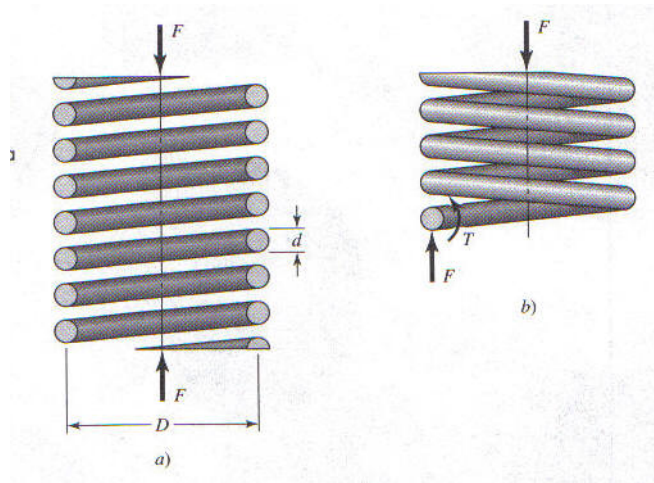


Figura 17. Resorte helicoidal con carga axial y su diagrama de cuerpo libre

El esfuerzo máximo en el alambre se puede calcular mediante superposición de las ecuaciones de torsión y esfuerzo axial, y al final se obtiene la siguiente expresión:

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (3.26)$$

Donde K_s es un factor de aumento de esfuerzo cortante y se define mediante la ecuación:

$$K_s = \frac{2C + 1}{2C} \quad (2.27)$$

y C es el índice de resorte, expresada como;

$$C = \frac{D}{d} \quad (3.29)$$

La ecuación 3.26 es muy general y se aplica tanto en cargas estáticas como en dinámicas. Para la mayoría de los resortes C varía en un aproximado de seis a doce. Lo anterior, aunado al tratamiento térmico que recibe el alambre, resulta en esfuerzos muy grandes, provocando que el resorte sea quebradizo. Por lo tanto, los resortes en el micromotor neumático han sido descartados.

3.2.2. Consideraciones de diseño

Otra de las restricciones para el diseño del micromotor son los rodamientos. En la construcción de este micromotor se utilizaron rodamientos comerciales de 3 mm de diámetro interior, 8 mm de exterior y 4 mm de espesor. Para la siguiente generación aún se puede encontrar rodamientos comerciales, pero a partir de la tercera generación de este dispositivo, se buscan otras alternativas. Una de éstas son los cojinetes de contacto deslizante, como chumaceras de materiales blandos. Los rodamientos seleccionados en este dispositivo son de bola, puesto que las cargas axiales dentro del micromotor son muy inferiores en comparación a las cargas radiales; estas últimas pueden ser despreciadas.

Para la colocación de los rodamientos en las holguras se seleccionó un ajuste de holgura localizada (ISO H7/h6), que proporciona un ajuste firme para la ubicación de partes estacionarias, pero se pueden ensamblar y desensamblar libremente sin perder la linealidad.

Por otro lado, el problema de la alimentación de aire se presenta, ya que en el mercado no existen elementos tan pequeños para poder conectar los microdispositivos. En este diseño fueron seleccionados *racores* de 7 mm de diámetro con rosca de tres milímetros. Además, se creó un tubo extensor que permite hacer las conexiones de cuatro *racores* hacia una misma orientación; sin embargo, en las próximas generaciones no se podrán usar. En el futuro, se deberá desarrollar dispositivos de alimentación con ductos de menor diámetro y los elementos de unión neumática serán lo suficientemente pequeños para ser funcionales con los microdispositivos.

3.3 Descripción

3.3.1. Partes principales

Como se estudió, un motor neumático de aspas típico consta de cuatro partes principales: un rotor ranurado, un estator con orificio excéntrico y entradas de aire presurizado en los costados; una flecha y aspas de forma trapezoidal. El micromotor expuesto en este trabajo también consta de estos cuatro componentes principales, pero con ciertas modificaciones: un rotor ranurado con canales de comunicación para aire presurizado, una flecha perforada con agujeros para aire presurizado que comunican con las ranuras del rotor, un estator con un agujero excéntrico y puertos de entrada de aire con orientación axial; y aspas rectangulares. A continuación se describen cada una de estas partes.

3.3.1.1. Estator

El estator es un cilindro con un diámetro ligeramente mayor que su longitud. Tiene un orificio excéntrico respecto a su eje principal de diámetro menor. En la *Figura 18* se puede observar esto:

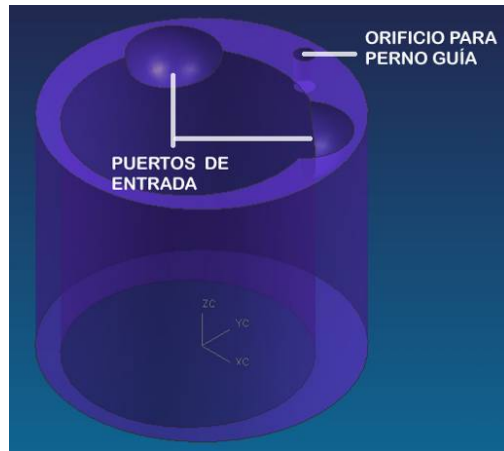


Figura 18. Modelo del estator

Existen dos puertos de entrada de aire presurizado. Estos son semiesféricos para garantizar el flujo hacia el interior del estator y lograr el giro del rotor. Para manufacturar esta pieza, primero se genera el cilindro en un torno y enseguida, localizando la excentricidad del orificio se desfasa el centro del torno y se puede realizar el agujero. Después, se hacen las ranuras esféricas localizadas a 120° de separación entre sí. Al final, se realiza una perforación para el perno guía. El interior del estator debe tener un buen acabado superficial, esto para evitar que las aspas se atoren y el rotor pueda girar libremente; además, el desgaste y la deformación de las aspas es reducido y las cámaras se forman de manera adecuada durante todo el ciclo. El estator está fabricado en acero inoxidable (*Figura 19*) para que el desgaste sea menor en comparación con las aspas, ya que es una pieza difícil de fabricar.



Figura 19. Estator manufacturado de acero inoxidable

3.3.1.2. Rotor ranurado

El rotor es un cilindro con un diámetro menor al del agujero excéntrico del estator pero es necesario que tenga contacto en un punto al momento del ensamble. El largo del rotor es ligeramente menor al del estator, lo que evita la interferencia entre las tapas y el rotor y asegura el libre giro del rotor. El rotor está fabricado en latón con un agujero céntrico

respecto a su eje principal, donde se ensamblará la flecha. El ajuste empleado entre la flecha y el rotor es un ISO H7/p6. El rotor tiene seis ranuras en su periferia, realizadas con un cortador de disco. Después, se realiza el ensamble del rotor con la flecha perforada. Al final, dos perforaciones en cada ranura que conectan con el interior de la flecha, permiten la circulación del aire presurizado hacia las ranuras y mantienen unidas las aspas a la pared interior del estator. En la *Figura 20* se pueden observar los detalles del rotor.

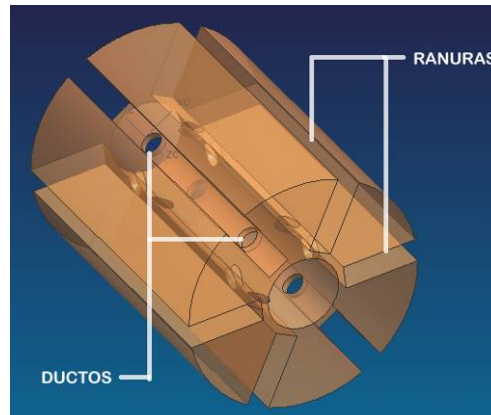


Figura 20. Modelo en detalle del rotor

3.3.1.3. Flecha perforada

Este componente del micromotor es una flecha seccionada en tres (*Figura 21*). En la primera parte, que es la de menor longitud y se encuentra perforada, se localiza uno de los rodamientos. En la siguiente, la de mayor longitud, se coloca el rotor con un ajuste entre estas dos piezas de ISO H7/p6, el cual es un apriete para partes que requieren rigidez y alineación con la mejor precisión de ubicación. También, se encuentran doce orificios desde el exterior hasta el interior de la flecha, que logran una comunicación con las perforaciones de las ranuras del rotor.

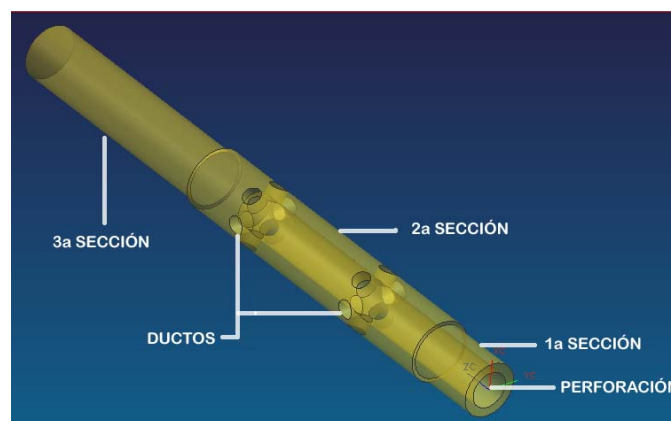


Figura 21. Detalle de eje perforado

En la última sección se localiza el segundo rodamiento con los mismos ajustes que el anterior (ISO H7/h6). En esta parte, la flecha es sólida y tiene un largo suficiente para acoplar los dispositivos a mover (engranes, poleas y otros). La flecha está construida en

acero inoxidable (*Figura 22*), que por ser un material rígido evita su deformación por flexión, tanto en su operación como en su manufactura.

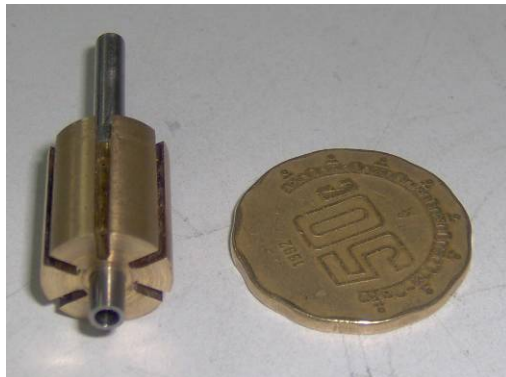


Figura 22. Ensamble flecha-rotor



Figura 23. Partes principales del micromotor

3.3.1.4. Aspas rectangulares

Para simplicidad de manufactura las aspas son rectangulares, hechas en PTFE cargado de bisulfuro de molibdeno (*Figura 24*). Tal material es resistente al desgaste y, por la naturaleza del teflón, tiene un coeficiente de fricción bajo, además, es autolubricante. Por lo tanto, no son necesarios los lubricantes o aceites para evitar la fricción entre las aspas y la pared interior del estator. Además de la resistencia al desgaste, este material es ligero, por lo que el aire presurizado suministrado a la flecha no tendrá una fuerte resistencia para mover las aspas de forma radial (respecto al eje principal del micromotor), así como, la fuerza de inercia centrifuga disminuye.

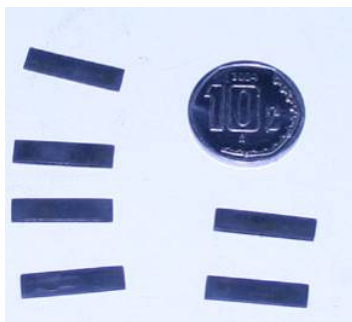


Figura 24. Aspas de PTFE cargado de bisulfuro de molibdeno

3.3.2. Partes auxiliares

3.3.2.1. Tapas

Las tapas son dos discos de igual diámetro que el estator y fabricados en latón (*Figura 25*). Una de las tapas sólo tiene un orificio en el centro por donde pasa libremente la flecha perforada. La otra, además del orificio central, tiene tres perforaciones equidistantes. Dos de estas perforaciones se alinean con los puertos de entrada del estator y la otra es el puerto de expulsión de aire. También, tiene un orificio más para el perno de alineación.

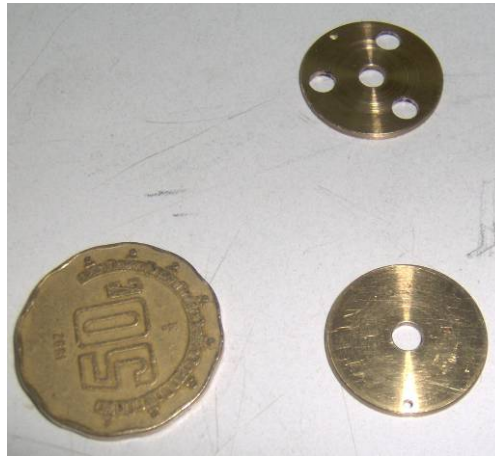


Figura 25. Tapas de latón

3.3.2.2. Tapa portarrodamiento

Esta tapa, fabricada en latón, tiene el alojamiento para un rodamiento con un ajuste ISO H7/h6 (*Figura 26*), que es un ajuste de holgura localizada para piezas que trabajan sin mucha movilidad, pero con facilidad de ensamble y armado. Al momento del armado, una porción de esta pieza sobresale de la carcasa, esto es necesario para sujetar el micromotor y evitar fugas. La tapa portarrodamiento consta de dos secciones, una de un diámetro igual al estator, además del alojamiento del rodamiento. La otra, tiene un diámetro que permite el paso libre a través de la brida. Finalmente, tiene un orificio central por donde atraviesa la flecha.



Figura 26. Tapa portarrodamiento

3.3.2.3. Brida

La brida es un elemento de unión, tiene una cuerda interior que se enrosca en la carcasa para sujetar todas piezas del micromotor y evitar fugas. Asimismo, tiene un diámetro mayor a la carcasa y un orificio por donde pasa la tapa portarrodamiento y un par de muescas para una llave tipo española de 18 mm (*Figura 27*).



Figura 27. Brida

3.3.2.4. Carcasa

Este elemento está diseñado para proteger al micromotor, contener a las piezas interiores, además, es su sistema de alimentación. La carcasa es un cilindro hueco en su mayor parte, fabricado en latón. Cuenta con una cuerda exterior en uno de sus extremos. En el fondo de dicho cilindro se encuentra el alojamiento del rodamiento y un pequeño barreno para el perno guía.

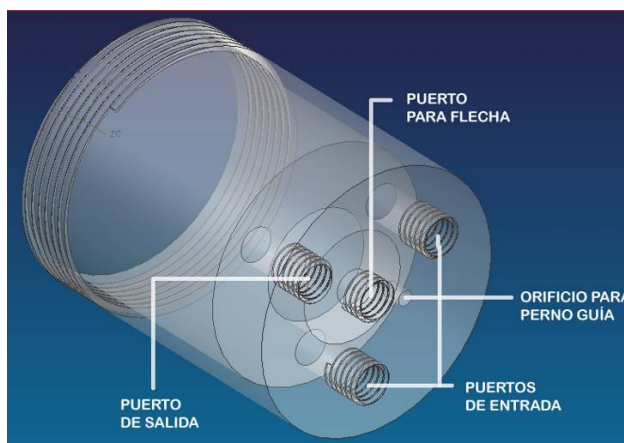


Figura 28. Detalle de la carcasa

En el otro extremo se encuentran cuatro barrenos con rosca M3 (*Figura 28*). El barreno del centro conecta el tubo extensor que provee al interior de la flecha de aire presurizado. Los centros de los otros tres están alineados con los puertos de entrada y salida de aire presurizado de la tapa. Según el orificio por el cual se suministre el aire presurizado, será el sentido de rotación del micromotor; es decir, el micromotor es reversible.



Figura 29. Carcasa manufacturada en latón

3.3.2.5. Tubo auxiliar de alimentación

El tubo auxiliar de alimentación tiene tres milímetros de diámetro y posee una cuerda de M3 en un extremo para ser conectado en el barreno central de la carcasa. El otro lado cuenta con una cuerda M3 hembra para unir un *racor* y alimentar de aire presurizado a la flecha (*Figura 30*).



Figura 30. Tubo auxiliar para conexión de racor

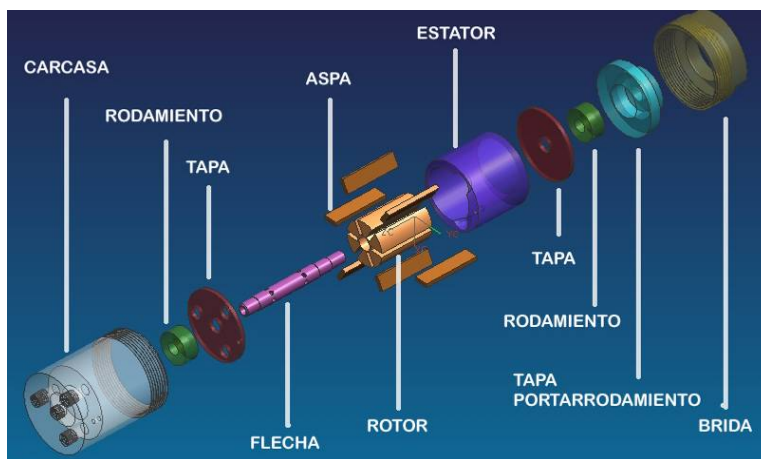


Figura 31. Ensamble del micromotor

3.4 Caracterización

3.4.1. Diseño de banco de pruebas

En el banco de pruebas se encuentran elementos de medición, alimentación neumática y sujeción. En la *Figura 32* se observa un diagrama del banco de pruebas con sus elementos principales.

Los principales elementos de alimentación y distribución son: un compresor con capacidad para generar una presión neumática de 8 bar., dos reguladores de presión y dos electroválvulas. Los de medición son: dos manómetros de Bourdon, un sensor de presión diferencial, uno de presión manométrica y uno de caudal.

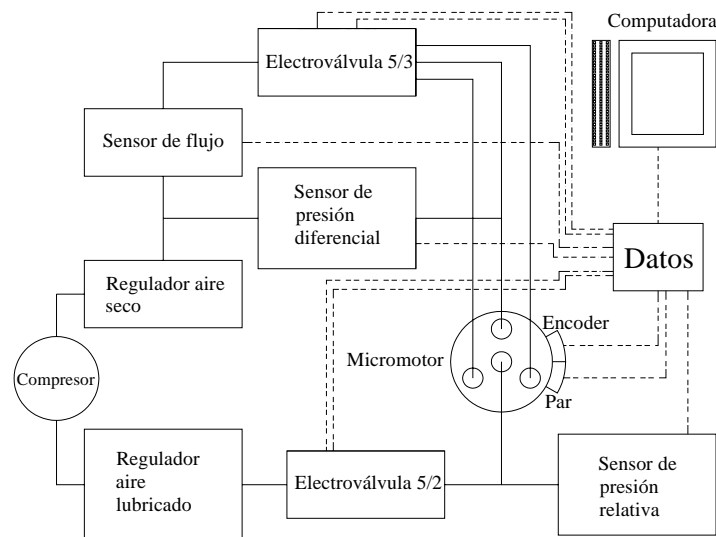


Figura 32. Diagrama del banco de pruebas para el micromotor neumático de aspas

3.4.2. Selección de elementos del banco de pruebas

El regulador de aire seco se utiliza en la alimentación de aire presurizado para el funcionamiento del micromotor; mientras que el regulador con compartimiento de lubricación de aire se usa para la alimentación de aire hacia la flecha. No hay que olvidar que las aspas son fabricadas en PTFE cargado de bisulfuro de molibdeno, así que, con este material no es necesaria la presencia de lubricante, ya que es autolubrificante y de bajo coeficiente de fricción. Pero este regulador fue elegido para aplicaciones futuras, que requieran lubricación.

Una de las electroválvulas es de cinco vías y dos posiciones y se utiliza para la alimentación de aire presurizado hacia la flecha. La otra válvula es de cinco vías y tres posiciones y es ideal para controlar las entradas de aire en un motor neumático reversible.

Los manómetros de Bourdon son utilizados para la calibración de los sensores de presión, colocándolos en los reguladores. El sensor de presión relativa se encuentra antes del *racor* de la flecha perforada; este elemento ayuda para la adquisición de datos por su pantalla

integrada. El sensor de presión diferencial será para obtener la variación de presión entre la entrada y la salida de aire presurizado del micromotor. El sensor de flujo es para la obtención de datos del caudal que entra al micromotor. Se recurre a un *encoder* fabricado en latón y un fotodiodo para obtener la velocidad del micromotor. Con la ayuda de un osciloscopio se obtiene la frecuencia con la que el fotodiodo emite las señales de voltaje cada vez que el *encoder* lo corta. Para medir el par entregado, se utiliza el método de rotor bloqueado sobre una celda de carga. Al final, para medir la potencia del micromotor se realiza una adaptación del freno de Navier. Las especificaciones de todos los elementos del banco de pruebas se pueden ver en el Anexo 1.



Figura 33. Componentes neumáticos y electrónicos del banco de pruebas

3.4.3. Condiciones iniciales de operación

En las pruebas de funcionamiento del micromotor es importante especificar las condiciones de operación inicial. La presión de entrada en la flecha será mayor que la aplicada a los puertos de alimentación de funcionamiento. La presión inicial de funcionamiento de las pruebas será de 6 bar., a partir de allí, la variación de la presión y flujo de entrada será de 0.1bar., hasta llegar a 1 bar. de presión por arriba de la atmosférica. Antes de poner en marcha las pruebas, los sensores deberán ser calibrados y puestos a punto para no tener rango de incertidumbre amplio en la medición.

Tabla I. Condiciones iniciales de operación sugeridas en las pruebas

Parámetro	Unidad	Flecha		Rotor	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Presión	bar	1	7.5	0.7	7
Caudal	l/min	10	60	10	60
Carga	mNm	NA	NA	0.981	49.05
Posición	NA	Horizontal			
Temperatura	°C	15	30	15	30
Lubricación		Sin		Sin	

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Velocidad

Como se comentó en el capítulo anterior, para medir la velocidad del micromotor se utilizará un *encoder* y un fotodiodo. Al conectar la señal emitida por el fotodiodo a un osciloscopio se puede conocer la frecuencia con la que el *encoder* corta la señal. Con la frecuencia y teniendo en cuenta que sus unidades son Hertz (Hz) o uno sobre segundo ($1/s$), se puede hacer una simple conversión como sigue:

$$rpm = 60f \quad (4.1)$$

En la *Figura 34* se pueden observar los componentes utilizados en la medición de la velocidad del micromotor, así como la instrumentación.

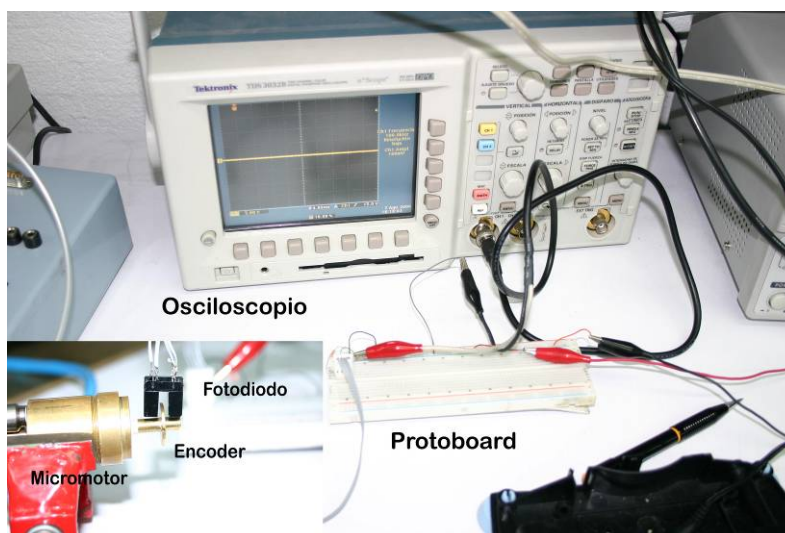


Figura 34. Componentes e instrumentación para medir la velocidad del micromotor neumático

Con este arreglo de componentes se realizan dos sesiones de pruebas. La variable es la presión de entrada en el micromotor. Se miden el flujo volumétrico y la velocidad del micromotor obteniendo las gráficas de las *Figuras 35* y *36*.

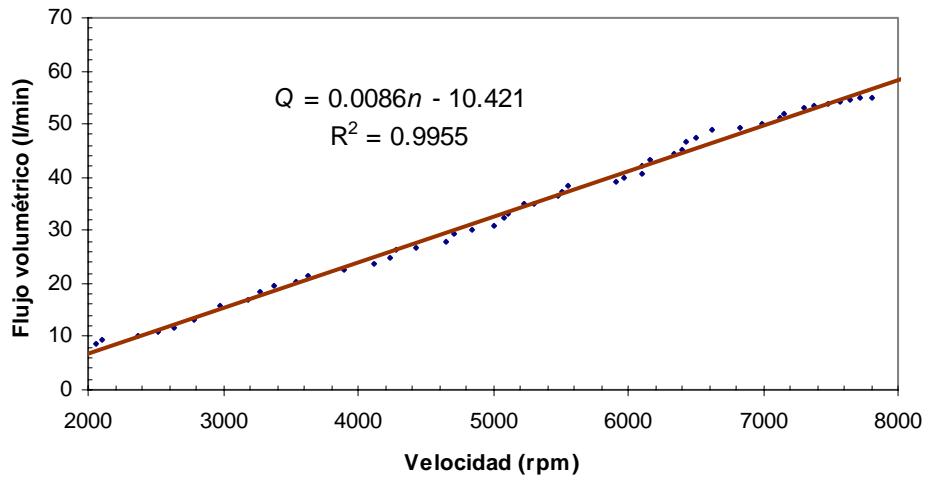


Figura 35. Flujo volumétrico en función de la velocidad angular

En la gráfica de la *Figura 35* se observa el comportamiento de la velocidad en función del flujo volumétrico. Se hizo un arreglo de los datos, aproximándolos, a una función polinomial de grado uno. Tal polinomio, se puede escribir de la siguiente manera.

$$Q = f(\omega) = 0.0086 \cdot n - 10.42 \quad (4.2)$$

Donde Q es el flujo volumétrico en litros por minuto y n es la velocidad en rpm.

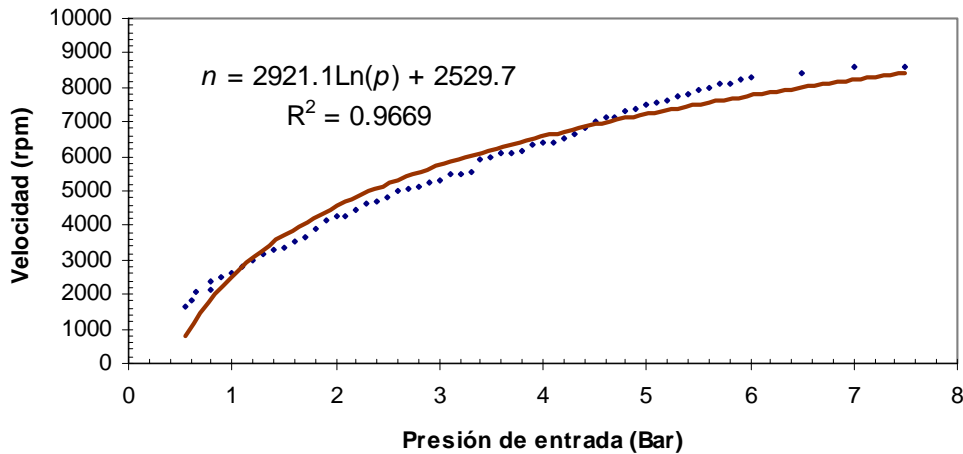


Figura 36. Velocidad angular en función de la presión suministrada sin carga

En la gráfica de velocidad angular en función de la presión suministrada (*Figura 36*) se observa que la tendencia es una función logarítmica. Tal función se puede escribir de la siguiente forma:

$$\omega = f(p) = 2921.1 \cdot \ln p + 2529.7 \quad (4.3)$$

Por lo tanto, se puede inducir que la velocidad tiene un límite en función de la presión suministrada.

4.2 Par a rotor bloqueado

Para medir el par otorgado por el micromotor neumático se acopla un brazo de palanca en la flecha de salida, con una longitud de 48 mm. Uno de los extremos del brazo de palanca se posa sobre una celda de carga. Cuando se alimenta aire presurizado al micromotor, éste trata de girar, pero el brazo de palanca lo impide, además de generar una fuerza sobre la celda de carga; se registra el valor de esta fuerza.

Para calcular el par otorgado por el micromotor se tiene la expresión siguiente.

$$T = Fd \quad (4.4)$$

En la *Figura 37* se observan los componentes y el acomodo de ellos para la medición del par entregado por el micromotor a rotor bloqueado

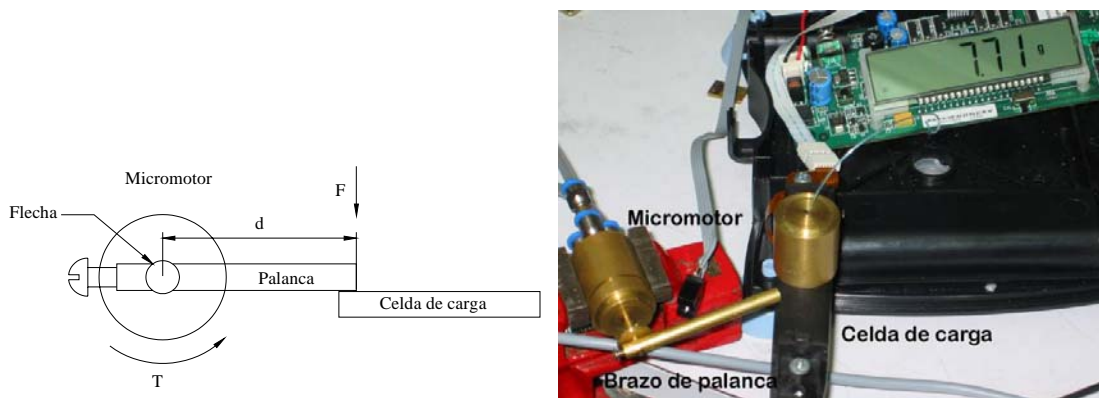


Figura 37. Configuración para las pruebas de par entregado a rotor bloqueado

Los resultados de las pruebas se presentan en la gráfica de la *Figura 38*.

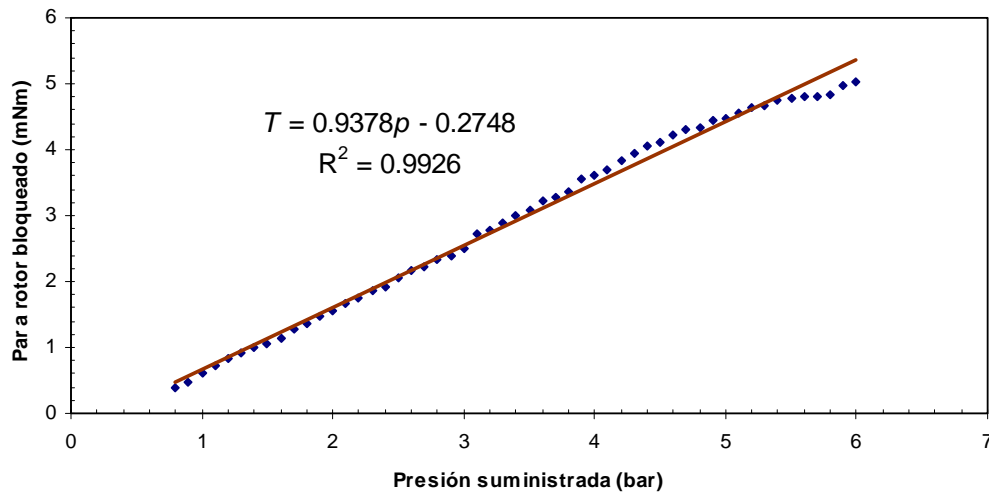


Figura 38. Par a rotor bloqueado en función de la presión de entrada

La gráfica muestra que la dependencia del par entregado con respecto a la presión de entrada es semejante a una línea recta. Es necesario un arreglo de estos datos, aproximando la gráfica a un polinomio de primer orden, donde la ecuación de la recta es la siguiente:

$$T = f(p) = 0.9378 \cdot p - 0.2748 \quad (4.5)$$

Entonces, el par aumenta conforme la presión suministrada incrementa.

4.3 Potencia al freno

La medición de la potencia se hará por medio del freno de Navier, que consiste en una polea, acoplada al motor y rodeada por una cinta que ejerce una fuerza de rozamiento que se opone al giro del eje (*Figura 39*). En un extremo de la cinta se coloca un dinamómetro que está sujeto al piso. Se coloca en el otro extremo un peso tensor Q . En el dinamómetro se lee la fuerza de tracción P que se ejerce en un extremo del cable, debido al peso Q y la fuerza de rozamiento R ejercida por el eje sobre la cinta. Para el sentido de rotación mostrado en la *Figura 40*, el tramo de mayor tensión es el de la derecha, pues además de soportar el esfuerzo Q de frenado, recibe la fuerza que hace la polea para arrastrar la cinta en su rotación.

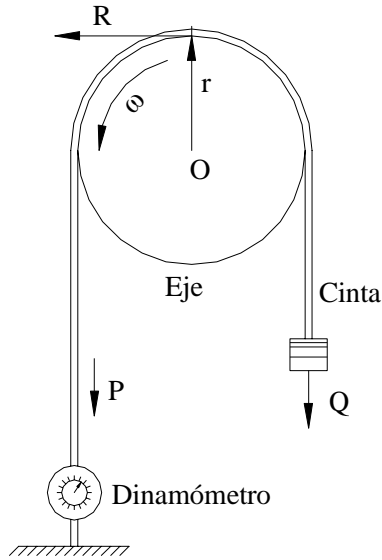


Figura 39. Freno de Navier

Al sumar los momentos con respecto a O :

$$Q \cdot r = R \cdot r + P \cdot r \quad (4.6)$$

Eliminando r y despejando R :

$$Q = R + P \Rightarrow R = Q - P \quad (4.7)$$

Entonces, el momento de rozamiento será:

$$M_R = R \cdot r = (Q - P) \cdot r \quad (4.8)$$

Por tanto, la potencia será:

$$N_R = M_R \cdot \omega = (Q - P)r \frac{2\pi n}{60} \quad (4.9)$$

Donde N_R está dado en Watts, M_R en Joule, Q y P en Newton y n en rpm.

La *Figura 40* muestra la instrumentación y las adaptaciones necesarias para la aplicación del freno de Navier en el micromotor. Para el montaje del experimento se cuenta con una polea y un *encoder* acoplados al micromotor, hilo para aplicar el freno, una celda de carga para medir la fuerza de tracción, un fotodiodo y un osciloscopio para medir la frecuencia

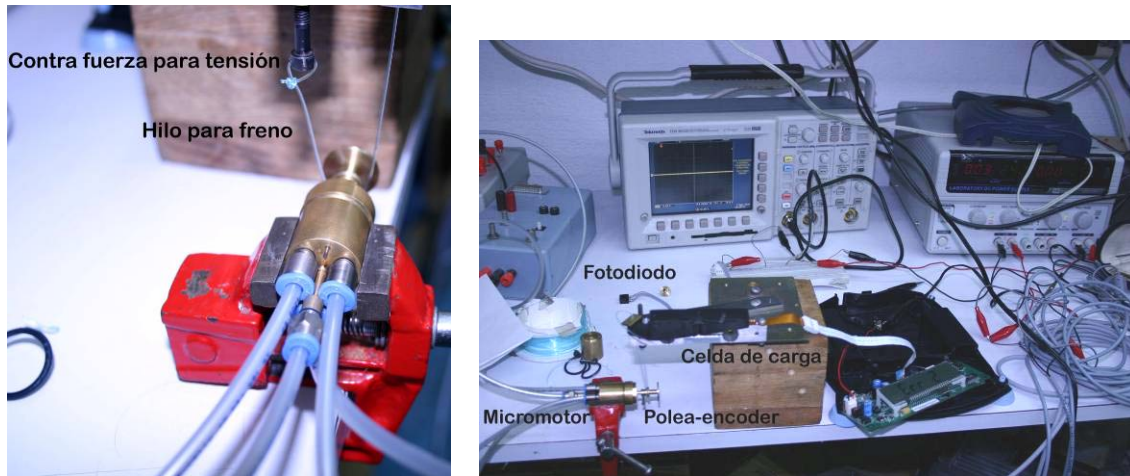


Figura 40. Instrumentación para la prueba de potencia

Con los resultados de las pruebas se genera la gráfica de la *Figura 41*. Donde se muestra el comportamiento de la potencia al freno a diferentes presiones de entrada del aire.

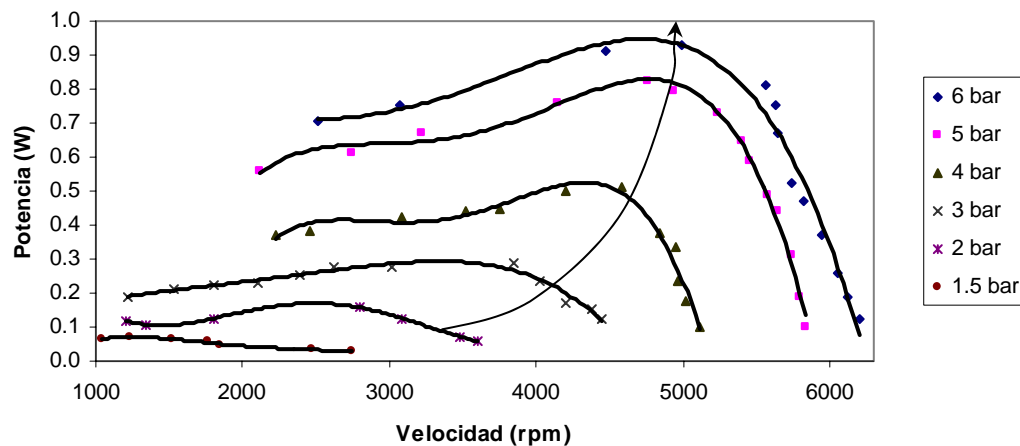


Figura 41. Potencia en función de la velocidad angular

La potencia tiende a aumentar con la presión suministrada. Sin embargo, los datos entre las presiones de 5 y 6 bar. se aproximan mucho, por lo que, la presión óptima de funcionamiento del micromotor es de 5 bar. La flecha dentro de la gráfica muestra el gradiente de la curva de la potencia en función de la velocidad, conforme se aumenta la presión de entrada.

4.4 Especificaciones de operaciones

Con las graficas expuestas anteriormente, se pueden aportar las especificaciones de operación del micromotor y las condiciones nominales con las que puede trabajar.

El análisis de las curvas sirve perfectamente para saber qué tipo de aplicaciones se pueden tener en este tipo de micromotores. En la siguiente tabla se muestran los datos del micromotor y las recomendaciones de operación

Tabla II. Especificaciones del micromotor.

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro del estator	mm	17
Diámetro del rotor	mm	11
Excentricidad	mm	1
Longitud	mm	14.5
Masa	g	66.13
Número de aspas		6
Reversible		SI
Velocidad máxima	RPM	8500
Par máximo	mNm	5.03
Potencia máxima	W	0.911
Presión máxima	Bar	7,0
Consumo máximo de aire	l/min	55

Los parámetros máximos de funcionamiento son datos muy importantes para conocer las limitantes del micromotor. Además, son datos relevantes para la selección de cualquier motor. Por tanto, en un micromotor se deben especificar.

4.5 Aplicaciones posibles

El par otorgado del micromotor no es suficiente para realizar un desbaste profundo. Sin embargo, con los parámetros obtenidos en las pruebas, este micromotor puede realizar pequeños desbastes. Por tanto, el micromotor neumático se puede utilizar en el *chuck* de un microtorno o en el portaherramientas de una microfresadora, en trabajos de alta velocidad. También, es posible utilizarlo en una micropulidora, si se realizan piezas con acabados superficiales espejo.

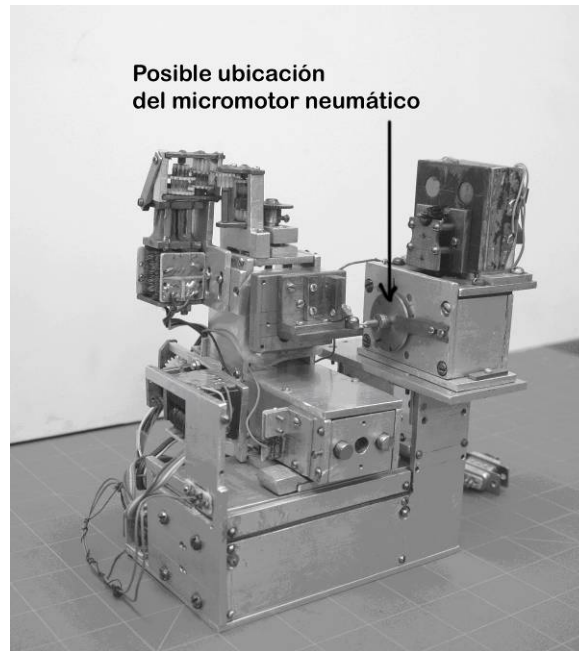


Figura 42. Centro de maquinado desarrollado en el laboratorio de micromecánica y mecatrónica (Kussul et al. 2002)

En la industria se cuenta con un tipo de herramienta de mano neumática, mejor conocida como *mototool* neumático. Las primeras generaciones del micromotor pueden ser útiles como instrumentos de mano. En el futuro, cuando se desarrollen los micromanipuladores, el micromotor o sus próximas generaciones pueden ser el último eslabón del micromanipulador.

Dentro de algunos años, las microfábricas serán una realidad. Entonces, los micromotores neumáticos, dentro de las microfábricas, podrán ser utilizados en grúas viajeras, bandas transportadoras y más.

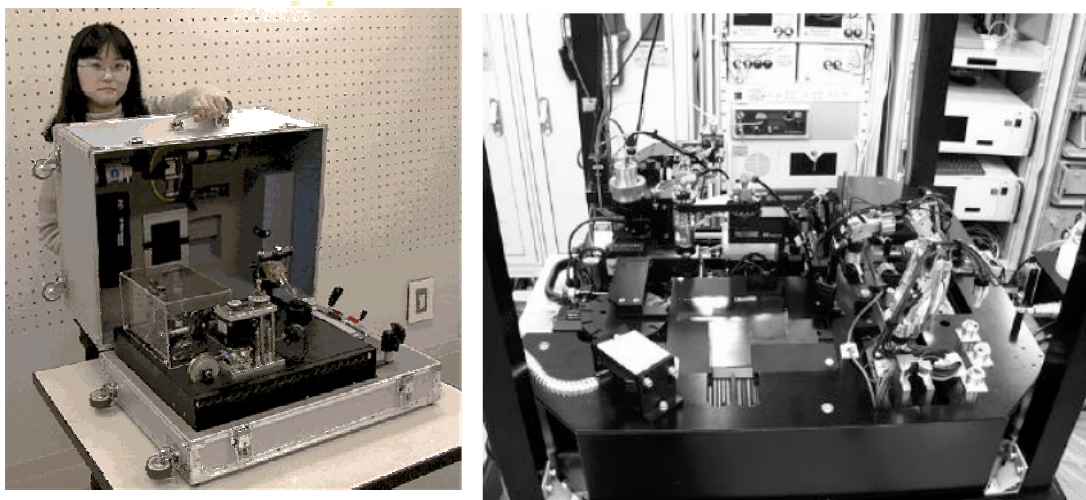


Figura 43. Microfábrica sobre mesa japonesa (Tsuneo Ishimara, Takayuki Hirano) (Tatsuaki et al. 1999)

Por otro lado, con algunas modificaciones en los puertos de alimentación del micromotor, como acoplar toberas para hacer una caída de presión, éste puede utilizarse para herramientas de mano odontológicas. Las dimensiones del micromotor son similares a las actuales piezas utilizadas en los consultorios dentales. No obstante, la siguiente generación será de la mitad de las dimensiones actuales. Por lo tanto, las piezas de mano dentales podrán ser más delgadas y fáciles de maniobrar.



Figura 44. Piezas de mano dentales utilizados actualmente

CONCLUSIONES

El diseño del micromotor neumático de aspas sin resortes es con miras al futuro próximo, con un diseño listo para la reducción de dimensiones.

El sistema diseñado, para mantener unidas las aspas a la pared interior del estator, sustituyendo los resortes del diseño típico, es funcional y no se había utilizado para motores neumáticos.

El micromotor es de diseño compacto, ligero, geometría sencilla, y funcional,

La utilización del PTFE cargado de bisulfuro de molibdeno, para la fabricación de las aspas, da la posibilidad de no utilizar lubricantes en el micromotor. Por las propiedades del PTFE, la fricción es menor que utilizando otro material como la fibra fenólica.

El banco de pruebas, utilizado en este trabajo, puede ser usado en nuevas aplicaciones e investigaciones con componentes neumáticos. Todos los componentes neumáticos fueron elegidos para no ser desechados al término de este trabajo.

Por otro lado, la caracterización del micromotor fue de forma sencilla, con métodos y experimentos fáciles de realizar. Cabe mencionar que, se está desarrollando un dinamómetro de absorción para micromotores, basado en un principio de viscosímetro de cilindros concéntricos, dentro del laboratorio de micromecánica.

El diseño de este micromotor y las leyes básicas de escalamiento, dadas en el Anexo 3, son la base para las próximas generaciones de micromotores neumáticos dentro del Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica.

Los datos colectados en el instrumento nos dieron una referencia clara de las características y posibles aplicaciones del micromotor. Aunque según los datos es un micromotor con gran funcionalidad, aún quedan trabajos por hacer, mejoras en el diseño o materiales utilizados para las futuras generaciones.

RECOMENDACIONES

En el capítulo anterior se dieron los resultados de las pruebas realizadas al micromotor neumático de aspas sin resortes, lo cuales son muy satisfactorios. Por ejemplo, la velocidad angular tiene un valor alto, aunque no se llegó al esperado. El par entregado por el micromotor es un valor más alto de lo esperado. La potencia es considerable con su tamaño, la relación de potencia se ha conservado. Con los resultados de la potencia, se recomienda que la presión de funcionamiento de este micromotor sea de 5 bar. Cualquier compresor en una fábrica o centro investigación tiene la capacidad de otorgar esta presión.

En cuestión de la manufactura y detalles del micromotor, se debe tener en cuenta muchas cosas que repercuten en el funcionamiento del micromotor mismo. La pared interior del estator del micromotor debe tener un buen acabado superficial (*Figura 45*), puesto que, cualquier imperfección puede causar que las aspas se atoren. Además, se tiene mayor fricción y pérdida de eficiencia. En el caso de que la imperfección sea mayor, las aspas pueden romperse y bloquear el micromotor.

Los puertos de entrada deben ser lo suficientemente grandes para asegurar una adecuada circulación del aire presurizado, porque la velocidad del micromotor será menor al esperado y el par entregado cae por las pérdidas en la circulación y presión.



Figura 45. Detalles de manufactura del estator

Por otro lado, las aspas deben estar ajustadas a las ranuras del rotor. En el caso de quedar apretadas no podrán deslizarse libremente y habrá pérdidas, por la falta de cámaras formadas. En el caso que las ranuras sean de mayor ancho que las aspas, se tendrá un juego y habrá pérdidas por fuga de aire. En el caso de que la holgura sea demasiada puede provocar flexión de las aspas, que se salgan de la ranura o bloqueo total del micromotor (*Figura 46*).

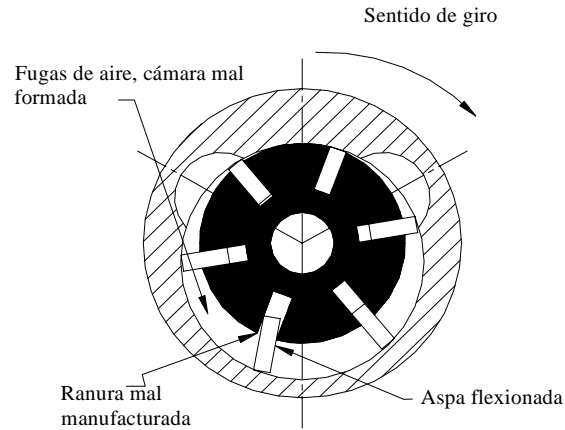


Figura 46. Mal ajuste de ranura y aspa

Para terminar con la manufactura, el ajuste entre las alturas del rotor y el estator debe ser adecuado. En el caso de ser muy apretado, se tienen problemas de fricción entre las tapas y el rotor. En el caso de ser muy holgado se tendrán problemas de vibración, las cámaras no se forman adecuadamente, los rodamientos no funcionan adecuadamente, bastantes fugas de aire y, por tanto, el motor podrá bloquearse.

En las pruebas hechas al micromotor, se encontró que la presión de aire suministrada a la flecha debe ser menor a la presión del aire para el funcionamiento del micromotor (Figura 47). En el caso contrario, la fuerza del aire que entra a la flecha no deja entrar al aire a los puertos de alimentación del micromotor. El tiempo de apertura de la válvula, que deja entrar aire a la flecha, es muy corto. La fuerza centrífuga mantendrá las aspas unidas a la pared interior del estator, después de que la válvula de la flecha se cierre.

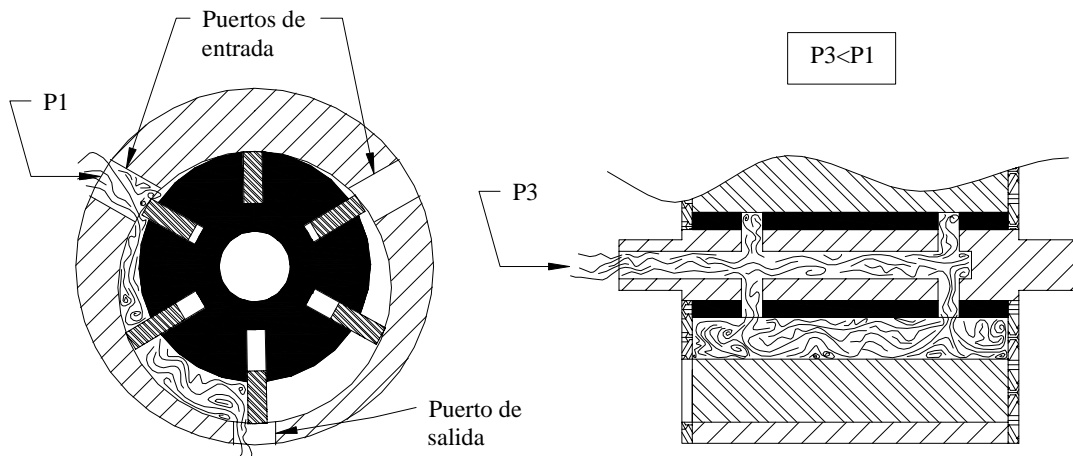


Figura 47. Presiones de entrada al arranque del micromotor

Por lo que respecta a los rodamientos, utilizados en el micromotor, son sellados por lo que no es necesaria su lubricación continua. El mantenimiento de estos será de forma

correctiva, es decir, los rodamientos se cambiaran según su vida calculada por el fabricante, respecto a la velocidad y tipo de uso.

TRABAJO A FUTURO

Es importante seguir con el desarrollo de esta tecnología, puesto que es una línea de investigación de actualidad y con mucho futuro. La micromecánica con técnicas de convencionales es un campo poco conocido y México es uno de los países avocados en esta tecnología.

El primer trabajo a futuro es el escalamiento del dispositivo presentado en este trabajo, la optimización de las piezas del micromotor y una manufactura con tolerancias más estrechas. Otro rubro muy importante es seguir en la búsqueda de otras alternativas de micromotores, como piezoeléctricos o térmicos, así como desarrollar otros neumáticos con otra configuración, por ejemplo, un micromotor neumático a pasos.

Segundo diseño del micromotor neumático

Dentro del desarrollo del micromotor neumático de aspas sin resortes, tuve ideas de mejora y optimización. El segundo diseño del micromotor tiene la diferencia de que el estator, una de las tapas con orificios y la carcasa son una sola pieza, eliminando así el perno guía para la alineación de estos componentes. Las piezas principales del segundo diseño son: un rotor ranurado, idéntico al primer diseño; una flecha perforada, con las mismas dimensiones que el anterior diseño; aspas rectangulares y un estator unido a la carcasa. El rotor y la flecha son fabricados en latón y se manufacturaron como una sola pieza. La carcasa, fabricada en latón, tiene los mismos componentes que el anterior mas el estator dentro de la misma.

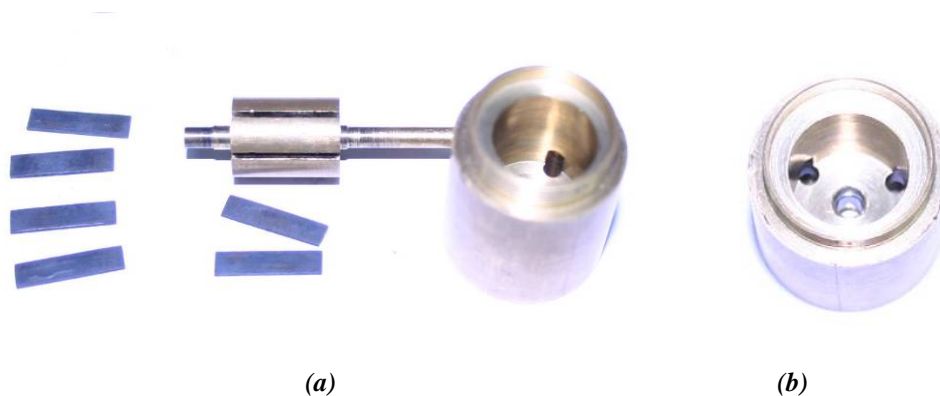


Figura 48. (a) Partes principales del segundo diseño del micromotor neumático de aspas sin resortes, (b) Carcasa y estator en una sola pieza.

El alojamiento del rodamiento se fabrica por la parte exterior. Se colocó un inserto para cubrir el rodamiento y lograr la formación de una “bolsa de aire” antes del rodamiento y lograr una caída de presión del aire suministrado a la flecha. En las Figuras 48 y 49 se pueden observar las partes principales y auxiliares del segundo diseño de micromotor. Las partes auxiliares prácticamente son las mismas que las del diseño anterior, pero con la eliminación de algunas.



Figura 49. Partes auxiliares del segundo diseño de micromotor neumático de aspas sin resortes.

Se realizaron pruebas similares al primer diseño. Los resultados son: Par similar al generado por el primer micromotor, mayor velocidad y una mayor potencia.

En las graficas de las *Figuras 50* al *53* se muestran algunos de los resultados obtenidos para este micromotor.

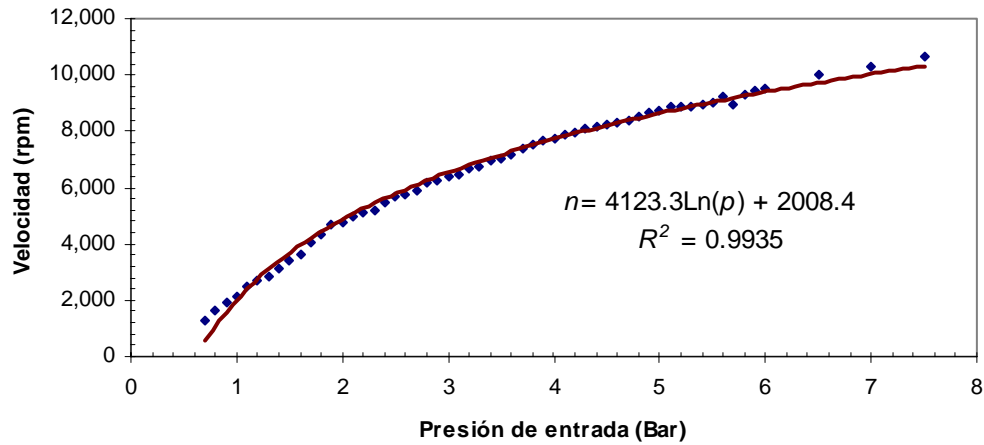


Figura 50. Velocidad angular en función de la presión, segundo diseño.

Como se puede observar, la tendencia de la gráfica de velocidad en función de la presión suministrada (*Figura 50*) es muy similar a la del primer diseño. La función que describe este comportamiento es la siguiente.

$$n = f(p) = 4123.3 \cdot \ln x + 2008.4 \quad (4.10)$$

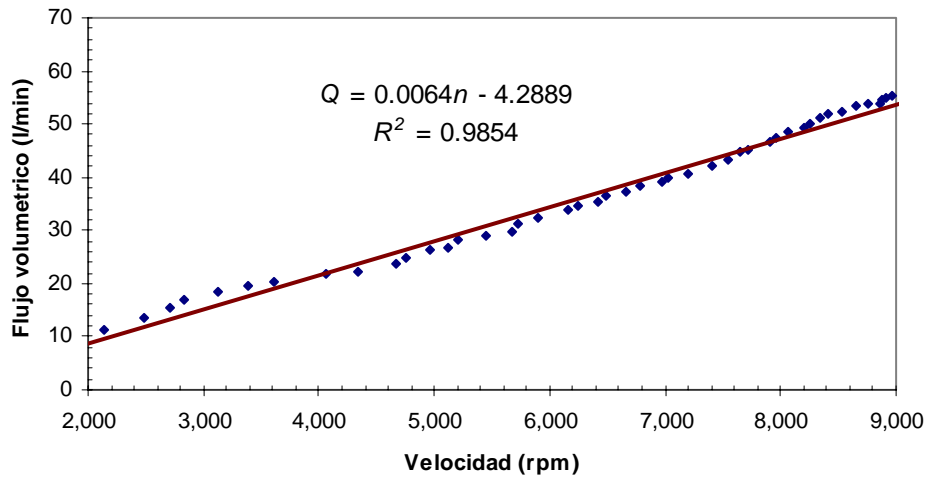


Figura 51. Flujo volumétrico en función de la velocidad, segundo diseño.

La gráfica de la *Figura 51* muestra que la velocidad del micromotor crece conforme el flujo volumétrico aumenta, obedeciendo a una línea recta. Dicha recta se puede representar de la siguiente manera.

$$Q = f(n) = 0.0064 \cdot n - 4.289 \quad (4.11)$$

En lo que respecta a la gráfica de la *Figura 52*, se observa que el par entregado a rotor bloqueado crece linealmente con respecto la presión suministrada aumenta, lo que puede representarse mediante un polinomio de primer grado:

$$T = f(p) = 0.852 \cdot p - 0.187 \quad (4.12)$$

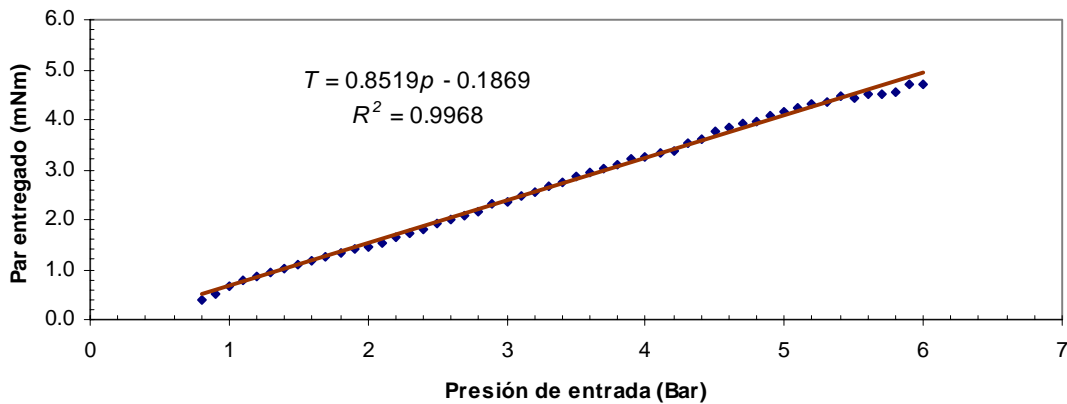


Figura 52. Presión de entrada en función del par entregado a rotor bloqueado, segundo diseño

La potencia de este segundo diseño es mayor. El comportamiento de la gráfica es muy similar a la del primer diseño. Como se puede observar en la *Figura 53*, este diseño tiene el mismo comportamiento.

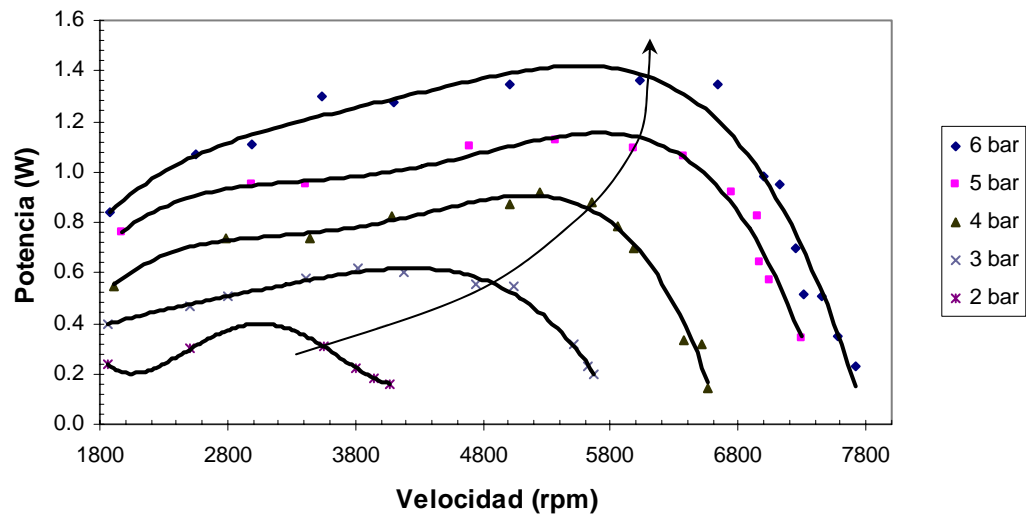


Figura 53. Potencia en función de la velocidad, segundo diseño.

Por último, se presentan las especificaciones de segundo diseño del micromotor neumático de aspas sin resortes en la siguiente tabla:

Tabla III. Especificaciones del segundo diseño del micromotor neumático.

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro del estator	mm	17
Diámetro del rotor	mm	11
Excentricidad	mm	1
Longitud	mm	14.5
Masa	g	84.44
Número de aspas		6
Reversible		SI
Velocidad máxima	RPM	10600
Par máximo	mNm	4.7
Potencia máximo	W	1.36
Presión máxima	Bar	7.5
Flujo volumétrico máximo medido	l/min	55.2

REFERENCIAS

- 1 Ataka, T. "*The Experimental Microfactory System in Japanese National R&D project*" Seiko Instruments Inc. 2000
- 2 Bachman, M.; UCI EECS179: Lecture 02, 2006
- 3 Baidyk, T.; Kussul, E.; Makeyev, O.; "*Image recognition system for microdevice assembly*" IASTED International Multi-Conference on Applied Informatics, v 21, 21st IASTED International Multi-Conference on Applied Informatics, p 243-248, 2003.
- 4 Barth, H. G. "*Druckluft-Drehkolbenmotore Analyse und Berechnung*" Habilitation Clausthal, Germany; 1978
- 5 Beater, P. "*Modelling and Control of Pneumatic Vane Motors*"; International Journal of fluid Power 5 No. 1; pp. 7-16; 2004
- 6 Bertetto, A. M.; Mazza, L.; Pastorelli, S. and Raparelli, T. "*A Model of Contact Forces in Pneumatic Motor Vanes*", Kluwer Academic Publishers, Meccanica 36: 691-700, Netherlands. 2001
- 7 Boresi, A. P.; Schmidt; "*Advanced mechanics of materials*"; Sixth edition; John Wiley & sons, USA; 2003
- 8 Brodie, I. and Murray, J. J.; "*The Physics of Microfabrication*" New York: Plenum Press, 1982
- 9 Brückner, W. "*Die Hauptabmessungen nichtumsteuerbarer Druckluft-Lamellenmotoren mit radialer Lamellenanordnung für niedrigen spezifischen Luftverbrauch*". Doctoral thesis, Bergakademie Freiberg, Germany. 1967
- 10 Daser, E. "*Das Reaktionsmoment hochtouriger Lamellenmotoren, seine Messung und Bedeutung für die Auslegung der Motoren*". Doctoral thesis, Tu Clausthal, Germany. 1969
- 11 Flynn, A. M.; Tavrow, L. S.; Bart, S. F.; Brooks, R. A.; Ehrlich, D. J.; Udayakumar, K. R. and Cross, L. E. "*Piezoelectric Micromotor*"; J. Microelectromech. Syst., 1, pp. 44-52, 1992
- 12 Fujita, H. and Gabriel K. J. "*New Opportunities for Micro Actuators*". 6th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (transducer '91), pp. 14-20. San Francisco, 1991.
- 13 Gad-el-Hak M.; "*Micropumps, microturbines and flow physics in microdevices*" proceeding of SPIE, pp. 242-257; 2003
- 14 Gerts, E. V. and Gerts, M. E. "*Selection of Parameters of a Reversible Pneumatic Actuator*". Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 6, pp. 1-6. 1999
- 15 Grimes, R.; Quin, D.; Kunz, S.; Walsh, E.; and Davies, M.; "*A Theoretical and Experimental Investigation of the Scaling of Micro Fan Performance*" ASME International Mechanical Engineering Congress, Washington, D. C., November 15-21, 2003
- 16 Hamberg M. W.; Neagu, C.; Gardenier, G. E.; Intema, D. J.; Elwenspoek, M. "*An electromechanical Micro Actuator*", IEEE Micro Electro Mechanical System (MEM'S 95). Amsterdam, Netherlands; 1995
- 17 Hansson, C. "*Rotatory air motors*" In Atlas Copco Air Compendium. Atlas Copco AB, Stockholm, Sweden. 1975
- 18 Hsieh, S. S.; Lin, C. Y.; Huang C. and Tsai, H.; "*Liquid flow in a micro-channel*"; J. Micromech. Microeng. 14, pp. 436-445; 2004
- 19 IMM, "*The LIGA Technique*", Commercial Brochure, IMM, 1995.
- 20 Johnson, O. "*Fluid power pneumatics*", American Technical Society, USA, 1975
- 21 Kawahara, N.; Suto, T.; Hirano, T.; Kitahara, T.; Ooyama, N.; Ataka, T. "*Microfactories; new applications of micromachine technology to the manufacture of small products*": Technical papers, Microsystem Technologies, pp37-41, 1997
- 22 Kussul E.M., Rachkovskij D.A., Artykutsa S.Y., Kasatkin A.M., Kasatkina L.M., Lukovich V.V., Talayev S.A., "*Adaptive Control System for Fully Automated Micromechanical Factory*": The Problems and Possible Neural Network Solutions, 1, pp. 524-527. 1997.
- 23 Kussul E.M., Rachkovskij D.A., Baidyk T.N. et al., "*Micromechanical engineering: a bases for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment*". Journal of Micromechanics and Microengineering, 6, pp.410-425. 1996.
- 24 Kussul, E.; Ruiz Huerta; L.; Caballero Ruiz, A.; Kasatkin A.; Kasatkina L.; Baidyk T. & Velasco G. "*Cnc machine tools for low cost micro devices manufacturing*", Journal of Applied Research and Technology, 2 No. 1, pag. 76-91; 2002

- 25 Kussul E., Ruiz L., Caballero-Ruiz A., Baidyk T., Velasco G., "The Perspectives of Micromechanical Filters Application for Fine Filtration of Liquids and Gases", Journal of Micromechanics and Microengineering, V. 2, pp 795-813, 2002.
- 26 Lehr, H. and Schmidt, M; "The LIGA Technique: Commercial Brochure"Instotut fur Mikrotechnik GmbH, Mainz-Hechtsheim, 1995
- 27 Liao, Y.; Chen, s.; and Lin, C. "Development of a high precision tabletop versatile CNC wire-EDM for making intricate micro parts" J. Micromech. Microeng. 15, pp. 245–253, 2005
- 28 Löfdahl, L.; Gad-el-Hak M.; "MEMS applications in turbulence and low control" Aerospace Sciences 35, pp. 101-203; 1999
- 29 López, P. "Diseño de un motor a pasos de alta potencia y propuesta de un control adaptivo", Tesis de maestría en ingeniería, México D. F., 2005
- 30 Madou, M.; "Fundamentals of microfabrication the science of miniaturization"; CRC Press, Florida.2002
- 31 Maluf, N.; "An Introduction to Microelectrochemical tems Engineering". Boston: Archet House, 2000
- 32 Marín , E.; Ruiz, L.; Caballero, A.;Kussul, E. "La configuración modular como aportación al desarrollo de micromáquinas herramienta de bajo costo", Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (Ingeniería Mecánica Tecnología y desarrollo), 1, no 5, pp. 182 – 187, 2004.
- 33 Naranjo, J.; Ascanio, G.; Kussul, E.; "Caracterización de micromotores neumáticos", memorias del XX congreso anual SOMI 24 al 28 de octubre. León, Guanajuato. México, pag. DMM69, 2005
- 34 Naranjo, J.; Ascanio, G.; Kussul, E.; "Diseño de un micromotor neumático de aspas", memorias del XI congreso internacional anual SOMIM IV Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica 21 al 23 de septiembre. Morelia, Mich. México, pag. DMM69; 2005
- 35 Pandian, S.; Takemura, F.; Hayakawa, Y.; Kawamura, S. "Control Performance of an Air Motor- Can Air Motors Replace Electric Motors?", Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan. 1999
- 36 Patiño, I.; Ascanio, G.; Kussul, W.; "Micromotor hidráulico para micromáquinas herramientas" memorias del XI congreso internacional anual SOMIM IV congreso bolivariano de ingeniería mecánica 21 al 23 de septiembre. Morelia, Mich. México, 2005
- 37 Rama S. R., Aijaz A., "Turbomachinery Design and Theory", Marcel Dekker Inc, New York, 2003
- 38 Ruiz, L.; "Diseño y Construcción de un Microcentro de Bajo Costo"; Tesis de Maestría, México, 2000.
- 39 Sbahi, A. "Druckluft-Lamellenmotor". Doctoral thesis, TH Zwickau, Germany. 1992
- 40 Shigley, J. E.; Mischke, C. R.; "Diseño en Ingeniería Mecánica"; sexta edición, McGraw Hill; México. 2004
- 41 Sueng, J. "Electrostatic Actuators: Fabrication Processes", EECS 179: MEMS, pp 1 – 10, 2004.
- 42 Suzumori, K.; Hory, K.; Miyagawa, T.; "A Direct-drive pneumatic stepping motors for robots: Design for pipe inspection microrobots and human-care robots", Proc. IEEE Conf. on robotics and automation, p.p. 3047-3052, Belgium. 1998
- 43 Suzumori, K.; Yashimoto, T.; Uzuka, K.; and Enomoto, I. "Pneumatic Direct-drive Stepping Motor for Robots", International Coference on Intelligent Robots and Systems; Lausanne, Switzerland; October 2002
- 44 Thompson L. F., Willson C. G.; and Bowden M. J.; "Introduction to the Microlitography". Washington, D. C. American Chamental Society, 1994
- 45 Trimmer W. S. N. and Gabriel K. J., "Design Considerations for a practical Electrostatic Micro-Motor", Sensor and actuators, 19, pp. 189-206, 1987
- 46 Trimmer W. S. N. and Jebens R.; "An Operational Harmonic Electrostatic micromotor"; IEEE Micro Electro Mechanical System Workshop, Salt Lake City, Utha, U. S. A., February 1989
- 47 Trimmer W. S. N.; "Micromechanics and MEMS classic and Seminal Papers to 1990", New York: IEEE; 1997
- 48 Yin, Z. and Prosperetti, A.; "A microfluidic 'blinking bubble' pump" J. Micromech. Microeng. 15, pp. 643–651; 2005
- 49 Zhang, Y.; Nishi, A.; "Low-pressure air motor for wall-climbing robot actuation", Mechatronics 13, pp 377–392. 2003

ANEXOS

Anexo 1. Especificaciones de los componentes del banco de pruebas

Las siguientes tablas son las especificaciones de los diferentes componentes del banco de pruebas diseñado para el funcionamiento del micromotor neumático de aspas.

Especificaciones de regulador de presión FESTO

Criterio	Característica
Asegurar el accionamiento	Botón giratorio con enclavamiento
Posición de montaje	vertical +/- 5°
Grado de filtración	40 µm
Evacuación del condensado	giro manual
Construcción	Filtro regulador con manómetro
Cantidad máxima de condensado	22 cm ³
Funda de protección	funda protectora metálica
Indicación de la presión	con manómetro
Margen de regulación de la presión	0,5 - 7 bar
Presión inicial 1	1 - 16 bar
Histéresis máxima de la presión	0,2 bar
Caudal nominal normal	900 l/min
Fluido	Aire comprimido
Temperatura del medio	-10 - 60 °C
Temperatura ambiente	-10 - 60 °C
Homologación	Germanischer Lloyd
Peso del producto	460 g
Tipo de fijación	a elegir:
	Montaje del conducto
	con accesorios
Conexión neumática 1	G1/8
Conexión neumática 2	G1/8
Información sobre el material del cuerpo	Fundición inyectada de cinc
Información sobre el material del depósito del filtro	PC

Especificaciones de lubricador FESTO

Criterio	Característica
Posición de montaje	vertical +/- 5°
Construcción	Lubricador proporcional de niebla de aceite
Llenado máximo de aceite	45 cm ³
Funda de protección	funda protectora metálica
Presión inicial 1	0 - 16 bar
Caudal mínimo para la función de lubricación	3 l/min
Caudal nominal normal	1300 l/min
Fluido	Aire comprimido filtrado, sin lubricar, grado de filtración de 40 µm
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura de almacenamiento	-10 - 60 °C
Temperatura del medio	-10 - 60 °C
Temperatura ambiente	-10 - 60 °C
Homologación	Germanischer Lloyd
Peso del producto	270 g
Tipo de fijación	con accesorios
Conexión neumática 1	G1/8
Conexión neumática 2	G1/8
Información sobre el material del depósito del filtro	PC

Especificaciones del sensor de presión relativa

Criterio	Característica
Anticortocircuitaje	ciclos
Magnitud de la medición	presión relativa
Método de medición	Sensor de presión piezorresistivo con indicación
Polos inconfundibles	para todas las conexiones eléctricas
Valores umbrales del margen de ajuste	0,2 - 9,98 bar
Histéresis del margen de ajuste [bar]	0 - 9 bar
Presión de funcionamiento	0 - 10 bar
Salida analógica	0 - 10 V
Margen de tensión de funcionamiento DC	15 - 30 V
Corriente máxima de salida	150 mA
Salida	PNP
Fluido	Aire comprimido filtrado, sin ubricar, grado de filtración de 40 µm Aire comprimido filtrado y lubricado, grado de filtración de 40 µm
Símbolo CE	Según la directiva EU 89/336/EWG (EMV)
Temperatura del medio	0 - 50 °C
Tipo de protección	IP65
Temperatura ambiente	0 - 50 °C
Peso del producto	95 g
Margen de medición de la presión	0 - 10 bar
Precisión FS	2 %
Conexión eléctrica	Conector forma redondo según NE 60947-5-2 M8x1 4 contactos
Tipo de fijación	hacia la unidad de mantenimiento
Conexión neumática	R1/8
Información sobre el material del cuerpo	PA
	POM reforzado

Especificaciones del sensor presión diferencial

Criterio	Característica
Anticortocircuitaje	ciclos
Magnitud de la medición	Presión diferencial
	presión relativa
Método de medición	Sensor de presión piezorresistivo con indicación
Polos inconfundibles	para todas las conexiones eléctricas
Valores umbrales del margen de ajuste	0,2 - 9,98 bar
Histéresis del margen de ajuste [bar]	0 - 9 bar
Presión de funcionamiento	0 - 10 bar
Salida analógica	0 - 10 V
Margen de tensión de funcionamiento DC	15 - 30 V
Corriente máxima de salida	150 mA
Salida	PNP
Fluido	Aire comprimido filtrado, sin ubricar, grado de filtración de 40 µm Aire comprimido filtrado y lubricado, grado de filtración de 40 µm
Símbolo CE	Según la directiva EU 89/336/EWG (EMV)
Temperatura del medio	0 - 50 °C
Tipo de protección	IP65
Temperatura ambiente	0 - 50 °C
Peso del producto	70 g
Margen de medición de la presión	0 - 10 bar
Precisión FS	2 %
Conexión eléctrica	Conector forma redondo según NE 60947-5-2 M8x1 4 contactos
Tipo de fijación	con perfil DIN
Conexión neumática	QS-4
Información sobre el material del cuerpo	PA
	POM reforzado

Especificación de sensor de caudal

Criterio	Característica
Posición de montaje	horizontal vertical
Función del elemento de conmutación	conmutable
función de conmutación	Programable libremente
Tipo de display	Alfanumérico, 3 1/2
Margen de indicación	5 - 50 l/min
Presión de funcionamiento	-0,7 - 7 bar
Tiempo de conexión	50 ms
Salida analógica	1 - 5 V
Margen de tensión de funcionamiento DC	12 - 24 V
Resistencia de carga	> 50 kOhm
Salida	2xPNP
Fluido	Aire comprimido filtrado, sin ubricar, grado de filtración de 40 µm
Símbolo CE	Según la directiva EU 89/336/EWG (EMV)
Clase de resistencia a la corrosión KBK	2
Temperatura del medio	0 - 50 °C
Tipo de protección	IP40
Temperatura ambiente	0 - 50 °C
Peso del producto	90 g
Margen de medición del caudal	5 - 50 l/min
Precisión FS	5 %
Repetición del valor de conmutación FS	3 %
Conexión eléctrica	Cable
Longitud del cable	1 m
Tipo de fijación	con taladro pasante
Conexión neumática	Rosca interior G1/8
Indicación sobre el material	contiene sustancias perjudiciales para la pintura
Información sobre el material del cuerpo	Aluminio
	PA
Información sobre el material de la cubierta del cable	PVC

Anexo 2. Tablas de resultados de pruebas

Las tablas y graficas siguientes representas los datos completos de las pruebas realizadas al micromotor neumático de aspas.

Datos obtenidos a rotor bloqueado

Presión de entrada (Bar)	Caida de presión (Bar)	Fuerza (g)	Distancia Palanca (mm)	Par medido (mNm)
6.00	5.51	10.70	48	5.038
5.90	5.48	10.53	48	4.958
5.80	5.42	10.28	48	4.841
5.70	5.38	10.22	48	4.812
5.60	5.33	10.19	48	4.798
5.50	5.29	10.14	48	4.775
5.40	5.23	10.08	48	4.746
5.30	5.15	9.91	48	4.666
5.20	5.10	9.85	48	4.638
5.10	4.98	9.70	48	4.568
5.00	4.82	9.52	48	4.483
4.90	4.79	9.45	48	4.450
4.80	4.65	9.21	48	4.337
4.70	4.61	9.17	48	4.318
4.60	4.46	8.94	48	4.210
4.50	4.38	8.76	48	4.125
4.40	4.33	8.62	48	4.059
4.30	4.24	8.37	48	3.941
4.20	4.14	8.12	48	3.824
4.10	3.98	7.84	48	3.692
4.00	3.91	7.65	48	3.602
3.90	3.85	7.55	48	3.555
3.80	3.65	7.12	48	3.353
3.70	3.54	6.97	48	3.282
3.60	3.52	6.84	48	3.221
3.50	3.42	6.56	48	3.089
3.40	3.33	6.37	48	3.000
3.30	3.15	6.11	48	2.877
3.20	3.10	5.90	48	2.778
3.10	3.02	5.78	48	2.722
3.00	2.85	5.31	48	2.500
2.90	2.73	5.06	48	2.383
2.80	2.68	4.95	48	2.331
2.70	2.56	4.71	48	2.218
2.60	2.50	4.59	48	2.161
2.50	2.40	4.34	48	2.044
2.40	2.25	4.07	48	1.916
2.30	2.19	3.97	48	1.869
2.20	2.11	3.72	48	1.752
2.10	1.99	3.53	48	1.662
2.00	1.90	3.30	48	1.554
1.90	1.79	3.13	48	1.474
1.80	1.67	2.90	48	1.366
1.70	1.62	2.72	48	1.281
1.60	1.47	2.42	48	1.140
1.50	1.36	2.25	48	1.059
1.40	1.29	2.13	48	1.003
1.30	1.18	1.92	48	0.904
1.20	1.11	1.75	48	0.824
1.10	0.99	1.55	48	0.730
1.00	0.89	1.31	48	0.617
0.90	0.81	1.01	48	0.476
0.80	0.73	0.85	48	0.400

Datos obtenidos de velocidad sin carga

Presión de entrada (bar)	Caída de presión (Bar)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (rpm)
6.00	5.60	138.60	8316.00
5.90	5.50	137.12	8227.20
5.80	5.40	135.65	8139.00
5.70	5.38	134.68	8080.80
5.60	5.33	133.60	8016.00
5.50	5.29	131.74	7904.40
5.40	5.23	130.10	7806.00
5.30	5.15	128.65	7719.00
5.20	5.10	127.42	7645.20
5.10	4.98	126.13	7567.80
5.00	4.82	124.65	7479.00
4.90	4.79	123.03	7381.80
4.80	4.65	121.68	7300.80
4.70	4.61	119.31	7158.60
4.60	4.46	118.68	7120.80
4.50	4.38	116.51	6990.60
4.40	4.33	113.87	6832.20
4.30	4.24	110.40	6624.00
4.20	4.14	108.36	6501.60
4.10	3.98	107.17	6430.20
4.00	3.91	106.58	6394.80
3.90	3.85	105.63	6337.80
3.80	3.65	102.82	6169.20
3.70	3.54	101.81	6108.60
3.60	3.50	101.66	6099.60
3.50	3.42	99.39	5963.40
3.40	3.32	98.43	5905.80
3.30	3.15	92.65	5559.00
3.20	3.10	91.90	5514.00
3.10	3.05	91.38	5482.80
3.00	2.85	88.50	5310.00
2.90	2.73	87.11	5226.60
2.80	2.68	85.11	5106.60
2.70	2.56	84.60	5076.00
2.60	2.50	83.57	5014.20
2.50	2.40	80.62	4837.20
2.40	2.27	78.62	4717.20
2.30	2.18	77.41	4644.60
2.20	2.07	73.88	4432.80
2.10	1.99	71.48	4288.80
2.00	1.90	70.71	4242.60
1.90	1.83	68.70	4122.00
1.80	1.66	65.04	3902.40
1.70	1.62	60.55	3633.00
1.60	1.50	58.89	3533.40
1.50	1.44	56.40	3384.00
1.40	1.36	54.62	3277.20
1.30	1.26	53.08	3184.80
1.20	1.11	49.53	2971.80
1.10	1.03	46.52	2791.20
1.00	0.91	44.02	2641.20
0.90	0.85	42.01	2520.60
0.80	0.75	39.53	2371.80

Datos obtenidos en las pruebas de potencia del micromotor neumático

Presión de entrada		6			
Carga inicial (g)	Carga final (g)	Frecuencia (Hz)	Par entregado (mNm)	Velocidad (rpm)	Potencia (W)
0.90	1.95	103.31	0.19	6198.60	0.124
2.00	2.99	102.03	0.29	6121.80	0.188
3.20	4.12	100.95	0.40	6057.00	0.256
4.27	6.06	99.20	0.59	5952.00	0.371
5.30	7.86	97.15	0.77	5829.00	0.471
6.30	8.89	95.63	0.87	5737.80	0.524
7.63	11.51	94.13	1.13	5647.80	0.668
8.56	13.01	93.80	1.28	5628.00	0.752
10.06	14.21	92.63	1.39	5557.80	0.811
11.21	18.20	83.09	1.79	4985.40	0.932
12.71	19.79	74.68	1.94	4480.80	0.911
14.27	23.78	51.26	2.33	3075.60	0.751
16.26	27.36	41.92	2.68	2515.20	0.707

Presión de entrada		5			
Carga inicial (g)	Carga final (g)	Frecuencia (Hz)	Par entregado (mNm)	Velocidad (rpm)	Potencia (W)
0.99	1.69	97.30	0.17	5838.00	0.101
1.97	3.19	96.60	0.31	5796.00	0.190
2.97	5.27	95.64	0.52	5738.40	0.311
4.10	7.61	94.12	0.75	5647.20	0.441
5.35	8.49	93.06	0.83	5583.60	0.487
6.35	10.54	90.95	1.03	5457.00	0.591
7.04	11.65	90.04	1.14	5402.40	0.647
7.96	13.56	87.20	1.33	5232.00	0.729
9.18	15.60	82.40	1.53	4944.00	0.792
10.68	16.84	79.39	1.65	4763.40	0.824
11.23	17.86	69.15	1.75	4149.00	0.761
12.40	20.27	53.65	1.99	3219.00	0.670
13.80	21.66	45.72	2.12	2743.20	0.610
14.90	25.71	35.27	2.52	2116.20	0.559

Presión de entrada		4			
Carga inicial (g)	Carga final (g)	Frecuencia (Hz)	Par entregado (mNm)	Velocidad (rpm)	Potencia (W)
0.98	1.94	85.16	0.19	5109.60	0.102
1.80	3.42	83.72	0.34	5023.20	0.176
2.76	4.67	82.74	0.46	4964.40	0.238
3.70	6.56	82.58	0.64	4954.80	0.334
5.40	7.63	80.60	0.75	4836.00	0.379
6.16	10.92	76.30	1.07	4578.00	0.514
7.84	11.56	70.02	1.13	4201.20	0.499
8.64	12.26	62.53	1.13	3751.80	0.446
10.10	13.30	58.63	1.20	3517.80	0.443
11.00	15.20	51.37	1.30	3082.20	0.421
11.70	16.24	41.06	1.49	2463.60	0.385
12.94	20.03	37.10	1.59	2226.00	0.371

Presión de entrada		3			
Carga inicial (g)	Carga final (g)	Frecuencia (Hz)	Par entregado (mNm)	Velocidad (rpm)	Potencia (W)
1.43	2.76	74.20	0.27	4452.00	0.126
2.98	3.41	72.90	0.33	4374.00	0.153
3.54	3.94	70.02	0.39	4201.20	0.170
4.39	5.70	67.14	0.56	4028.40	0.236
5.53	7.32	64.21	0.72	3852.60	0.290
6.27	8.97	50.23	0.88	3013.80	0.278
7.09	10.27	43.59	1.01	2615.40	0.276
7.53	10.66	39.84	1.01	2390.40	0.252
8.43	12.22	34.97	1.05	2098.20	0.230
9.60	13.53	29.98	1.20	1798.80	0.226
10.58	14.98	25.63	1.33	1537.80	0.214
11.79	17.23	20.30	1.47	1218.00	0.187

Presión de entrada		2			
Carga inicial (g)	Carga final (g)	Frecuencia (Hz)	Par entregado (mNm)	Velocidad (rpm)	Potencia (W)
0.91	1.57	59.98	0.15	3598.80	0.058
1.73	2.05	57.97	0.20	3478.20	0.073
3.05	3.96	51.31	0.39	3078.60	0.125
4.05	5.52	46.69	0.54	2801.40	0.159
5.02	6.76	30.08	0.66	1804.80	0.125
5.43	7.86	22.36	0.77	1341.60	0.108
6.08	9.58	20.10	0.94	1206.00	0.119

Presión de entrada		1.5			
Carga inicial (g)	Carga final (g)	Frecuencia (Hz)	Par entregado (mNm)	Velocidad (rpm)	Potencia (W)
0.50	0.95	45.78	0.09	2746.80	0.027
1.00	1.33	41.29	0.13	2477.40	0.034
1.57	2.35	30.74	0.23	1844.40	0.045
2.18	3.40	29.31	0.33	1758.60	0.061
2.86	4.09	25.31	0.40	1518.60	0.064
3.06	5.52	20.50	0.54	1230.00	0.070
4.46	6.17	17.46	0.61	1047.60	0.066

Anexo 3. Escalamiento de fuerzas neumáticas

Los dos parámetros más importantes que caracterizan a los fluidos son la densidad y la viscosidad. La densidad o masa específica ρ , es la masa por unidad de volumen; con esto tenemos que la masa de un fluido se escala de la siguiente manera. Se tienen dos dispositivos A y B , se puede tomar un elemento infinitesimal de cada dispositivo dx , dy y dz , respetando las escalas dimensionales; los dispositivos tienen la misma densidad por ser del mismo material, entonces:

$$\begin{aligned} dx_A &= S dx_B \\ dy_A &= S dy_B \\ dz_A &= S dz_B \end{aligned} \quad (5.1)$$

y

$$\rho_A(x_A, y_A, z_A) = \rho_B(x_B, y_B, z_B)$$

La masa de un componente es posible definirla como:

$$m = \iiint \rho(x, y, z) dx dy dz \quad (5.2)$$

Con esto, se puede hacer lo siguiente

$$m_A = \iiint \rho_A(x, y, z) dx_A dy_A dz_A = \iiint \rho_B(x, y, z) S dx_B S dy_B S dz_B = S^3 m_B \quad (5.3)$$

Como se puede observar, el factor de escalamiento de la masa es de tercer orden.

La viscosidad dinámica de un fluido μ , es la propiedad que causan los esfuerzos cortantes cuando el fluido está en movimiento, medido en unidades de masa sobre unidades de longitud y tiempo, y se define como la razón del esfuerzo, τ_s , sobre el cortante considerado Γ_s :

$$\mu = \frac{\tau_s}{\Gamma_s} \quad (5.4)$$

La viscosidad cinemática es la razón absoluta de la viscosidad dinámica y la densidad, y esta medida en unidades de longitud al cuadrado sobre unidades de tiempo.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.6)$$

Para las fuerzas neumáticas e hidráulicas se tienen dos condiciones, la primera de ellas considera que la diferencia de presiones Δp y la viscosidad del fluido son constantes. La fuerza de la presión está dada por la ecuación, y escalada de la forma.

$$F_A = \Delta p_A A_A = \Delta p_B S^2 A_B = S^2 F_B \quad (5.7)$$

Donde A es el área del actuador neumático o hidráulico, por ejemplo un pistón, y, Δp es la diferencia de presiones dentro del actuador.

El gasto del flujo neumático o hidráulico, Q , se puede calcular con la ecuación:

$$Q = \frac{\pi D^4}{128 \mu L} (p_1 - p_2) \quad (5.8)$$

Donde D , L son el diámetro y longitud del canal, respectivamente, p_1 , p_2 son la presiones de entrada y salida del canal, respectivamente y μ en la viscosidad dinámica, con lo cual

$$Q_A = \frac{\pi D_A^4}{128 \mu_A L_A} (p_1 - p_2) = \frac{\pi S^4 D_B^4}{128 \mu_B S L_B} (p_1 - p_2) = S^3 Q_B \quad (5.9)$$

El gasto del flujo decrece con el cubo del factor de escalamiento S . De lo anterior, la velocidad del fluido es posible calcularlo mediante $V=Q/A$, por lo que

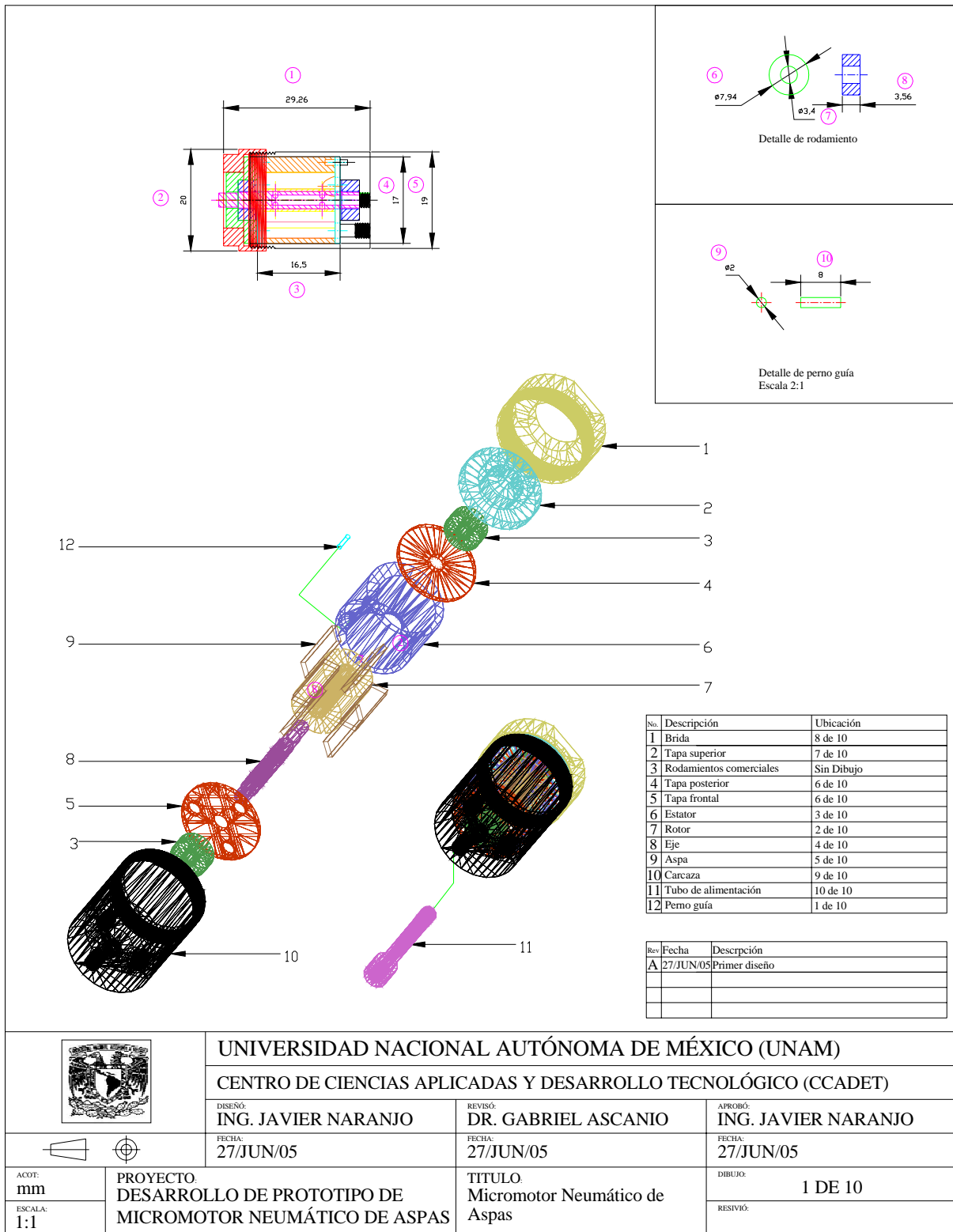
$$V_A = \frac{4Q_A}{\pi D_A^2} = \frac{4S^3 Q_B}{\pi S^2 D_B^2} = S V_B \quad (5.10)$$

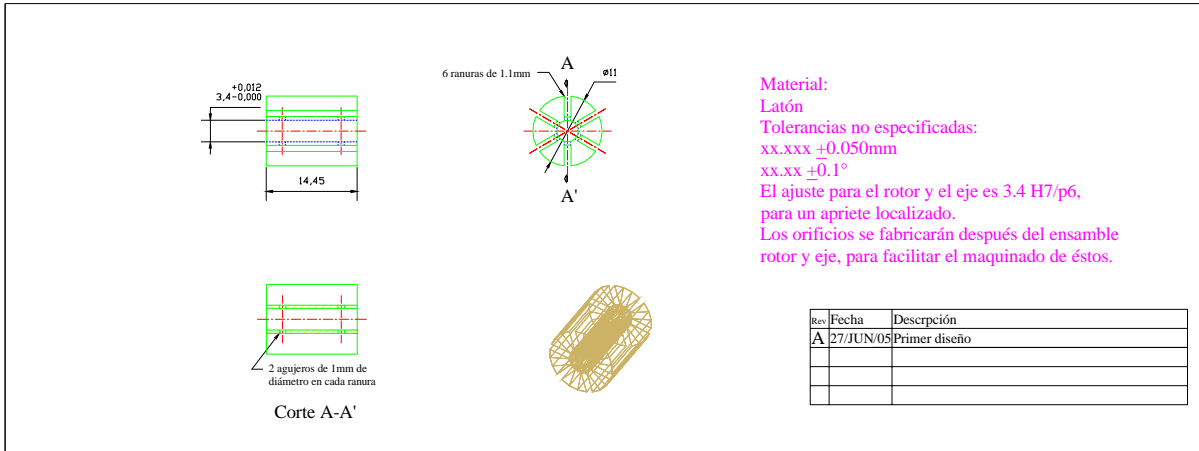
Sí se analiza la ecuación 5.10 se puede deducir que el tiempo es constante en el escalamiento, porque la velocidad esta medida en unidades de longitud sobre unidades de tiempo y como la longitud se escala linealmente, entonces, el tiempo no se está escalando en este caso. Pero para la segunda condición de las fuerzas neumáticas e hidráulicas donde la velocidad se mantiene constante y el tiempo decrece; entonces, los procesos pueden ser más rápidos. Para lograr esta condición, al miniaturizar los dispositivos, la viscosidad del fluido decrece de acuerdo a la ecuación

$$\mu_A = S \mu_B \quad (5.11)$$

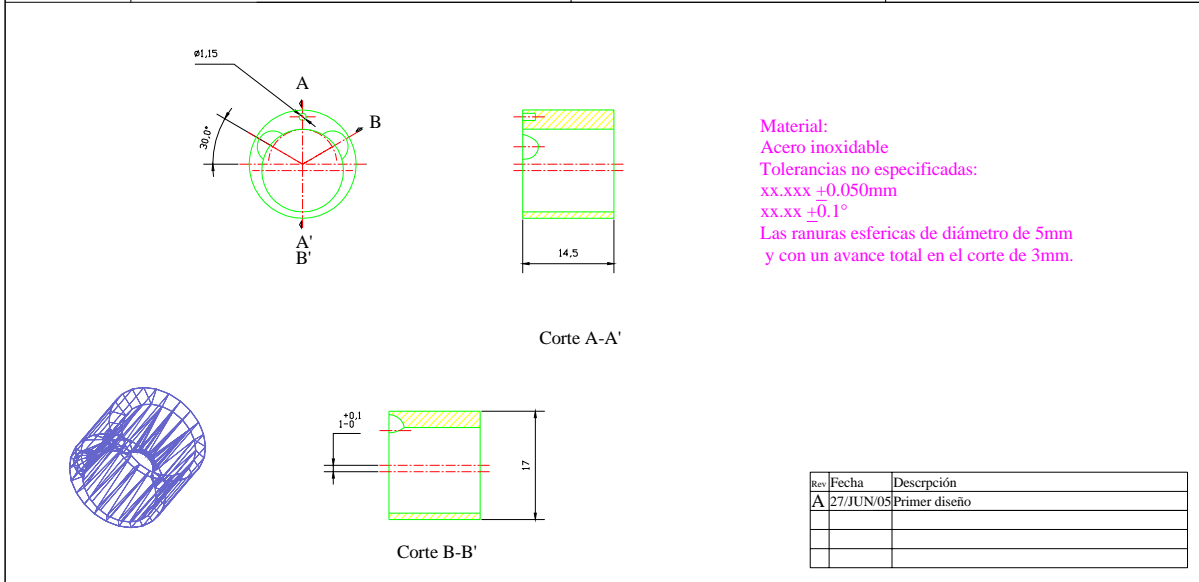
Es decir que, sí se emplea aceite en los motores hidráulicos con un diámetro de 100 mm, usando alcohol o acetona es posible hacer un motor de 500 μm de diámetro, con la misma potencia relativa al tamaño. Para disminuir secuencialmente el tamaño del actuador es mejor utilizar motores neumáticos, puesto que un motor neumático permite un escalamiento de hasta 10 μm .

Anexo 4. Planos de detalle del micromotor neumático de aspas.

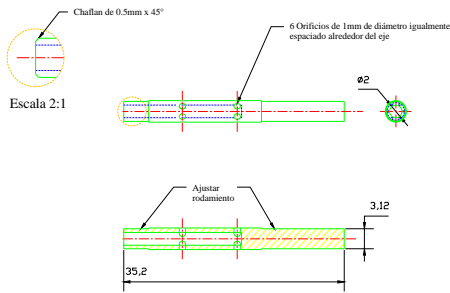




	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)		
	CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)		
	DISEÑO: ING. JAVIER NARANJO	REVISÓ: DR. GABRIEL ASCANIO	APROBÓ: ING. JAVIER NARANJO
	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05
ACOT: mm	PROYECTO: DESARROLLO DE PROTOTIPO DE MICROMOTOR NEUMÁTICO DE ASPAS	TÍTULO: ROTOR	DIBUJO: 2 DE 10
ESCALA: 1:1			RESIVÓ:



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)		
	CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)		
	DISEÑO: ING. JAVIER NARANJO	REVISÓ: DR. GABRIEL ASCANIO	APROBÓ: ING. JAVIER NARANJO
	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05
ACOT: mm	PROYECTO: DESARROLLO DE PROTOTIPO DE MICROMOTOR NEUMÁTICO DE ASPAS	TÍTULO: ESTATOR	DIBUJO: 3 DE 10
ESCALA: 1:1			RESIVÓ:



Material:
 Latón
 Tolerancias no especificadas:
 xx.xxx +0.050mm
 xx.xx +0.1°
 El ajuste para el rotor y el eje es 3.4 H7/p6,
 para un apriete localizado.
 El ajuste para el eje y el rodamiento es de 3 H9/d9
 Los orificios se fabricarán después del ensamble
 rotor y eje, para facilitar el maquinado de éstos.

Rev	Fecha	Descripción
A	27/JUN/05	Primer diseño
B	05/ABR/06	Cambio y alargamiento de eje, cota 2 era 17.5, cota 7 era 3.875, cota 14 era 3.85, cota 12 era 7.1, cota 11 era 3.68, cota 13 y 4 se eliminan



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)
 CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)

DESEÑO:
 ING. JAVIER NARANJO

REVISÓ:
 DR. GABRIEL ASCANIO

APROBÓ:
 ING. JAVIER NARANJO

FECHA:
 27/JUN/05

FECHA:
 07/ABR/06

FECHA:
 07/ABR/06

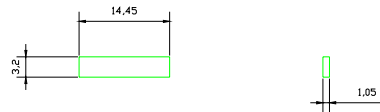
ACOT:
 mm
 ESCALA:
 1:1

PROYECTO:
 DESARROLLO DE PROTOTIPO DE
 MICROMOTOR NEUMÁTICO DE ASPAS

TÍTULO:
 EJE

DIBUJO:
 4 DE 10

RESIVIO:



Material:
 Fibra fenólica, Plástico, teflón cargado
 Tolerancias no especificadas:
 xx.xxx +0.050mm
 xx.xx +0.1°
 En ésta pieza se fabricará de varios tipos de plástico
 para comparar y elegir le mejor opción

Rev	Fecha	Descripción
A	27/JUN/05	Primer diseño



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)
 CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)

DESEÑO:
 ING. JAVIER NARANJO

REVISÓ:
 DR. GABRIEL ASCANIO

APROBÓ:
 ING. JAVIER NARANJO

FECHA:
 27/JUN/05

FECHA:
 27/JUN/05

FECHA:
 27/JUN/05

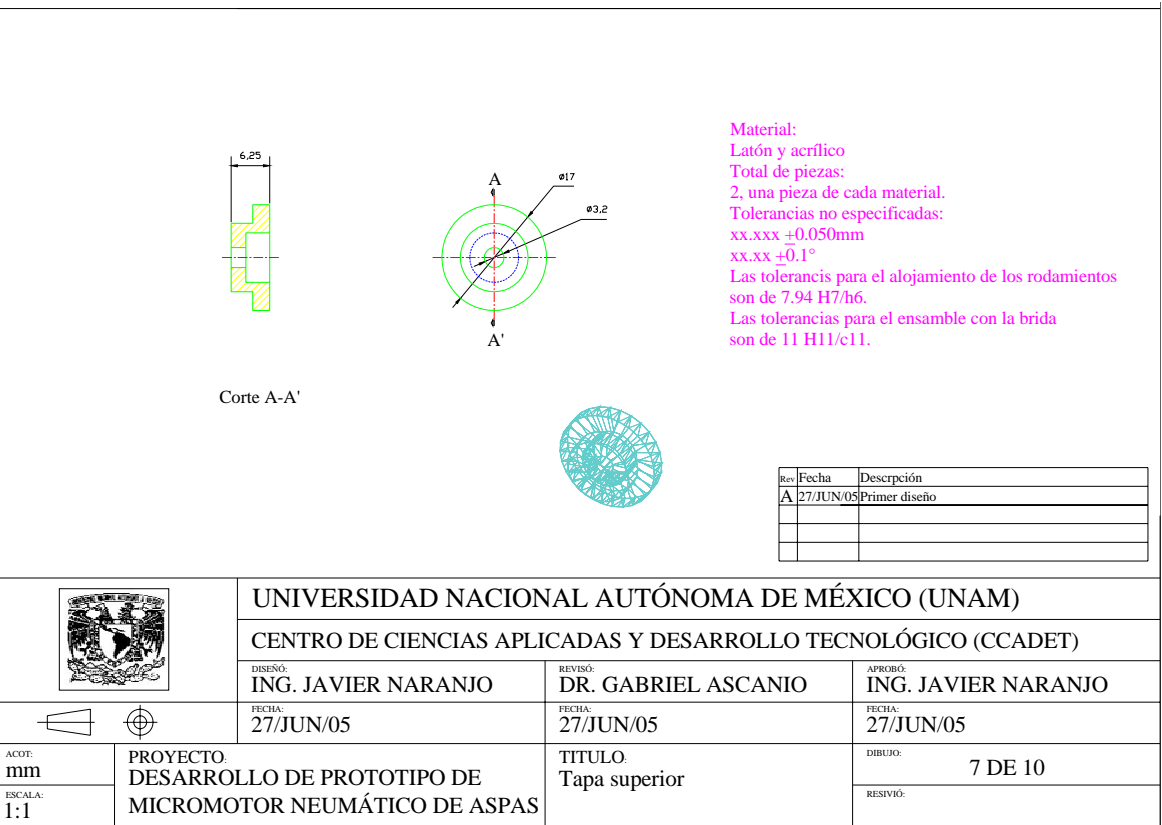
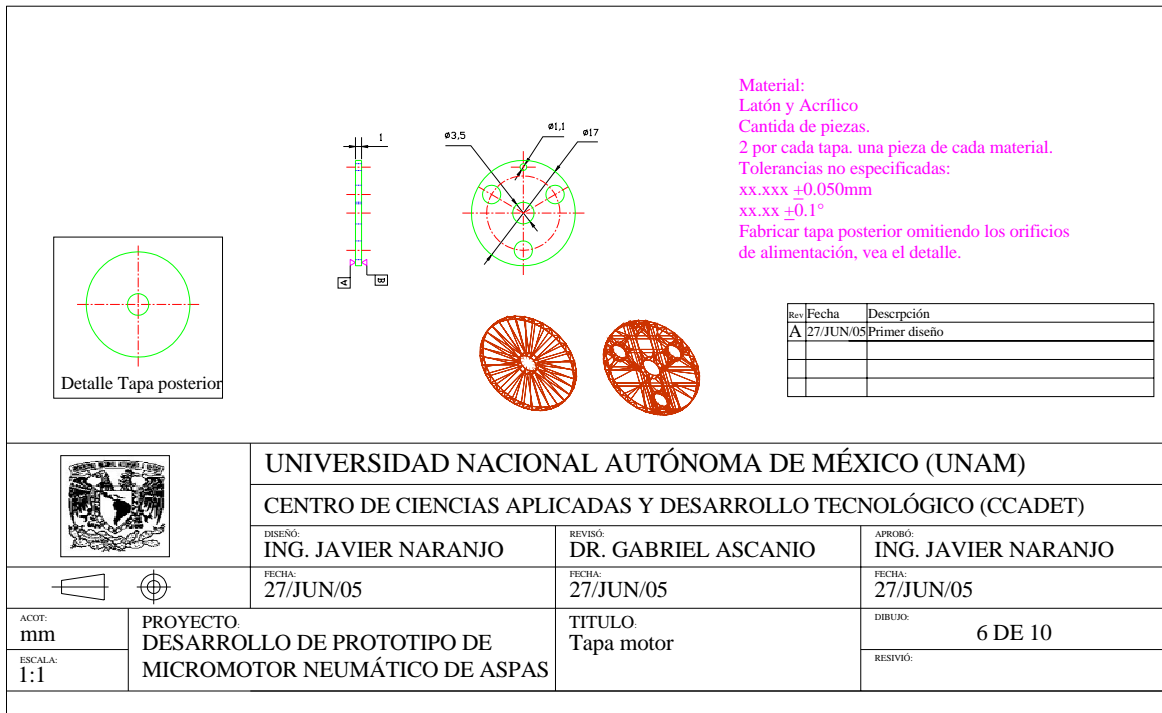
ACOT:
 mm
 ESCALA:
 1:1

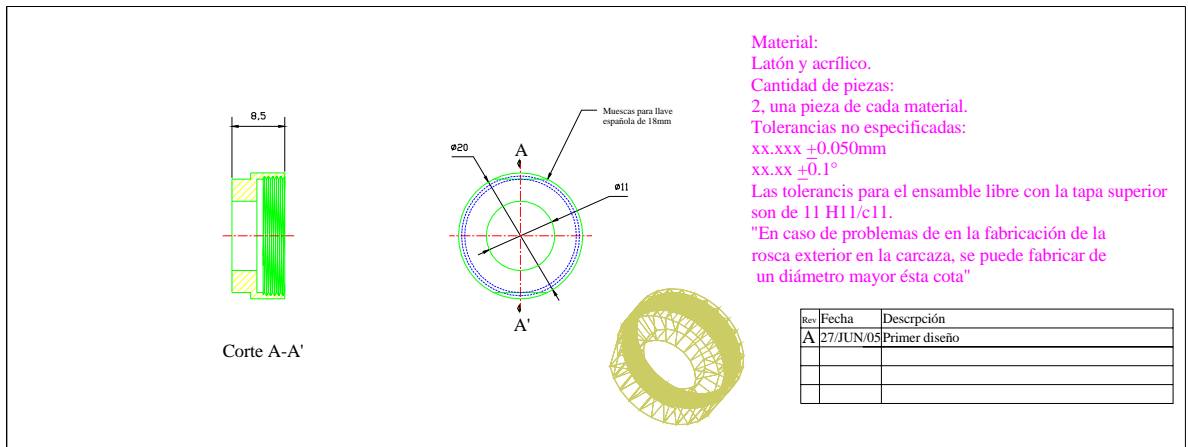
PROYECTO:
 DESARROLLO DE PROTOTIPO DE
 MICROMOTOR NEUMÁTICO DE ASPAS

TÍTULO:
 ASPA

DIBUJO:
 5 DE 10

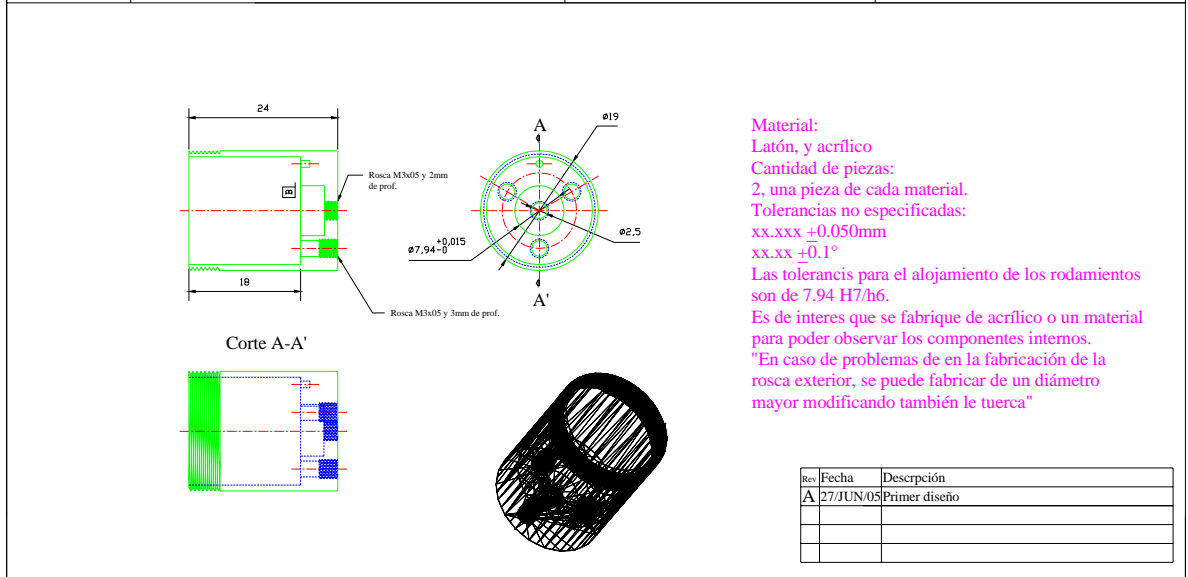
RESIVIO:





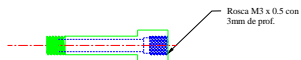
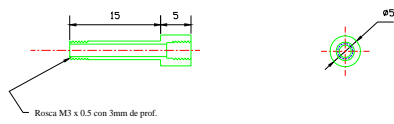
Material:
 Latón y acrílico.
 Cantidad de piezas:
 2, una pieza de cada material.
 Tolerancias no especificadas:
 xx.xxx $\pm 0.050\text{mm}$
 xx.xx $\pm 0.1^\circ$
 Las tolerancias para el ensamble libre con la tapa superior son de 11 H11/c11.
 "En caso de problemas de en la fabricación de la rosca exterior en la carcaza, se puede fabricar de un diámetro mayor ésta cota"

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)		
	CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)		
	DISEÑO: ING. JAVIER NARANJO	REVISÓ: DR. GABRIEL ASCANIO	APROBÓ: ING. JAVIER NARANJO
	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05
ACOF: mm	PROYECTO. DESARROLLO DE PROTOTIPO DE MICROMOTOR NEUMÁTICO DE ASPAS	TÍTULO: Brida	DIBUJO: 8 DE 10
ESCALA: 1:1			RESIVÍO:



Material:
 Latón, y acrílico
 Cantidad de piezas:
 2, una pieza de cada material.
 Tolerancias no especificadas:
 xx.xxx $\pm 0.050\text{mm}$
 xx.xx $\pm 0.1^\circ$
 Las tolerancias para el alojamiento de los rodamientos son de 7.94 H7/h6.
 Es de interes que se fabrique de acrílico o un material para poder observar los componentes internos.
 "En caso de problemas de en la fabricación de la rosca exterior, se puede fabricar de un diámetro mayor modificando también le tuerca"

	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)		
	CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)		
	DISEÑO: ING. JAVIER NARANJO	REVISÓ: DR. GABRIEL ASCANIO	APROBÓ: ING. JAVIER NARANJO
	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05	FECHA: 27/JUN/05
ACOF: mm	PROYECTO. DESARROLLO DE PROTOTIPO DE MICROMOTOR NEUMÁTICO DE ASPAS	TÍTULO: Carcaza	DIBUJO: 9 DE 10
ESCALA: 1:1			RESIVÍO:



Material:
 Laton
 Tolerancias no especificadas:
 xx.xxx +0.050mm
 xx.xx ±0.1°



Rev	Fecha	Descripción
A	27/JUN/05	Primer diseño



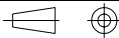
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM)

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)

DISEÑO:
 ING. JAVIER NARANJO

REVISÓ:
 DR. GABRIEL ASCANIO

APROBÓ:
 ING. JAVIER NARANJO



FECHA:
 27/JUN/05

FECHA:
 27/JUN/05

FECHA:
 27/JUN/05

ACOT:
 mm
 ESCALA:
 1:1

PROYECTO
 DESARROLLO DE PROTOTIPO DE
 MICROMOTOR NEUMÁTICO DE ASPAS

TÍTULO
 TUBO ALIMENTACIÓN

DIBUJO:
 10 DE 10
 RESIVIÓ: