



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DESARROLLO DE ACTUADORES
HIDRÁULICOS PARA
MICROMÁQUINAS-HERRAMIENTA**

T E S I S

QUE PRESENTA:

BOGAR ISRAEL PATIÑO ROA
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

ASESORES:

DR. GABRIEL ASCANIO
DR. ERNST KUSSUL



CIUDAD UNIVERSITARIA

FEBRERO DE 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTOS

A mí padre y madre por su apoyo y cariño. Todo lo que soy se lo debo a ellos.

A mí hermano por su amistad y por permitirme crecer a su lado y acompañarme durante todo este tiempo.

A mis abuelos por su cariño y comprensión.

A mis tíos Juan y Paco por su apoyo. También le agradezco a Elizabeth

A Hashiri por ser la luz de la casa; espero que cuando pueda leer esta frase siga siendo tan alegre como estos dos primeros años.

Al Dr. Gabriel, no solo por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, sino por su amistad y consejos. Realmente no tengo como agradecerle tantas atenciones para conmigo.

Al Dr. Kussul, por creer en los mexicanos y darme la oportunidad de trabajar en este laboratorio.

Al Dr. Leopoldo y al Dr. Alberto por sus asesorías y consejos durante mi estancia en el laboratorio; realmente fueron de mucha ayuda.

A la Dra. Graciela y a la Dra. Baidyk, gracias.

A Don Mario y a los trabajadores del taller que formaron parte de este proyecto. También le agradezco a los que me proporcionaron el compresor para realizar las pruebas.

A Paulo y a Javier Naranjo, por ayudarme en la realización de este proyecto, por sus consejos y sobre todo por su amistad.

A mis compañeros y amigos: Héctor, Germán, Angélica, Oscar Cuevas, Paúl, Guillermo, Eugenio, Jorge Ortega, Gengis, Mauricio, Pepe, Igmar, Oscar P., Javier I., y a todos los alumnos que integran el laboratorio; gracias por los buenos ratos de diversión y por enseñarme que la estancia en un laboratorio no tiene nada de aburrido.

A Daniela, Lilia y Leo, por permitirme crecer a su lado en el aspecto profesional, pero sobre todo por su amistad y cariño. GRACIAS

A mis amigos y compañeros de estudio: Abraham, Paco, Jorge A., Javier M., etc. Gracias por compartir el lado bueno y alegre de la ingeniería.

A mis amigos del propedéutico, gracias por ser mis primeros compañeros en este largo andar en ingeniería.

A Marco, Alejandro, Lalo y Jaime por su amistad.

A mis compañeros de la carrera de ingeniería industrial por agregarme en su círculo de amigos.

A mis sinodales, por aceptar ser partícipes en esta obra.

En fin quisiera agradecerle a tanta gente (que simplemente no tendría espacio en esta hoja), que me ha dado la oportunidad de ser parte de su vida. Simplemente les puedo decir GRACIAS.

Por último, quiero agradecerle a DIOS por permitirme llegar hasta estas instancias de mi vida al lado de los seres que quiero.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	4
1.1 Micromáquinas y microfábricas	4
1.2 Caminos hacia las microtecnologías	5
1.2.1 MEMS	6
1.2.2 MET	7
1.2.3 Otras tecnologías	9
1.3 Actuadores	10
1.3.1 Microactuadores en el Mundo	11
1.3.2 Microactuadores en México	17
CAPÍTULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2.1 Posibles soluciones	20
2.2 Objetivo	22
2.3 Alcances	23
CAPÍTULO 3 PRINCIPIO DE OPERACIÓN	24
3.1 Concepto de motor	24
3.2 Máquinas hidráulicas	24

	Página
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA	31
4.1 Motores hidráulicos	31
4.1.1 Motor de dos engranes	35
4.1.2 Motor de cuatro engranes	36
4.1.3 Motor de cuatro engranes de diferentes diámetros	37
4.2 Banco de pruebas	38
4.3 Condiciones de operación	41
4.4 Análisis adimensional	45
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
5.1 Motor de dos engranes	50
5.2 Motor de cuatro engranes	51
5.3 Motor de cuatro engranes de diferentes diámetros	53
5.4 Motores a escala	56
5.4.1 Motor de dos engranes	56
5.4.2 Motor de cuatro engranes	57
5.5 Otros motores	58
CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1. Diseño conceptual de una microfábrica	5
Figura 2. MEMS: Desarrollo por capas	6
Figura 3. Tecnología MET: Proceso generacional	8
Figura 4. Micropiezas (CCADET)	8
Figura 5. Microfábricas	9
Figura 6. Microcentro de maquinado (CCADET)	9
Figura 7. Micro Venus: manufacturada con rayos láser	10
Figura 8. Micro hemisferio maquinado con ECM	11
Figura 9. Micromotor electrostático	12
Figura 10. Microbomba	13
Figura 11. Microactuador térmico	14
Figura 12. Actuadores de materiales con memoria de forma	15
Figura 13. Microactuador electromagnético	16
Figura 14. Actuador magnetorestrictivo	16
Figura 15. Husillo principal de un microtorno	17
Figura 16. Micro brazo	18
Figura 17. Actuadores MPAP (LMM – CCADET)	19
Figura 18. Microactuador electromagnético (LMM – CCADET)	21
Figura 19. Microactuador neumático (LMM – CCADET)	22
Figura 20. Comportamiento de las máquinas hidráulicas	26
Tabla N° 1. Máquinas volumétricas	27
Figura 21. Principio de funcionamiento	32
Figura 22. Piezas del motor	32
Figura 23. Fuerzas radiales	33
Figura 24. Partes del engrane	34
Figura 25. Engranés	34
Figura 26. Motor de dos engranes	35
Figura 27. Motor de cuatro engranes	36

	Página
Figura 28. Trayectos del caudal	37
Figura 29. Motor de cuatro engranes de diferente diámetro exterior	38
Figura 30. Banco de pruebas	39
Figura 31. Características de funcionamiento del banco de pruebas	41
Tabla N° 2. Condiciones de operación	41
Figura 32. Freno de Navier	42
Figura 33. Arreglo para medición de velocidad	43
Figura 34. Tren de pulsos generado por la rotación del <i>encoder</i>	44
Figura 35. Freno y <i>encoder</i>	44
Figura 36. Relación de tamaños	45
Figura 37. Curvas: Par vs Velocidad de rotación	50
Figura 38. Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación	51
Figura 39. Curvas: Par vs Velocidad de rotación	52
Figura 40. Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación	52
Figura 41. Curvas: Par vs Velocidad de rotación	54
Figura 42. Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación	54
Figura 43. Manguera rota	55
Figura 44. Curvas: Par vs Velocidad de rotación	56
Figura 45. Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación	57
Figura 46. Curvas: Par vs Velocidad de rotación	57
Figura 47. Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación	58
Figura 48. Curvas de torque dinámico del motor PLM con pulsos de alimentación de 10 V	59
Figura 49. Curvas de torque dinámico del motor EK con pulsos de alimentación de 7 V	59
Figura 50. Curva: Par vs Presión de entrada	60
Figura 51. Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación	60
Tabla N° 3. Características del motor neumático	61
Figura 52. Banco de pruebas (Diseño conceptual)	63
Figura 53. Funcionamiento (Diseño conceptual)	64

INTRODUCCIÓN

La primera vez que se habló de las posibilidades de la miniaturización como un hecho real y “tangible” fue el 29 de diciembre de 1959, en una conferencia titulada *There is plenty of room at the bottom* (Existe mucho espacio allí abajo) del físico estadounidense Richard Feynman ante la American Physical Society. En aquella conferencia, Feynman trató sobre los beneficios que supondría para la sociedad que fuéramos capaces de manipular la materia y fabricar artefactos con una precisión de unos pocos átomos [1].

Desde el comienzo de nuestra historia el ser humano siempre ha fantaseado y soñado con cosas y sucesos que muchas veces son consideradas como locuras o simplemente como sueños irrealizables; existe gran variedad de ejemplos representativos de este fenómeno tanto en la ciencia como en las bellas artes. Recordemos las historias de Julio Verne, en donde el viaje a la luna simplemente era una locura, o no podemos dejar de mencionar a Isaac Asimov y su cuento titulado *Fantastic Voyage* (Viaje alucinante), en donde se trata el tema de la miniaturización. Estos dos hombres son solo un ejemplo del área literaria mejor conocida como ciencia-ficción.

Pero, también podemos mencionar a los que tuvieron esos sueños extraños y retorcidos, y buscaron la manera de hacerlos realidad, como los hermanos Wright, el gran Leonardo Da Vinci, y una lista interminable de gente dedicada a la ciencia y la tecnología.

Como parte de esta gente de ciencia, encontramos a un equipo de trabajo dirigido por el Dr. Ernst Kussul, concentrado en el laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM, en donde las líneas de investigación y la meta de esos sueños “bizarros” es poder tener varias máquinas del tamaño de una caja de zapatos, realizando tareas tan comunes como trasladar un objeto de un lugar a otro o realizando procesos de manufactura; todo esto sobre la mesa de un laboratorio y controladas por medio de computadoras.

El Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica tiene su antecedente en el Departamento de Diseño Mecánico, establecido en 1987 que tuvo, entre otras funciones, el desarrollo de prototipos para la investigación científica, sobre todo en lo que se refiere a la parte mecánica de los mismos, procurando realizar un trabajo multidisciplinario con otras áreas del Centro como son los Laboratorios de Metrología y de Electrónica, entre otros. Al convertirse el Centro de Instrumentos en un Centro de Investigación, cambió el enfoque del Laboratorio hacia el desarrollo de tecnología de punta [2].

La presente tesis, como parte de este ambicioso proyecto, presenta tres prototipos de actuadores hidráulicos para micromáquinas-herramienta.

Pero antes de presentar los motores, en el primer capítulo se mencionarán las tendencias o maneras que existen en el mundo para fabricar y desarrollar micropiezas y micromecanismos como motores, válvulas, sensores, etc. Otro aspecto que veremos en este capítulo son los diferentes microactuadores que existen actualmente, sus características y las tendencias que estos siguen para su desarrollo.

Después de la introducción y con el propósito de entender que se busca con esta tesis, en el segundo capítulo se revisarán el objetivo, los requerimientos y los alcances del proyecto.

En el tercer capítulo se menciona la teoría de motores hidráulicos a escala “normal”; en esta sección veremos las diferentes máquinas hidráulicas que existen, su clasificación, algunas de sus características, entre otros aspectos. Esta revisión se hace con el fin de entender la forma en como funcionan los motores hidráulicos.

Finalmente, y después de conocer un poco de la teoría que fundamenta esta tesis, en el cuarto capítulo se explicarán las características que tienen los prototipos desarrollados, y se mostrarán las pruebas a las que fueron sometidos para su caracterización. En este capítulo, también se desarrolla el análisis matemático adimensional para el escalamiento al que serán sometidos los prototipos, para realizar la siguiente generación de este tipo de actuadores.

Posteriormente en el quinto capítulo se observan los resultados obtenidos de forma experimental y se dará un breve vistazo a los resultados en la caracterización de otro tipo de actuadores desarrollados en el mismo laboratorio.

Por último, se llegará a lo más importante de una tesis, las conclusiones, para posteriormente dar una serie de sugerencias que se podrían considerar para trabajos futuros.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

Para entender la manera en como se pretende usar estos prototipos, primero debemos comprender qué son los micromecanismos, y sobre todo para qué se utilizan.

Como parte de estos micromecanismos encontramos micromáquinas-herramienta, microfábricas, micromanipuladores, además de micropiezas.

1.1 MICROMÁQUINAS Y MICROFÁBRICAS

Las micromáquinas-herramienta son dispositivos de dimensiones pequeñas capaces de realizar tareas a escala milimétrica. Estas micromáquinas se pueden utilizar en tareas específicas de procesos de manufactura y procesos mecánicos convencionales, como cualquier máquina de manufactura, de tamaño “normal”. Su nombre se debe a su tamaño y a las piezas que pueden generar [3].

A su vez, un conjunto o célula de micromáquinas destinadas a la producción forman una microfábrica (Fig. 1), en otras palabras, una microfábrica es un sistema de producción de tamaño pequeño conveniente para la fabricación de partes y productos de tamaño más pequeño que la misma máquina [3].

Dentro de la célula de manufactura encontramos dispositivos que permiten la manipulación de micro-componentes, los cuales reciben el nombre de micromanipuladores [4].

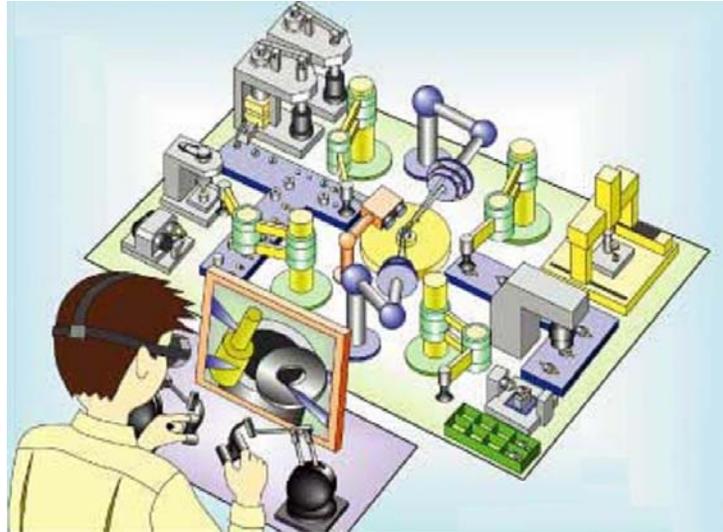


Fig. 1 Dibujo conceptual de una microfábrica [5]

Las micromáquinas-herramienta y las microfábricas han empezado a tomar gran importancia en la producción de piezas, en especial en las llamadas micropiezas. Las micropiezas, como su nombre lo indica son piezas de dimensiones diminutas, estas piezas pueden ser utilizadas en sistemas que se emplean en la vida cotidiana, como por ejemplo en computadoras, así como en sistemas más complejos como en aparatos quirúrgicos.

Las micromáquinas aventajan a las máquinas convencionales en la producción de piezas pequeñas, en el sentido de que pueden producir estas piezas con mejor acabado y mejor precisión o exactitud, además de que el costo de producción es más económico; un ejemplo claro de esto son los tornillos utilizados en los anteojos [6,7].

Cabe remarcar que esta aplicación es sólo una opción de las tantas áreas en las que son utilizadas las micromáquinas. Por lo que la inversión en el desarrollo de estos mecanismos esta más que justificada.

1.2 CAMINOS HACIA LAS MICROTECNOLOGÍAS

Las microtecnologías significan la miniaturización continua e integral de todas las áreas tecnológicas tales como electrónica, mecánica, óptica, fluídica, biológica, química, de superficies, de materiales y de procesos de fabricación.

Hoy en día existen varios caminos para la creación de microtecnologías y la producción de micromecanismos, en este capítulo se hará mención a varios procesos.

1.2.1 MEMS

Uno de estos caminos es el uso de **sistemas microelectromecánicos** (MEMS por sus siglas en inglés). Los MEMS son sistemas que están formados por componentes electrónicos y mecánicos en un sustrato común de silicio, los cuales son fabricados mediante procesos desarrollados para realizar circuitos integrados. Se puede trabajar con varias capas estibadas unas sobre otras, lo que permite desarrollar sistema complejos (Fig. 2).

Este método tiene como ventaja la gran precisión de sus acabados dimensionales y superficiales, por lo que pueden crear piezas extremadamente diminutas (del orden de micrómetros).

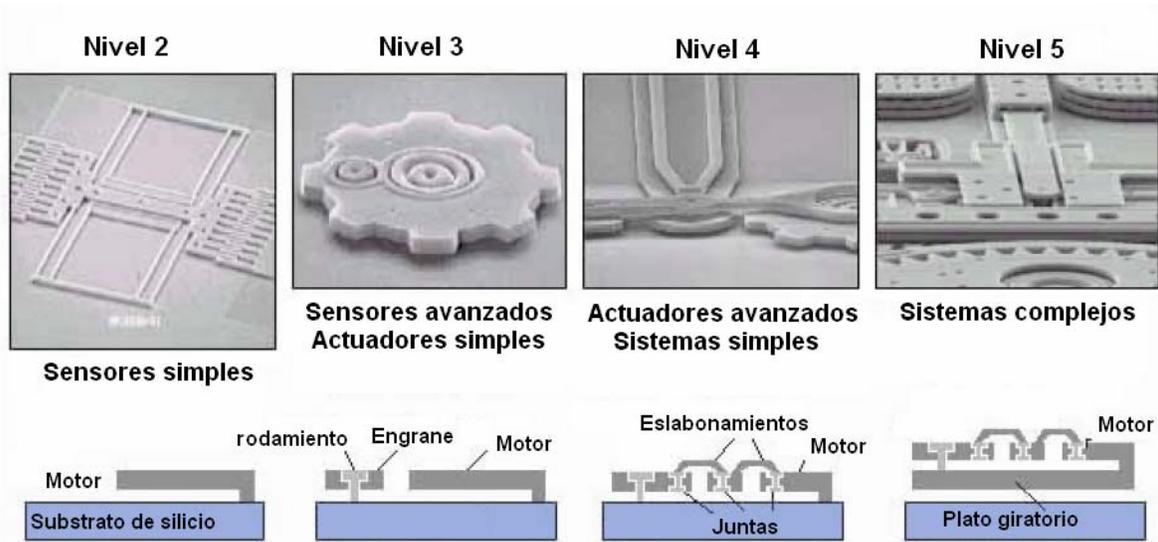


Fig. 2 MEMS: Desarrollo por capas [8]

El desarrollo de esta área se encuentra en un estado muy avanzado y su campo de aplicación es bastante amplio. Es posible encontrar microsistemas tipo MEMS en aplicaciones tales como la medicina, electrónica, comunicaciones, óptica, biotecnología, en la industria automotriz, etc. [9,10]

Varios ejemplos de estos productos son los sensores de presión o acelerómetros basados en silicio, las cabezas inyectoras de tinta, los catéteres e instrumental quirúrgico, los conectores de fibra óptica, los micromoldes para inyección, los instrumentos científicos, los equipos utilizados en biotecnología o las lentes necesarias en aplicaciones de láser, etc. [8,10]

Por lo que se pensaría que esta solución es la mejor opción para miniaturización, pero desafortunadamente, este método de producción solo puede ser utilizado en materiales compatibles con las tecnologías de silicio, materiales piezoeléctricos y pequeñas aleaciones. Además, estos microsistemas son considerados bidimensionales debido a su bajo espesor, lo cual limita su utilidad y funcionalidad, y su fabricación puede llegar a ser muy complicada.

La producción de MEMS ha encontrado gran eco y es desarrollado en diversas partes del mundo, pero tiene diferentes acrónimos o sinónimos, dependiendo del país en donde se desarrolle; en Europa se conoce como **Tecnología de Microsistemas** (MST por sus siglas en inglés) y en Japón tiene el nombre de **Tecnología de Micromáquinas** (MMT por sus siglas en inglés). Algunas veces se han clasificado como procesos diferentes, pero en general se basan en los mismos principios de producción y desarrollo [11,12].

1.2.2 MET

Una tecnología alternativa para el desarrollo de micromáquinas y micromecanismos, es el método conocido como **Tecnología de Microequipo** (MET, por sus siglas en inglés), el cual consiste en crear micromáquinas de manufactura “convencional” de forma generacional; es decir, se desarrolla una micromáquina que posteriormente se utilizará para crear otras generaciones subsecuentes de menor tamaño [12]. En la figura 3 se puede apreciar claramente este proceso.

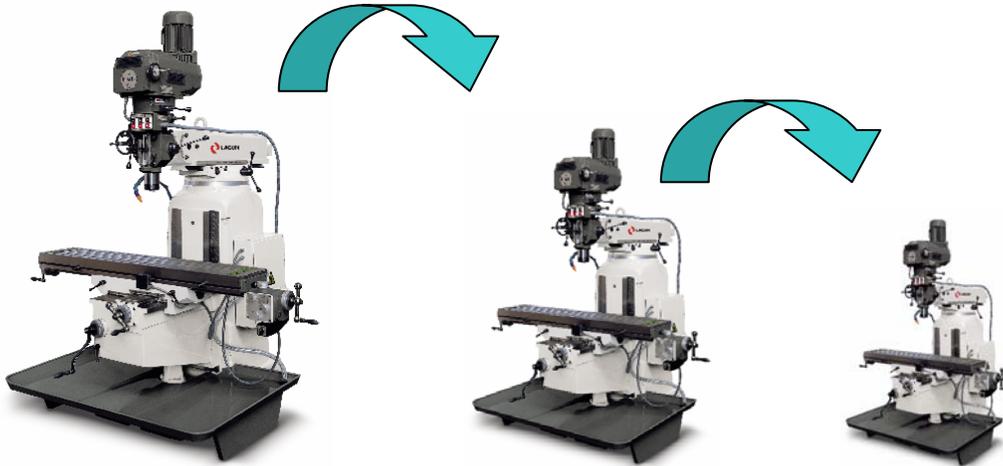


Fig. 3 Tecnología MET: Proceso generacional

Con la MET se pueden producir piezas y mecanismos diminutos tridimensionales en diferentes materiales (Fig. 4).



Fig. 4 Micropiezas (LMM – CCADET)

Otra ventaja de este método es que se aprovecha la tecnología ya existente; por ejemplo, para realizar la primera generación de estas micromáquinas se proponen máquinas de tamaño “normal”, además estos mecanismos se hacen con base en la teoría de la mecánica convencional, lo que permite reducir el tiempo y los costos de desarrollo e investigación.

Este tipo de tecnología es utilizada y desarrollada en Ucrania, Japón, Alemania, entre otros países. De hecho en varios de estos países se ha invertido mucho tiempo y dinero en esta tecnología; tanto universidades como empresas privadas han desarrollado diversas microfabricas, como las que se muestran en la figura 5, a la izquierda se observa una micromáquina desarrollada en Japón y a la derecha una micromáquina alemana.

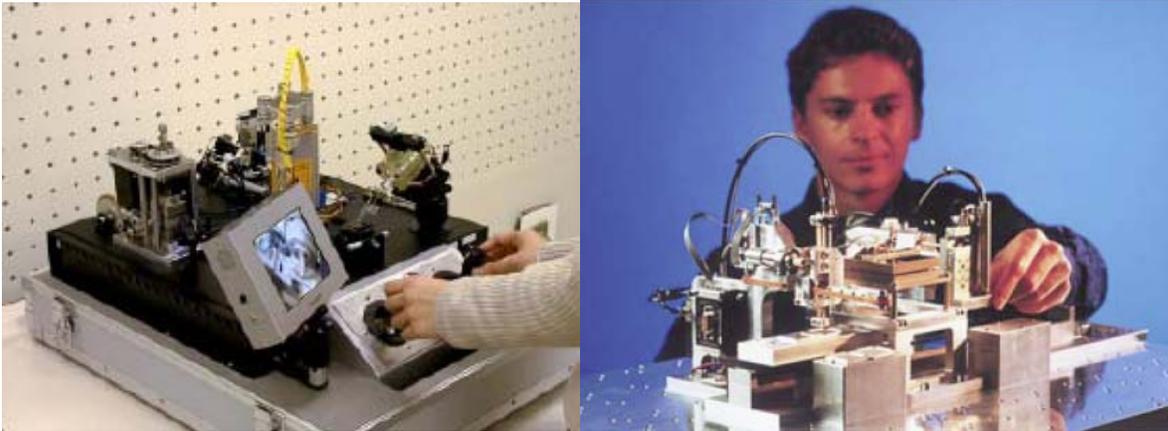


Fig. 5 Microfábricas [13]

Actualmente, un grupo de colaboradores en el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica (LMM) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), utiliza esta metodología para la creación de micromáquinas y microfábricas 100% mexicanas (Fig. 6), capaces de competir contra máquinas de fabricación extranjera.

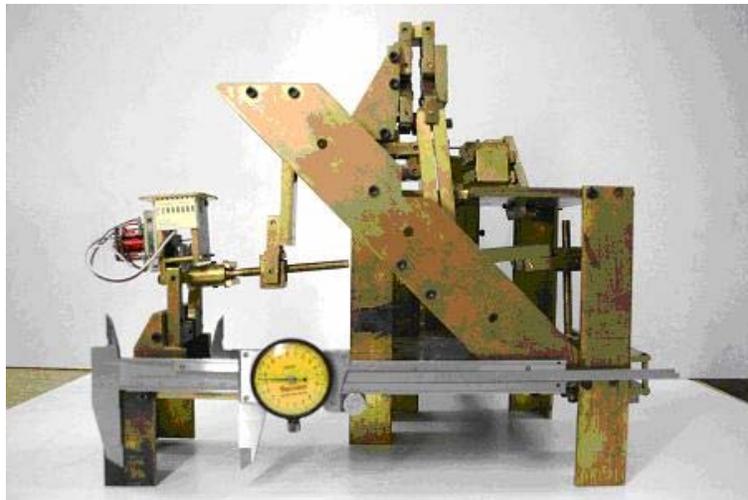


Fig. 6 Microcentro de maquinado (LMM – CCADET) [14]

Existen varias ventajas en la producción de piezas, cuando se disminuye el tamaño de las máquinas-herramientas [12,15], como son:

- reducción de errores por deformaciones térmicas
- reducción de errores por deformaciones elásticas
- reducción de errores por vibraciones
- ahorro de energía y de material
- disminución de fuerzas inerciales

1.2.3 Otras tecnologías

Existen otras tecnologías que se han sumado a la tarea de la “microproducción”. Un ejemplo es la manufactura con rayos láser, la ventaja de este proceso consiste en que se pueden crear objetos diminutos de diversas formas y geometrías complicadas (Fig. 7), debido a que con esta tecnología se pueden realizar procesos de corte, como taladrado y fresado [16].

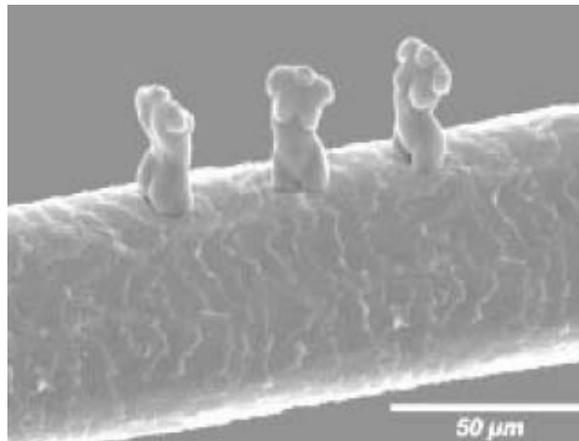


Fig. 7 Micro Venus: manufacturada con rayos láser [17]

Otro método es el micromaquinado electroquímico (ECM por su siglas en inglés), el cual es basado en la reacción electroquímica entre un electrodo y la pieza de trabajo; se utiliza para maquinar aleaciones fuertes como titanio y acero inoxidable [16,18]. En esta técnica el metal es removido por un proceso de disolución anódica cuando un potencial eléctrico es aplicado en una celda electroquímica (Fig. 8).

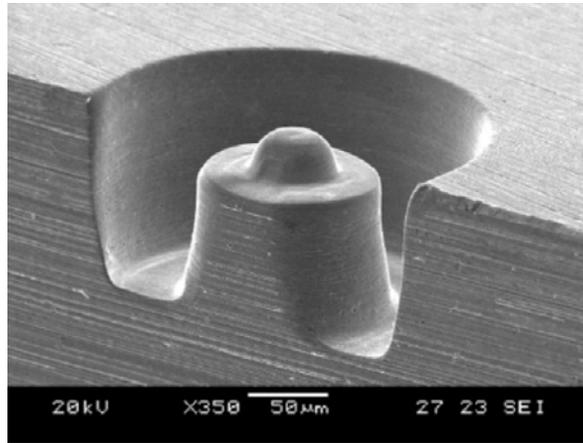


Fig. 8 Micro hemisferio maquinado con ECM

1.3 ACTUADORES

Por la disminución de tamaño de los sistemas y las máquinas, también es necesario desarrollar dispositivos que funcionen como actuadores, es decir, como dispositivos capaces de generar una fuerza o un movimiento controlable a partir de diversas fuentes de energía de cómo hidráulica, neumática, eléctrica, térmica, etc., que les permita funcionar [8,19].

Existe gran variedad de actuadores diminutos; por lo que en esta parte de la tesis sólo se describirán algunos tipos de microactuadores que se han desarrollado en México y en el resto del mundo.

1.3.1 Microactuadores en el mundo

Varios de los actuadores desarrollados en el mundo son de tipo MEMS. En esta área tecnológica se han desarrollado una gran variedad de microactuadores, los cuales funcionan con principios tales como electrostáticos, electromagnéticos, magnetorestrictivos, de expansión térmica, volumétrica, piezoeléctricos y de memoria de forma [8,19].

Actuadores electrostáticos

Las cargas electrostáticas surgen de un exceso o déficit de electrones libres en un material, las cuales ejercen una fuerza atractiva en objetos con cargas opuestas, o un rechazo a cuerpos con carga similar. En este caso, el principio de impulsión fundamental detrás de los actuadores electrostáticos es la atracción de dos platos opuestamente cargados. Su uso es extenso en dispositivos MEMS, ya que son relativamente simples de fabricar.

Estos actuadores, generalmente son utilizados como motores; cuentan con un rotor central de libre movimiento con platos capacitivos a su alrededor (Fig. 9).

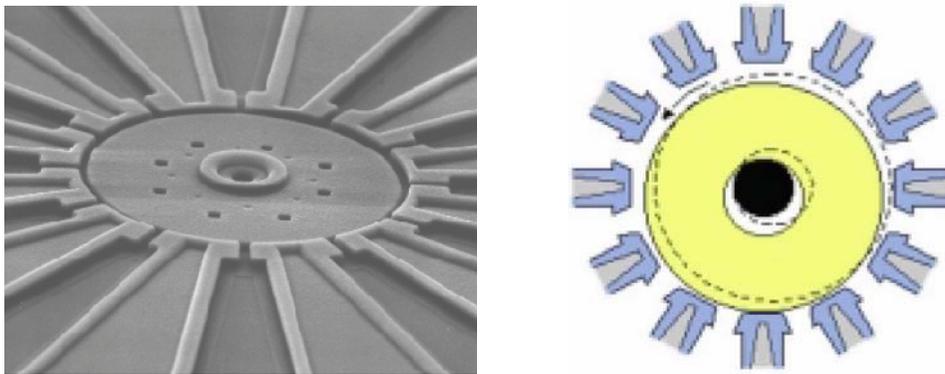


Fig. 9 Micromotor electrostático

Actuadores piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico se produce por los cambios dimensionales que ocurren en ciertos cristales cuando son sujetos a una diferencia de potencial eléctrico. Los materiales piezoeléctricos operan con gran fuerza y velocidad, y retornan a su posición de origen cuando se deja de alimentarlos.

En la impulsión piezoeléctrica, el desplazamiento eléctricamente inducido es proporcional a la diferencia de potencial aplicada. Las desventajas principales de los microactuadores piezoeléctricos son la alta complejidad de fabricación, así como sus pequeños desplazamientos de impulsión; desplazamientos más grandes pueden ser conseguidos usando capas piezoeléctricas múltiples conocidas como bimorfas piezoeléctricas.

En la microescala, estos materiales han sido utilizados como microbombas (Fig. 10).

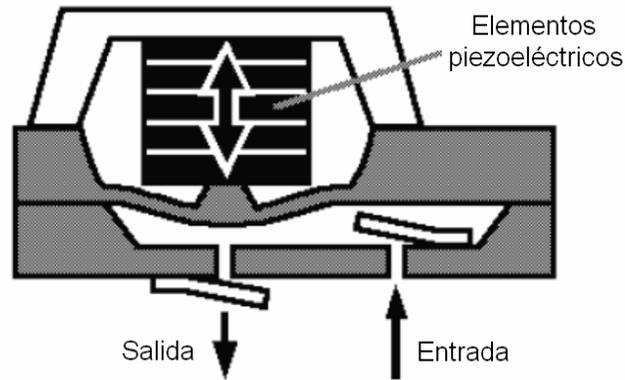


Fig. 10 Microbomba

Actuadores térmicos

Los sistemas termomecánicos utilizan la expansión o contracción que ocurre en los materiales a medida que se les aplican cambios de temperatura.

Ejemplos típicos incluyen termostatos bimetalicos, comúnmente utilizados en el hogar para la regulación de temperatura. Estos dispositivos utilizan la diferencia en el coeficiente de dilatación de dos materiales distintos que se encuentran unidos entre sí para producir un desplazamiento por curvatura.

Los cambios térmicos son el resultado de la conducción de energía calorífica dentro de un material, y pueden ocurrir dentro de un amplio rango de velocidades. Los actuadores de este tipo requieren la remoción de energía térmica para reestablecer las condiciones iniciales. Puesto que la disipación de calor está directamente referida al volumen a ser enfriado, el ciclo térmico ocurre mucho más rápido en microdispositivos que en los dispositivos de tamaño "normal".

Se ha demostrado la utilidad y velocidad de los cambios dimensionales en microdispositivos (Fig. 11).

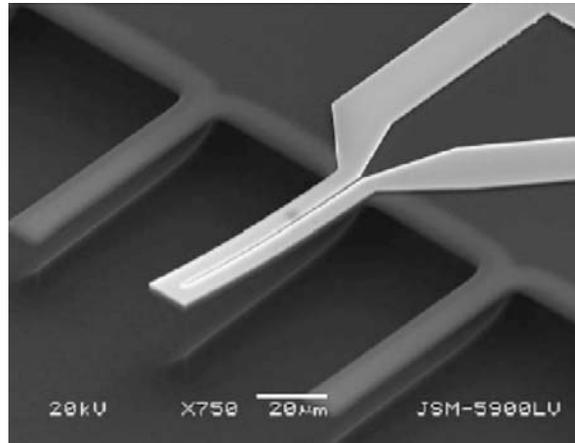


Fig. 11 Microactuador térmico [20]

La impulsión térmica en MEMS es, por lo general, un resultado directo de incorporar calentadores diminutos, o resistencias. Estas resistencias pueden ser controladas para calentar áreas específicas o capas, como en caso de un actuador bicapa.

Con estos dispositivos se pueden conseguir fuerzas grandes, pero el consumo de energía puede ser alto y esto provoca que el material tarde en enfriarse y regrese a su estado original.

Actuadores de materiales con memoria de forma (SMA)

Los materiales de memoria de forma son materiales que, tras sufrir una deformación, son capaces de recuperar su forma original por absorción de energía eléctrica o térmica.

Las aleaciones de memoria de forma exponen cambios considerables de su longitud cuando son calentados. Este tipo de actuadores incluyen a los conectores de tubo tipo *shrink to fit* (encoger para ajustar) utilizados en motores jet de alto rendimiento, naves espaciales, mecanismos de liberación, robots miniatura y una gran variedad de sistemas de señalización en instrumental.

Son aplicados en robótica, en el desarrollo de músculos artificiales, incorporación en tejidos, acoplamiento hidráulicos, etc. Dispositivos de microescala incluyen mecanismos de conexión para fibra óptica, microválvulas utilizando delgadas capas de NiTi aplicadas sobre silicio (Fig. 12).

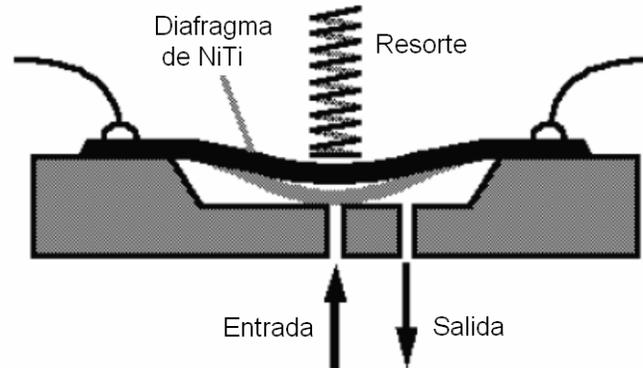


Fig. 12 Actuadores de materiales con memoria de forma

Actuadores magnéticos

El fenómeno del electromagnetismo surge de una corriente eléctrica moviéndose a través de un material conductor. Se generan fuerzas atractivas o repulsivas en la región adyacente al conductor y resultan proporcionales al flujo de corriente.

Los campos electromagnéticos aparecen y desaparecen rápidamente, lo cual permite que los dispositivos posean una velocidad de accionamiento muy alta. Dado que estos campos existen en un amplio rango de temperaturas, el rendimiento se encuentra limitado en primera instancia por las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del actuador.

A pesar del éxito de la impulsión magnética a macroescala, como motores o solenoides, en los dispositivos magnéticos a microescala todavía son relativamente inestables. Esto es debido a la dificultad que implica fabricar los embobinados. Por otra parte, la mayoría de los dispositivos electromagnéticos requieren que el elemento conductor y el móvil se encuentren perpendiculares entre sí, lo cual presenta una dificultad para las técnicas comúnmente utilizadas en la fabricación de dispositivos de silicio (Fig. 13).

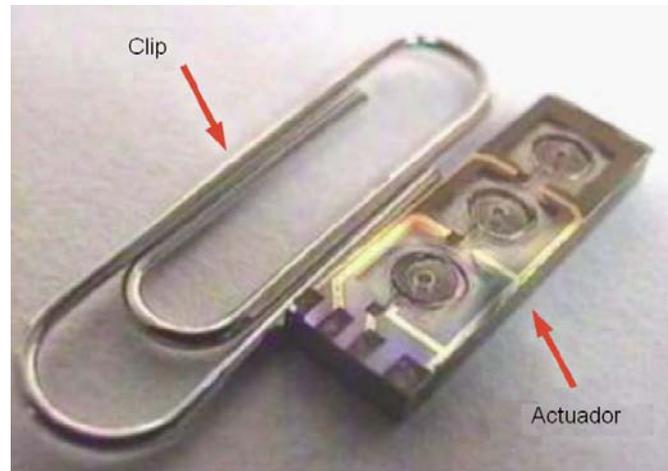


Fig. 13 Microactuador electromagnético [20 21]

Actuadores Magnetostrictivos

Estos actuadores utilizan el efecto magnetostrictivo, que es el cambio de forma o de tamaño de un material ferromagnético inducido por un campo magnético. Por ejemplo, la contracción de una barra de níquel bajo un campo magnético longitudinal (Fig. 14).

Los materiales magnetostrictivos poseen un pequeño cambio de forma cuando son sujetos a campos magnéticos.

Este tipo de materiales incluye combinaciones de elementos de tierras raras con hierro tal como TbFe (Terfenol) y TdDyFe (Terfenol-D). Son siempre activados por campos magnéticos externos tales como una bobina alrededor del núcleo.

Su respuesta es muy rápida y siguen la presencia o ausencia del campo magnético. Su rendimiento decae con el aumento de temperatura.

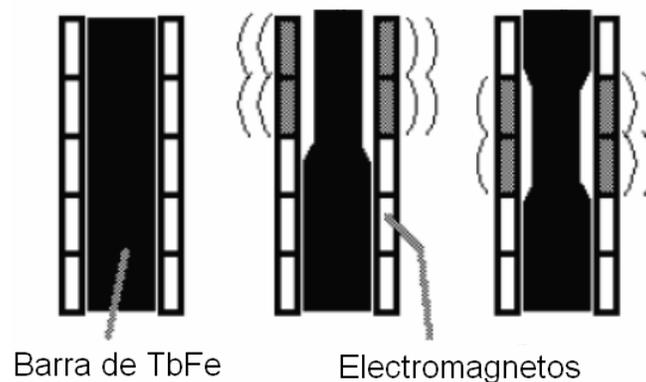


Fig. 14 Actuador Magnetostrictivo

Actuadores “convencionales” miniaturizados

Alrededor del mundo también existen microactuadores que fueron fabricados por métodos convencionales de manufactura; generalmente funcionan bajo principios eléctricos (electrónicos), como por ejemplo los servomotores o los motores de pasos.

Los servomotores son de accionamiento hidráulico, neumático o eléctrico. Los servomotores eléctricos, a su vez, pueden ser de corriente continua y de corriente alterna. El motor de corriente continua más extendido en regulación es el de excitación independiente y el motor de corriente alterna de uso más frecuente es el bifásico de inducción. [22].

Un motor de pasos es un actuador eléctrico que convierte señales eléctricas en movimiento mecánico [23], es decir, convierte una entrada eléctrica en una función mecánica. El eje de un motor de pasos gira en un determinado ángulo de forma incremental cuando se le aplican pulsos eléctricos, logrando realizar desplazamientos angulares muy precisos.

Algunos actuadores son implementados en micromáquinas y/o microfábricas. Como se puede apreciar en figura 15, el husillo principal de un microtorno esta formado por un servomotor AC de 30 W con un codificador (encoder) rotatorio de 2048- pulsos/rev, cojinetes de contacto angulares. El husillo es directamente conducido por el motor, y tiene una velocidad máxima de 3000 rpm [24].

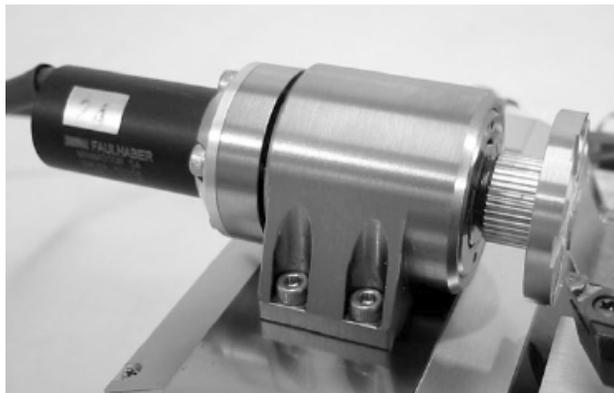


Fig. 15 Husillo principal de un microtorno

Otro ejemplo de este tipo de motores implementados en micromáquinas, lo podemos observar en el micro brazo (Fig. 16) desarrollado en Japón. Esta máquina utiliza 3 servomotores, los cuales se encuentran en la base del brazo. Los servos son DC de 1.7 W con un codificador (encoder) óptico con resolución de 0.0023° , potencia de 0.29 Nm y velocidad de rotación de 5.8 rad/seg. [25].



Fig. 16 Micro brazo

1.3.2 Microactuadores en México

Un antecedente en el desarrollo de microactuadores en México lo encontramos en el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica del CCADET-UNAM.

Estos actuadores son producidos y desarrollados bajo técnicas de fabricación convencionales. Las primeras generaciones de actuadores funcionan bajo principios electromagnéticos.

Actuadores MPAP

Los motores de pasos de imán permanente bipolares (Fig. 17) son los que se usan en los prototipos de micromáquinas herramienta. Como se mencionó anteriormente estos motores tienen la característica de girar un determinado ángulo de forma incremental, es decir, transforma pulsos eléctricos en movimientos de giro controlados. Esencialmente, están constituidos por una parte fija construida a base de cavidades en las que van

depositadas las bobinas (estator) y por una parte móvil construida mediante un imán permanente (rotor). Para que este tipo de actuador funcione, la corriente que circula por las bobinas debe cambiar de sentido en función del voltaje que se le aplique, por lo que en un mismo embobinado puede tener en uno de sus extremos distinta polaridad (bipolar). De este motor salen cuatro hilos que se conectan al circuito de control que genera la secuencia de trenes adecuada para que el actuador comience a girar.

La característica que tienen para quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres, los hace ideal para controlar movimiento, velocidad y posición. Esto lo logran cuando una o más de sus bobinas están energizadas, así pues, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario, quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

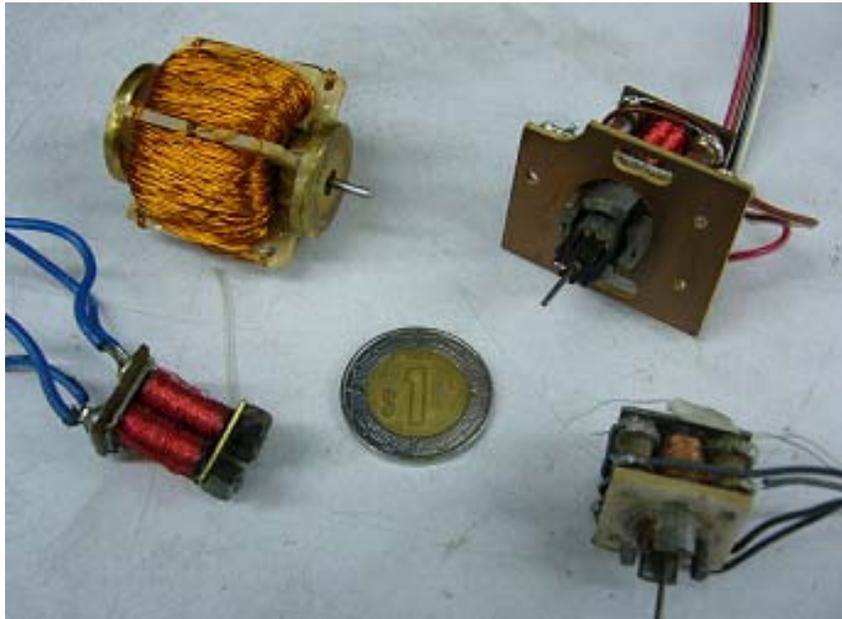


Fig. 17 Actuadores MPAP (LMM – CCADET)

En este tipo de motor (de imán permanente: unipolares y bipolares) el rotor es de imán permanente de forma cilíndrica. Tiene la ventaja de alcanzar un par relativamente alto, y su costo es muy bajo, siendo este ideal en sistemas de varios motores en equipos de producción en serie; por el contrario, tiene la desventaja de trabajar sólo a bajas velocidades [26].

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DEL

PROBLEMA

Las micromáquinas herramienta desarrolladas en el laboratorio cuentan con motores de pasos de tamaño reducido tipo eléctrico que son ideales cuando se requiere un control de movimiento preciso. Pero este tipo de motores están limitados en los procesos de corte, debido a que al disminuir sus dimensiones baja su eficiencia y su potencia; por lo que solo pueden ser utilizados en materiales relativamente blandos, como el latón.

Además, durante la operación de algunos actuadores se registró un incremento considerable en la temperatura a partir de los 23 V, alcanzando los 46.2 °C a los 25 V de operación. Esto no es recomendable para la operación del sistema, por lo cual se ha decidido operar a los actuadores por debajo de 23 V, y en caso de ser necesario adaptar un disipador con ventilador u operarlo por debajo de los 45 °C.

También suelen presentar variaciones de par, lo cual trae como consecuencia pasos no uniformes. Además, algunos detalles como la falta de equidistancia entre el rotor y los estatores, provocan que el desempeño del actuador sea impreciso [26].

2.1 POSIBLES SOLUCIONES

Por la necesidad de trabajar con una gran variedad de materiales, tanto blandos como duros, es necesario desarrollar actuadores que sean favorecidos por las leyes de la miniaturización y no se vean afectados en su desempeño.

Actualmente se está buscando desarrollar actuadores de alta potencia. Para esto se tiene en mente explorar 3 diferentes principios de funcionamiento para la creación de los nuevos actuadores.

Los primeros de estos actuadores también están basados en principios electromagnéticos. Pero la diferencia con los actuadores anteriores es que el motor consiste en un arreglo tipo *sandwich*, en el que el rotor se encuentra entre un estator compuesto por dos segmentos (Fig. 18).

La principal ventaja de este arreglo está en que los polos magnéticos de los imanes del rotor pasan entre dos núcleos electromagnéticos opuestos, lo que da lugar a una disipación del campo magnético relativamente pequeña respecto al área de los imanes, permitiendo así obtener un mayor desempeño de par y, como consecuencia, una potencia más elevada, es decir, mayor par por unidad de volumen del rotor.

En el ensamble de los imanes del rotor no existe una separación entre ellos al darles un maquinado geométrico para formar un anillo de 3 dipolos magnéticos. Esto mejora el desempeño del par, al permitir una menor disipación del campo magnético entre los imanes y los polos del estator [15].

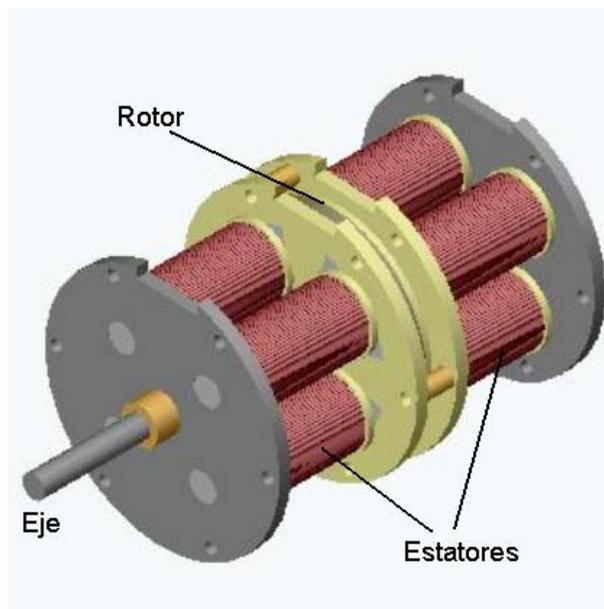


Fig. 18 Microactuador electromagnético (LMM – CCADET)

La segunda propuesta, es la de realizar actuadores bajo principios neumáticos. El micromotor consta de cuatro partes principales los cuales son estator, rotor ranurado, aspas y un eje perforado. La carcasa (estator), tiene una perforación cilíndrica en la cual se aloja un rotor de manera excéntrica. Dicho rotor tiene seis guías que alojan las paletas con las cuales se desplazan radialmente, permitiendo que el aire comprimido suministrado se expanda y así el rotor pueda girar (Fig. 18). Una de las ventajas del presente diseño es que, no se emplean resortes para lograr el contacto continuo de las paletas con la parte interna del estator. Esto se logra suministrando aire presurizado a través de una serie de perforaciones que se encuentran sobre el eje de rotación [27].

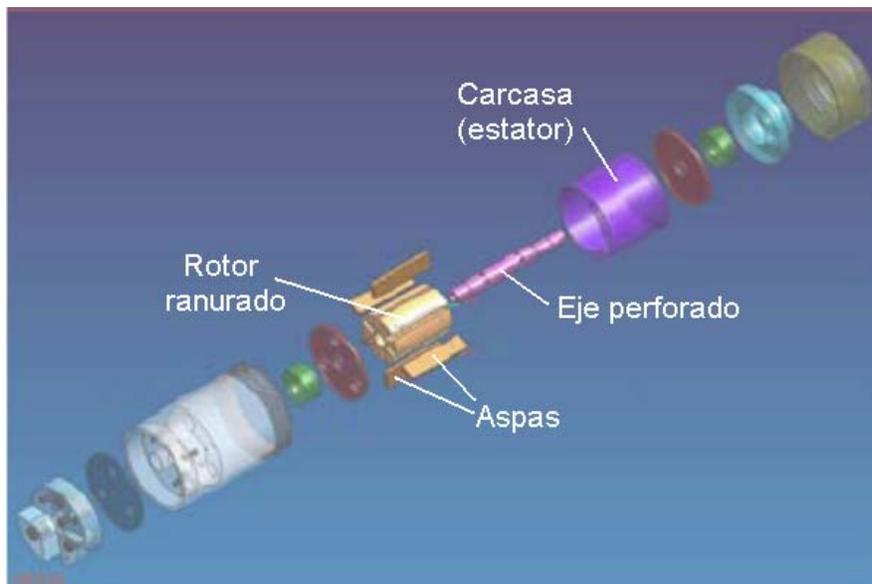


Fig. 19 Microactuador neumático (LMM – CCADET)

La última propuesta consiste en desarrollar microactuadores hidráulicos. Estos actuadores serán descritos y analizados en los siguientes capítulos de la presente tesis.

2.2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar motores hidráulicos que puedan ser implementados en un futuro a microfábricas o micromáquinas-herramienta.

2.3 ALCANCES

- Diseño y fabricación de tres diferentes prototipos de actuadores que funcionen bajo principios hidráulicos.
- Puesta en operación y caracterización de los mismos.
- Dar a conocer las conclusiones a las que se han llegado, con base en los resultados obtenidos.
- Aportar sugerencias y recomendaciones para trabajos que se realicen a futuro.

CAPÍTULO 3

PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Los actuadores que se desarrollaron para este proyecto son clasificados como motores hidráulicos de desplazamiento positivo. Pero... y eso ¿qué significa? Posiblemente alguien que lea esta tesis y no este familiarizado con este tema, se estará preguntando que representa el enunciado anterior.

Para entender de una manera más clara estos prototipos y su funcionamiento en este capítulo se revisarán estos conceptos.

3.1 CONCEPTO DE MOTOR

Un motor es un sistema que transforma una determinada clase de energía (hidráulica, química, eléctrica, etc.) en energía mecánica. Es decir, es una máquina destinada a producir movimiento a expensas de otra fuente de energía [28].

Las primeras máquinas usadas fueron las ruedas hidráulicas, estas aparecen en Alejandría y Egipto en los principios de la era cristiana [29]. Utilizaban como fuerza motriz la energía de una masa de agua que cae desde cierta altura, llamada salto. Esta energía se transforma en trabajo útil disponible en el eje de la máquina.

3.2 MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Las máquinas hidráulicas son dispositivos mecánicos diseñados para conseguir un intercambio energético entre un fluido y un eje de rotación.

Las máquinas hidráulicas pueden clasificarse de acuerdo a:

- El sentido de transferencia de energía:
 - o Generadoras (bombas, ventiladores, compresores).
 - o Receptoras (turbinas, motores)

- El principio de funcionamiento:
 - o Máquinas volumétricas o de desplazamiento positivo:
Estas máquinas forzan al fluido a entrar o salir de una cámara por el cambio de volumen de la cámara.
 - o Máquinas rotodinámicas o turbomáquinas:
En este tipo, el fluido atraviesa de forma continua el impulsor (elemento giratorio) sin verse obstruido en ningún momento; estas máquinas modifican la cantidad de movimiento del fluido.

Existen varias diferencias entre las máquinas volumétricas y las máquinas rotodinámicas. En las máquinas volumétricas el órgano intercambiador de energía cede energía al fluido o el fluido a él en forma de presión. Son insensibles a las variaciones de viscosidad del fluido, pueden trabajar a presiones altas y su margen de caudal es muy estrecho.

Mientras tanto, en las máquinas rotodinámicas el órgano intercambiador de energía cede energía al fluido o el fluido a él en forma de energía cinética por que en estas máquinas es esencial la variación de energía cinética del fluido. Son muy sensibles a las variaciones de viscosidad, su margen de caudal es amplio y soportan presiones bajas y moderadas.

Estas características se pueden apreciar claramente en figura 20.

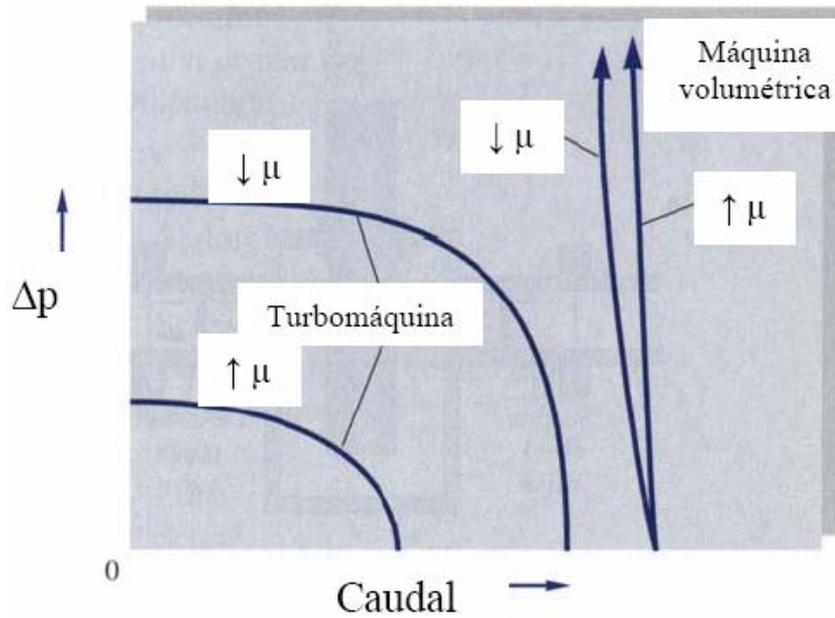
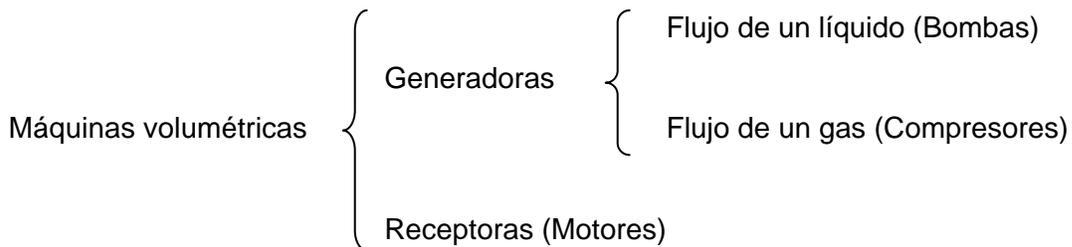


Fig. 20 Comportamiento de las máquinas hidráulicos [30]

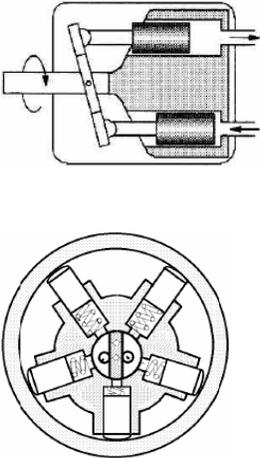
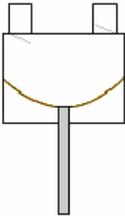
Además, las máquinas volumétricas o de desplazamiento positivo no trabajan con un flujo continuo, como lo hacen las turbomáquinas, sino que suministran o absorben energía de un fluido de forma intermitente. Los diferentes tipos de máquinas volumétricas se muestran en el siguiente cuadro sinóptico.

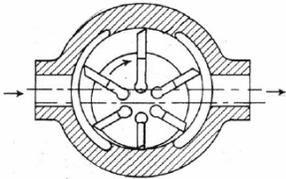
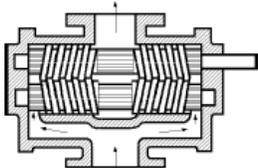


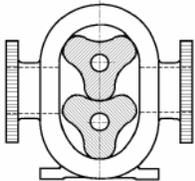
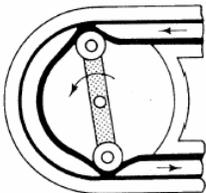
Las máquinas generadoras absorben la energía producida por una fuente motriz, la transforman y la restituyen a un fluido. De forma inversa, las máquinas receptoras recogen la energía del fluido y la transforman en energía mecánica. La apariencia física de ambos tipos de máquinas es muy similar. Incluso, en la mayoría de los casos, el mismo equipo puede realizar una u otra función, dependiendo de su ubicación en el circuito correspondiente. También, pueden ser reversibles.

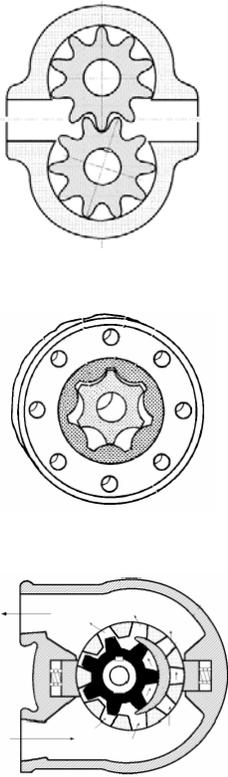
En la tabla N°1 se observa la forma en como pueden ser clasificadas estas máquinas volumétricas, en función del movimiento característico del órgano intercambiador de energía.

Tabla N° 1 Máquinas volumétricas

TIPO DE MÁQUINAS	IMPULSOR	CARACTERÍSTICAS
MÁQUINAS ALTERNATIVAS	<p>Pistones</p> 	<p>En este tipo de máquina el fluido es impulsado por el desplazamiento de émbolos o pistones, los cuales trabajan dentro de cilindros. Los cilindros pueden estar colocados axial o radialmente, y pueden trabajar con desplazamientos constantes o variables; dicha variación se consigue variando la excentricidad o el ángulo de inclinación del eje, según sea el caso.</p>
	<p>Diafragma</p> 	<p>Son máquinas que disponen de válvulas de admisión y escape, por lo que ni son reversibles ni se pueden usar como motor. El flujo se produce mediante la deformación de una membrana.</p> <p>Están concebidas para evitar fugas del fluido y mantenerlo alejado del lubricante.</p> <p>Se usan para gastos elevados de líquidos, ya sea claros o conteniendo sólidos. También son apropiados para pulpas gruesas, drenajes, lodos, soluciones ácidas y alcalinas, así como mezclas de agua con sólidos que puedan ocasionar erosión. Un diafragma</p>

		<p>de material flexible no metálico, puede soportar mejor la acción corrosiva o erosiva que las partes metálicas de algunas bombas reciprocantes.</p>
<p>MÁQUINAS ROTATORIAS</p>	<p>Paletas</p> 	<p>La máquina de paletas esta constituida por una carcasa provista de lumbreras de aspiración e impulsión, dentro de la cual gira un rotor en cuya periferia está dispuesta una serie de elementos móviles, llamados justamente "paletas", que delimitan otras tantas cámaras comprendidas entre ellas y el centro del rotor. En este tipo de máquinas las aspas pueden ser rectas, curvas, tipo rodillo, tipo cangilón, y pueden estar ubicadas en el rotor o en el estator, y funcionan con fuerza hidráulica radial. El rotor va dispuesto en forma excéntrica respecto a la superficie interior del estator que es cilíndrica, debido a lo cual, las paletas, durante la rotación del rotor, realizan movimientos alternativos o de vaivén respecto al rotor.</p>
	<p>De husillo (Tornillo)</p> 	<p>Las máquinas de husillos comprimen un fluido entre los dientes de dos ruedas dentadas. Impulsan caudales bajos y se emplean con fluidos que contienen sólidos en suspensión, abrasivos o sensibles (biológicos). Existen máquinas de tornillo simple y múltiple.</p>

		<p><u>Máquina de tornillo simple.</u> El tornillo desplaza axialmente el líquido a lo largo de una coraza en forma de gusano.</p> <p><u>Máquina de tornillo múltiple.</u> El fluido es transportado axialmente por los tornillos. En vez de un estator, cada tornillo trabaja en contacto con el otro, que puede ser el motriz o el conducido.</p>
	<p>Lobulares</p> 	<p>En estas máquinas el líquido se desplaza atrapado en los lóbulos, desde la entrada hasta la salida. Los lóbulos efectúan además la labor de sellado.</p> <p>Las máquinas lobulares son semejantes a las de engranajes externos, pero con un número de dientes menor y con rangos de funcionamiento menores. Normalmente se utilizan para incrementos de presión bajos donde puede haber problemas de erosión de los dientes de una bomba de engranajes.</p>
	<p>Peristálticas</p> 	<p>En este tipo de máquinas una manguera flexible, de pared lisa, se aloja en la carcasa de la bomba y es presionada en cada vuelta por dos zapatas unidas al rotor. La acción de rotación mueve el producto en el interior de la manguera, con una velocidad de desplazamiento constante, sin deslizamiento. El principio de la máquina peristáltica se basa en el movimiento alternativo de contracción y relajación de la manguera, lo que fuerza el movimiento del fluido de forma similar</p>

		<p>al funcionamiento de nuestra garganta e intestinos.</p> <p>Estas máquinas son una opción ideal para aplicaciones que requieran el manejo de líquidos corrosivos o abrasivos.</p>
<p>REFERENCIAS</p>	<p>Engranés</p> 	<p>En este tipo el líquido es conducido entre los dientes de los engranes, que sirven también como superficies de sello, en la carcasa de la máquina. Las hay de engranes externos, que pueden ser rectos, helicoidales simples o dobles como el tipo espina de pescado (Herringbone); y de engranes internos.</p> <p>Las máquinas de engranes internos tienen un solo rotor que engrana con un externo. Los engranes están diseñados de forma que siempre están en contacto deslizante. Cada diente del engrane interno contacta con el engrane externo en un solo punto durante cada revolución. El engrane interno arrastra al externo, que a su vez tiene un diente más, girando ambos en la misma dirección.</p> <p>También se fabrican máquinas de engranes internos con cuña que permite reducir las fugas, pero implica el uso de un engrane voladizo interno, que restringe la capacidad y presión de la máquina.</p>

[28,31,32,33]

CAPÍTULO 4

“METODOLOGÍA”

Se optó por la configuración de engranes externos, por ser una de las formas más simples de motores hidráulicos; además de tener varias ventajas como son la adaptación a variaciones de viscosidad del fluido de trabajo, puede soportar altas presiones, la facilidad de montaje en cualquier posición, su amplio rango de velocidades de giro y la relativa facilidad de sustitución de componentes. Además, su caudal es casi constante.

4.1 MOTORES HIDRÁULICOS

Como se mencionó en el capítulo anterior, el principio de operación del motor hidráulico se basa en el funcionamiento de una máquina de desplazamiento positivo, es decir, el movimiento de un fluido asociado a la reducción de una cámara.

La manera de funcionamiento de este tipo de motores se puede observar en la figura 21 y es el siguiente: El fluido de trabajo llega al motor por la conexión B; el flujo comienza a llenar los espacios entre los dientes de los engranes a lo largo de la periferia de la carcasa, provocando que los engranes tiendan a girar, cuando toda la cámara es llenada el fluido sale por la conexión A. La transformación de energía hidráulica en mecánica se produce cuando la presión actúa sobre las partes activas de la unidad (en este caso los engranes) y genera una fuerza periférica que equivale a un par aplicado al eje [32].

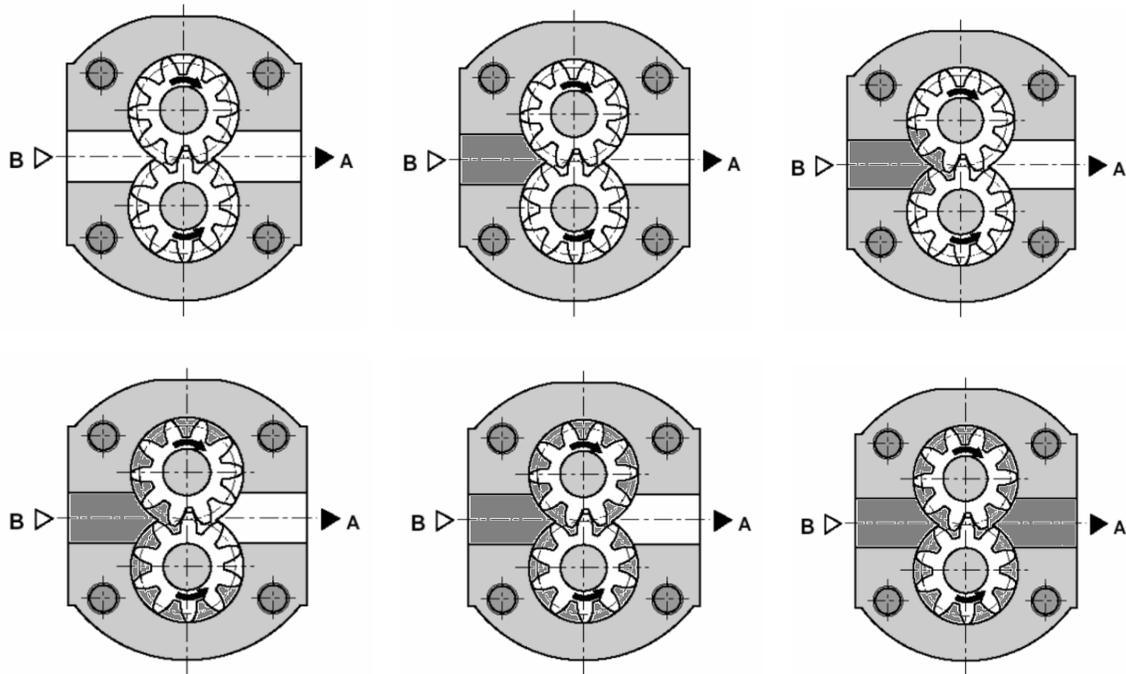


Fig. 21 Principio de funcionamiento

Para este trabajo se propusieron tres diferentes configuraciones, con el propósito de compararlos entre sí y tratando de conseguir el mayor par posible.

Los tres prototipos constan de: Carcasa, tapa, junta, juego de engranes, rodamientos y retenes (Fig. 22).

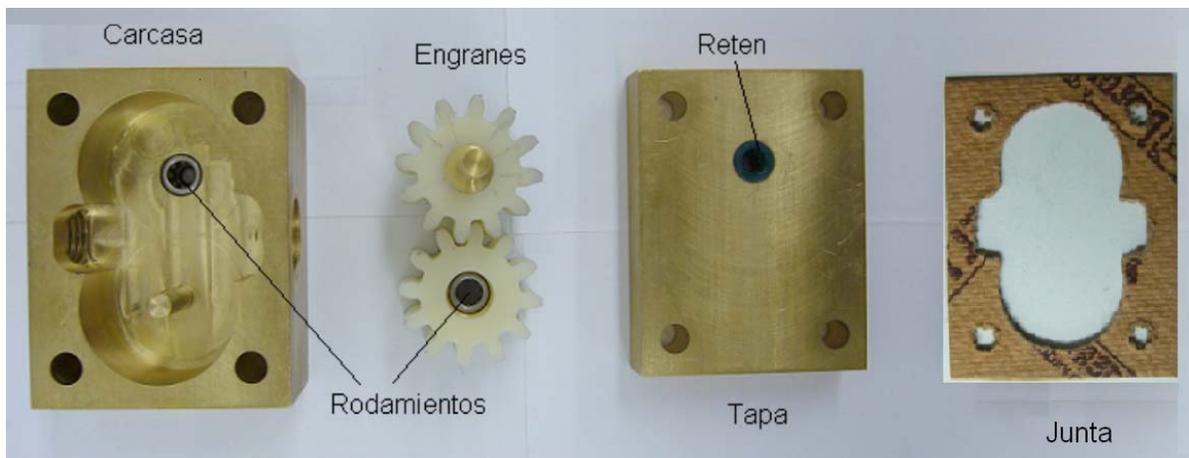


Fig. 22 Piezas del motor

La carcasa y la tapa fueron fabricadas en latón; de manera muy simple se puede decir que la carcasa es el alojamiento de los engranes y es en donde se encuentran los orificios de entrada y salida del fluido de trabajo. Cada tapa cuenta con su alojamiento para el rodamiento y el reten del eje del engrane conductor.

Los rodamientos utilizados son de agujas, debido a las fuerzas radiales que tienen que soportar. Las fuerzas que actúan sobre los engranes y por tanto, sobre los ejes y rodamientos, durante el funcionamiento del motor se originan por la presión que existe en la cámara de salida (Fig. 23). En la práctica la fuerza en el rodamiento puede llegar a ser de 1.5 veces la fuerza aplicada en el engrane [34]. Además, este tipo de rodamientos permite asegurar los juegos radiales indispensables para una buena estanqueidad en la periferia de las ruedas y en sus caras laterales, lo que permite reducir las fugas del fluido [32].

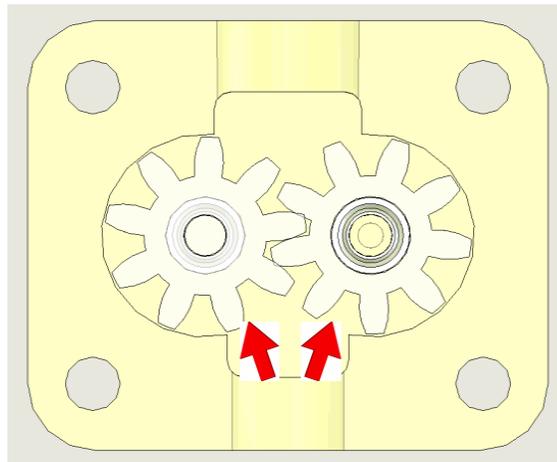


Fig. 23 Fuerzas radiales

Los engranes son conocidos como engranes externos (Fig. 24), fueron manufacturados en *Nylamid* ya que es un material química y mecánicamente resistente, además de ser ligero y fácil de maquinar; las características de los engranes (independientemente del número de dientes) son las siguientes:

- Dientes rectos
- Ángulo de presión de 14.5°
- Paso circular de 7.33 mm (0.2885 plg)
- Addendum de 2.1158 mm (0.0833 plg)
- Dedendum de 2.4485 mm (0.0964 plg)
- Espesor del diente de 3.32 mm (0.1797 plg)

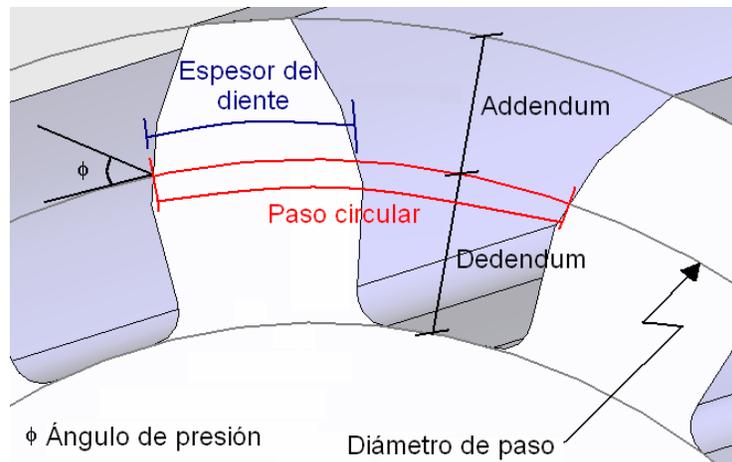


Fig.24 Partes del engrane

En los tres prototipos los engranes conductores cuentan con una flecha (Fig. 25) y los engranes conducidos tienen un barreno pasado en el centro, en donde se aloja su rodamiento correspondiente (Fig. 25), el cual va acoplado a su respectivo eje, que se encuentra en el cuerpo de la carcasa del motor.

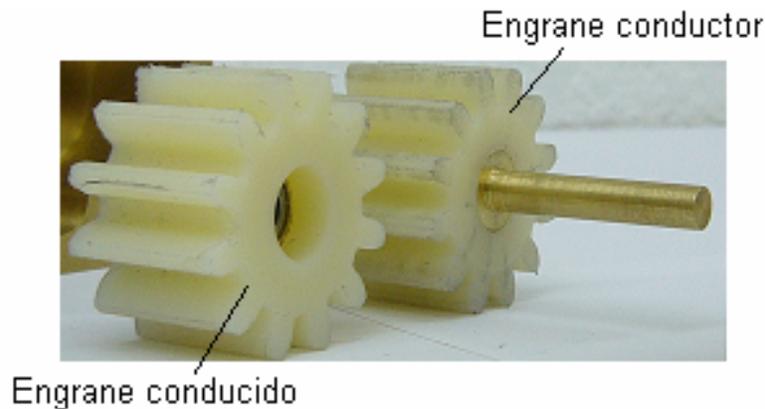


Fig. 25 Engranes

Los motores que se describen en la presente tesis son llamados motores de “Generación CERO”, ya que son los primeros prototipos que se realizaron y a partir de los cuales se pretenden escalar hasta llegar al menor tamaño posible, de acuerdo a la aplicación a la que van a ser destinados.

Es importante aclarar que los prototipos de los motores tienen un tamaño adecuado para poderlos manipular fácilmente; posteriormente serán escalados a un tamaño menor.

4.1.1 MOTOR DE DOS ENGRANES

En la figura 26 se observa el primer prototipo de motor, el cual consta de dos engranes externos de 12 dientes cada uno, con un diámetro exterior de 29.6 mm y ancho de 20 mm; la carcasa tiene unas dimensiones aproximadas de 66 mm x 50.8 mm x 36 mm. Cuenta con tres rodamientos (dos para el eje del engrane conductor y uno para el engrane conducido).

La carcasa consta de dos orificios, uno que funciona como puerto de entrada y el otro como puerto de salida; el puerto de entrada es de mayor diámetro que el puerto de salida con el fin de reducir las pérdidas de carga [35]. Los puertos son roscados y sus dimensiones son de 13.72 y 17.15 mm ($\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{8}$ NPT) respectivamente; en cada puerto se atornilla una conexión para manguera, conocidas como espigas.

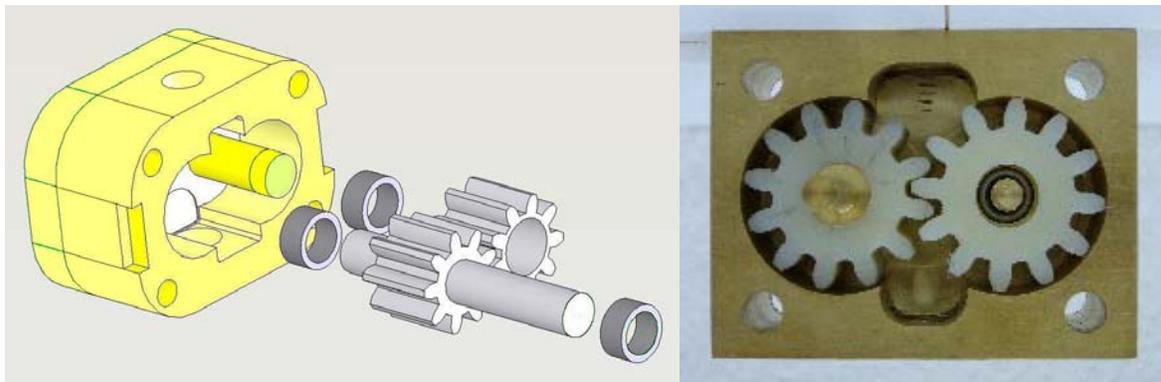


Fig. 26 Motor de dos engranes

El gasto volumétrico en este prototipo se obtiene de la siguiente forma

$$Q = 2\pi \cdot D \cdot m \cdot b \cdot n \quad (4.1)$$

en donde: D = diámetro de paso
 m = módulo del engrane
 b = ancho del engrane
 n = velocidad de rotación

4.1.2 MOTOR DE CUATRO ENGRANES

La segunda propuesta es un motor que consta de cuatro engranes, con el mismo diámetro exterior (Fig. 27). El propósito de esta configuración es la de contar con tres etapas, ya que se pretende reducir las fuerzas radiales que actúan contra los engranes.

En este caso también se utilizarán rodamientos de agujas (dos en el engrane conductor y uno en cada uno de los engranes restantes). Los engranes tienen 12 dientes, un diámetro exterior de 29.6 mm y ancho de 20 mm, mientras que la carcasa mide 120 mm x 50.8 mm x 36 mm aproximadamente y cuenta con tres puertos de entrada y con tres puertos de salida. Los puertos de salida también son de menor diámetro que los puertos de entrada.



Fig. 27 Motor de cuatro engranes

En este motor el fluido de trabajo llega al puerto de admisión A1, el flujo sale de la etapa por el puerto de escape E1 e ingresa a la siguiente etapa por el puerto A2, nuevamente sale de la etapa por el puerto E2 y es retomado en el puerto de admisión A3, finalmente sale de la carcasa por el puerto de escape E3 (Fig. 28). Durante todo el trayecto del fluido los cuatro engranes son incitados a girar, obteniendo de esta manera el movimiento del engrane conductor, el cual se encuentra colocado en el extremo opuesto de donde está situado el puerto de admisión A1.

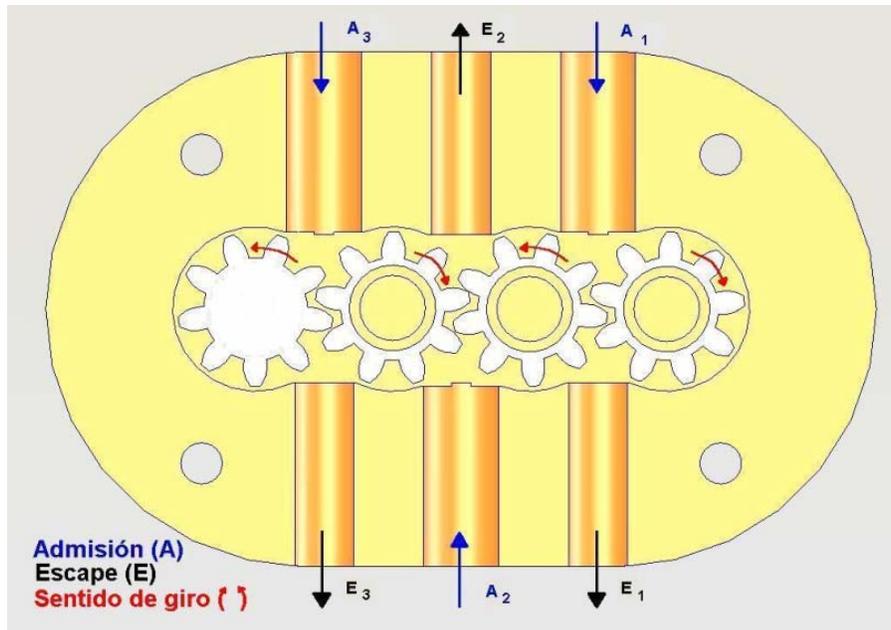


Fig. 28 Trayectos del caudal

El gasto volumétrico es:

$$Q = 4(N \cdot A_d \cdot b \cdot n) \quad (4.2)$$

en donde: N = Número de dientes de cada engrane
 A_d = Área entre dientes
 b = Ancho del engrane
 n = Velocidad de rotación

4.1.3 MOTOR DE CUATRO ENGRANES DE DIFERENTES DIÁMETROS

Consta de cuatro engranes que van aumentando de diámetro exterior conforme el fluido realiza su recorrido en el motor. Los engranes son de 12, 13, 14 y 15 dientes respectivamente.

El motor también consta de tres etapas, su funcionamiento es similar al del segundo prototipo, es decir, la salida de la primera etapa se conecta a la entrada de la segunda etapa, mientras que la salida de la segunda etapa se conecta con la entrada de la tercer etapa.

En esta configuración el engrane conductor es el engrane de mayor diámetro y se encuentra colocado en un extremo (Fig. 29). El diámetro del engrane conductor permitió que el eje fuera más robusto que los ejes de los motores anteriores, lo cual da pie a que este eje tenga más resistencia.



Fig. 29 Motor de cuatro engranes de diferente diámetro exterior

El gasto volumétrico se obtiene de la siguiente forma:

$$Q = 4(N_1 \cdot A_d \cdot b \cdot n_1) \quad (4.3)$$

en donde: N_1 = Número de dientes del primer engrane
 A_d = Área entre dientes
 b = Ancho del engrane
 n_1 = Velocidad de rotación de primer engrane

4.2 BANCO DE PRUEBAS

Para la caracterización de los motores fue necesario crear un banco de pruebas que consta de dos tanques de almacenamiento de acero inoxidable; el primero de ellos tiene un diámetro en la base de 200 mm y altura de 300 mm, cuenta con tres puertos (dos de entrada y uno de salida), la salida está conectada a una válvula de paso que permite o evita la circulación del fluido hacia el segundo tanque; este segundo tanque tiene un espesor de pared de 7 mm, diámetro de 20 mm y longitud de 35 mm. Es sometido a

presión (con la ayuda de un compresor de aire, el cual está conectado directamente al tanque), la tapa tiene forma de brida, para evitar cualquier tipo de fugas.

A la salida del tanque se encuentra un manómetro de presión y una válvula reguladora de flujo del tipo aguja, posteriormente (siguiendo el camino del flujo) se localiza una desviación tipo T con una entrada y dos salidas. Una de las salidas está conectada al tanque de almacenamiento, mientras que la otra salida da directamente a la atmósfera. Esta salida se utilizó para medir el flujo volumétrico (Fig. 30).

En el tramo disponible entre la válvula reguladora de flujo y la desviación es colocado el motor que se pretende caracterizar.

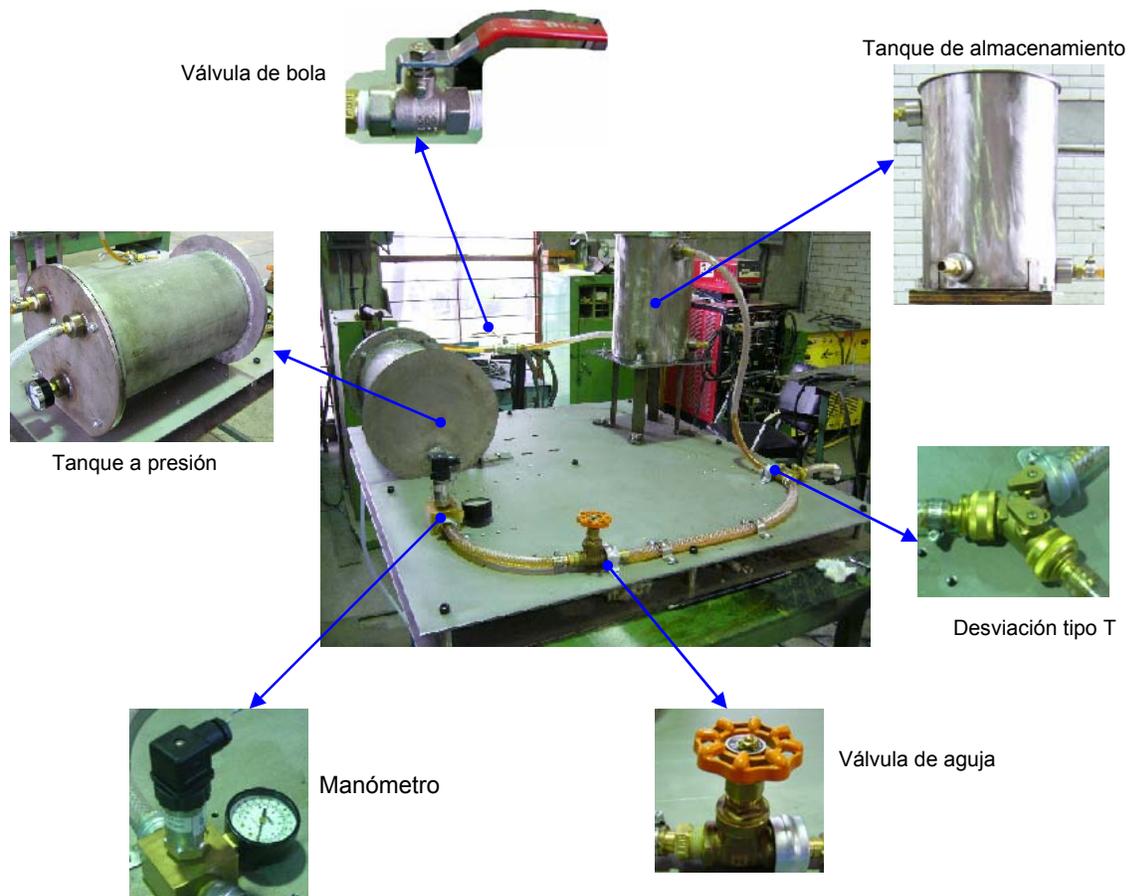


Fig. 30 Banco de pruebas

Todas las conexiones hidráulicas del banco fueron hechas con manguera reforzada transparente, la cual fue sujeta a una base con abrazaderas. La base de 900 mm x 1000 mm está formada por dos placas de acero inoxidable de 4.76 mm (3/16 plg) de espesor c/u y tiene la apariencia de un emparedado, la placa inferior detiene a la placa superior por medio de nueve soportes distribuidos simétricamente.

La separación entre placas es de aproximadamente 50 mm; en la placa superior se localizan diversos barrenos roscados de 6.35 mm (1/4 plg) que sirven para atornillar las abrazaderas.

La forma en como se realizaron los experimentos es la siguiente: El aceite se vierte en el tanque de almacenamiento, se abre la válvula de bola y por la fuerza de gravedad el fluido empieza a fluir hacia el segundo tanque. Cuando el primer tanque esté completamente vacío es necesario cerrar la válvula que conecta a los dos tanques; de otra manera el aire se escapará por ahí. Una vez encendido el compresor se inyecta el aire al tanque a presión, la presión en el interior del tanque aumenta provocando que el fluido empiece a salir por el único puerto disponible. El fluido empieza a circular, pasando por el sensor de presión y la válvula reguladora de flujo hasta llegar a la desviación tipo T; dependiendo de qué salida esté abierta el fluido llegará al tanque de almacenamiento nuevamente para cerrar el ciclo de trabajo o saldrá a la atmósfera en donde es medido el flujo volumétrico.

El flujo volumétrico se determinó manualmente midiendo el volumen almacenado en un recipiente en cierto intervalo de tiempo.

En la caracterización de los motores la válvula reguladora de flujo se mantuvo completamente abierta, ya que el flujo es prácticamente constante de 0 a 70% de cierre de la válvula; en el gráfico 31 se muestra el comportamiento del banco de pruebas cuando la presión de trabajo es de 3 kg_f/cm². Para todas las presiones de trabajo el banco de pruebas muestra un comportamiento muy similar.

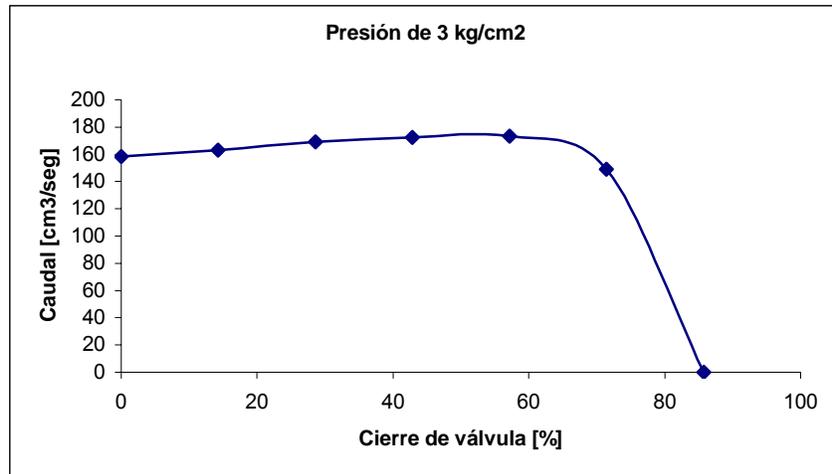


Fig. 31 Características de funcionamiento del banco de pruebas

4.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

El estudio de los prototipos se llevó a cabo con las condiciones citadas en la tabla N° 2.

Tabla N° 2 Condiciones de operación

Variable	Condición
Temperatura de operación	Temperatura ambiente
Tipo de fluido	Aceite lubricante para automóvil SAE 40
Diámetro de la manguera	Diámetro interior de 12.7 mm (½ plg)
Flujo	Regulación por medio de una válvula, la cual es abierta o cerrada cada ½ vuelta. También depende de la presión a la que se este trabajando.
Presión	El aceite es inyectado a diferentes presiones. Las presiones utilizadas son 1, 2, 3 y 4 kg/cm ²

Para medir el par de los motores a diferentes presiones se utilizó el principio de funcionamiento del freno de Navier (Fig. 32). En este freno el eje del motor es sometido a una fuerza, por medio de una cuerda (inextensible) que rodea al eje; un extremo de la cuerda se encuentra anclada al piso mientras que en el extremo contrario se coloca un peso que permite tensar la cuerda.

Al variar el peso en el extremo de la cuerda la velocidad de giro aumenta o disminuye según sea el caso.

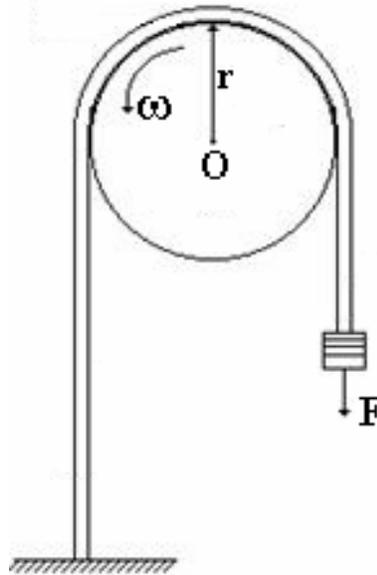


Fig. 32 Freno de Navier

La ecuación empleada para obtener el par mediante este experimento, es la siguiente :

$$T = (m \cdot g) r = F \cdot r \quad (4.4)$$

En donde: m = masa
 g = aceleración de la gravedad
 r = radio del eje
 F = Fuerza

También fue necesario conocer la velocidad de giro del eje, para esto se utilizó un disco ranurado (mejor conocido como *encoder*) y un optosensor H22A1, el cual es conectado a un osciloscopio (Fig. 33).

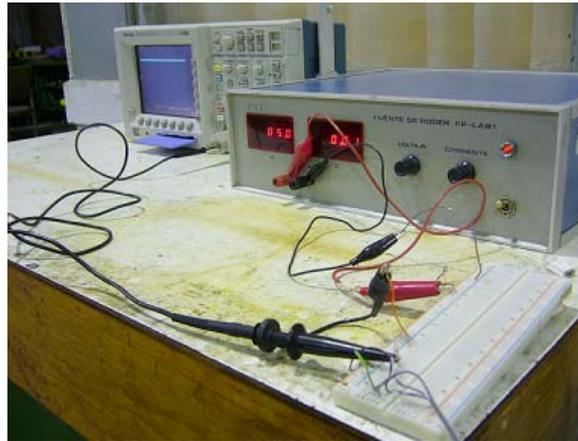
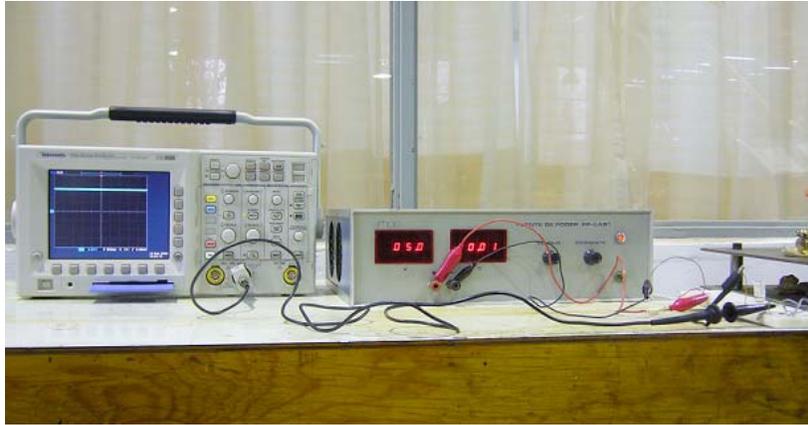


Fig. 33 Arreglo para medición de velocidad

El optosensor está formado por un diodo emisor de luz y un fototransistor; el diodo, como su nombre lo indica, emite un haz de luz el cual es detectado por el fototransistor, cuando el *encoder* obstruye el haz el optosensor manda una señal de voltaje muy pequeña, sin embargo, cuando la ranura del *encoder* deja pasar el haz de luz el optosensor manda una señal de voltaje alta. Por lo que, cuando gira el *encoder*, cada vez que pase la ranura entre el optosensor varía la señal, la cual es detectada en el osciloscopio (Fig. 34), dicha variación indica el tiempo que tarda el *encoder* en realizar una vuelta.

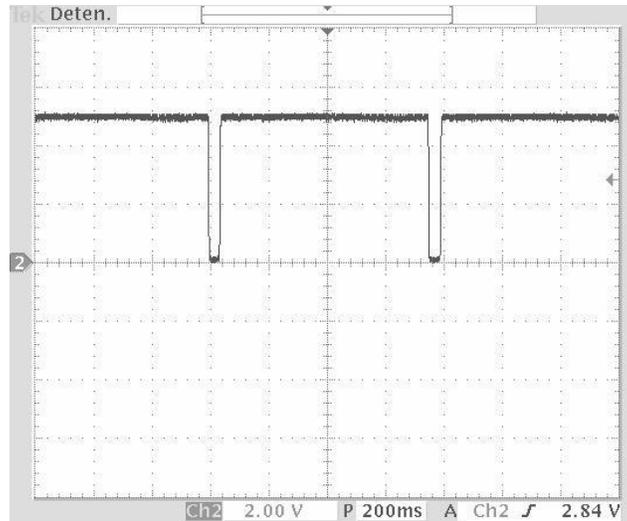


Fig. 34 Tren de pulsos generado por la rotación del *encoder*

Para desarrollar estos dos experimentos se utilizó un eje, el cual se sujeta al rotor del motor por medio de prisioneros. Este eje tiene una pequeña ranura que lo rodea, que hace la función de guía para colocar la cuerda del freno de Navier y en un extremo se encuentra el *encoder* (Fig. 35)

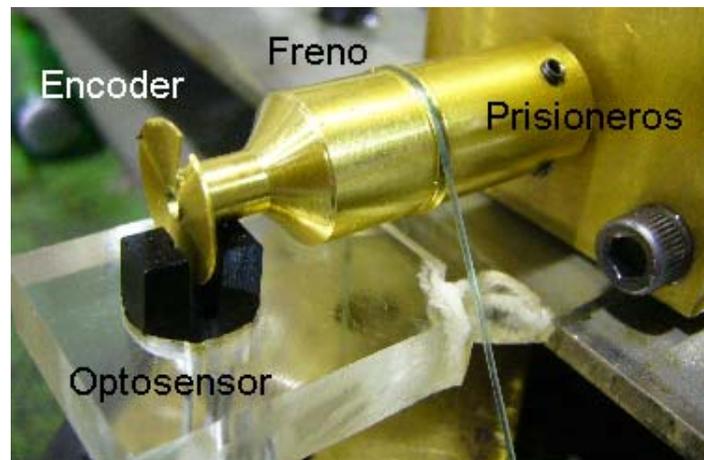


Fig. 35 Freno y *encoder*

La potencia fue obtenida con la siguiente expresión:

$$Pot = T \cdot n \quad (4.5)$$

en donde: $Pot =$ Potencia

$T =$ Par

$n =$ Velocidad de rotación

4.4 ANÁLISIS ADIMENSIONAL

Por medio del análisis adimensional [36] se pretende conocer el comportamiento del motor hidráulico cuando este se escale a dimensiones más pequeñas (Fig. 36) para utilizarlo en las micromáquinas-herramienta.

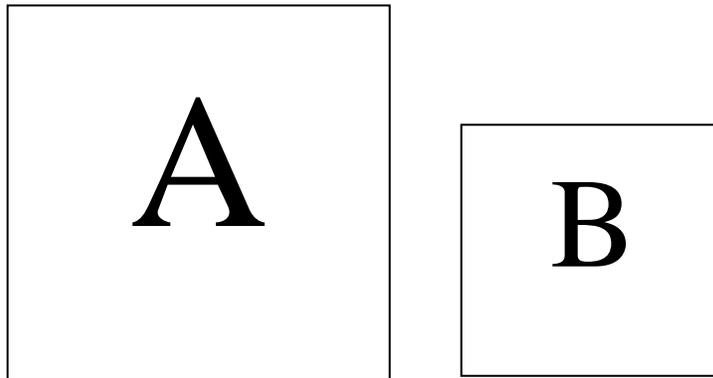


Fig. 36 Relación de tamaños

La forma de escalar dimensiones longitudinales es la siguiente:

$$L_B = S \cdot L_A \quad (4.6)$$

en donde: S = factor de escala ($0 < S < 1$)

L_A = longitud real

L_B = longitud escalada

De esta misma forma podemos obtener las relaciones de área y volumen

$$A_B = (L_B)^2 = (S \cdot L_A)^2 = S^2 \cdot A_A \quad (4.7)$$

en donde: S = factor de escala

A_A = área real

A_B = área escalada

$$V_B = (L_B)^3 = (S \cdot L_A)^3 = S^3 \cdot V_A \quad (4.8)$$

en donde: S = factor de escala
 V_A = volumen real
 V_B = volumen escalado

Para conocer el comportamiento del flujo, tenemos la siguiente ecuación

$$Q_B = 2\pi \cdot D_B \cdot m_B \cdot b_B \cdot n_B \quad (4.9)$$

Para el análisis consideramos las siguientes relaciones de engranes

$$S = \frac{n_A}{n_B} = \frac{D_B}{D_A} = \frac{b_B}{b_A} \quad (4.10)$$

en donde: S = factor de escala
 n_A = velocidad de rotación del engrane real
 n_B = velocidad de rotación del engrane escalado
 D_A = diámetro de paso del engrane real
 D_B = diámetro de paso del engrane escalado
 b_A = ancho del engrane real
 b_B = ancho del engrane escalado

También se tomó en cuenta que la relación de dientes es

$$Z_A = Z_B \quad (4.11)$$

es decir, el número de dientes de los engranes no va a cambiar

Sabemos que el modulo de engrane es

$$m_B = \frac{D_B}{Z_B} \quad (4.12)$$

por lo tanto, tenemos que

$$m_B = \frac{S \cdot D_A}{Z_A} = S \cdot m_A \quad (4.13)$$

en donde: S = factor de escala
 m_A = módulo del engrane real
 m_B = módulo del engrane escalado
 Z_A = número de dientes del engrane real
 Z_B = número de dientes del engrane escalado

Así que, retomando la ecuación para el análisis del gasto del motor, tenemos:

$$Q_B = 2\pi(S \cdot D_A)(S \cdot m_A)(S \cdot b_A)\left(\frac{n_A}{S}\right) \quad (4.14)$$

$$Q_B = (2\pi \cdot D_A \cdot m_A \cdot b_A \cdot n_A)S^2 \quad (4.15)$$

$$Q_B = S^2 \cdot Q_A \quad (4.16)$$

en donde: S = factor de escala
 Q_A = gasto real
 Q_B = gasto del motor escalado

Para estimar el comportamiento del par se considera que la caída de presión (ΔP) y la viscosidad del fluido son constantes, obteniendo lo siguiente

$$T_B = F_B \cdot D_B \quad (4.17)$$

$$T_B = [(\Delta P_B)(A_B)]D_B = [(\Delta P_A)(S^2 \cdot A_A)](S \cdot D_A) \quad (4.18)$$

$$T_B = [(\Delta P_A)(S^2 \cdot A_A)](S \cdot D_A) \quad (4.19)$$

$$T_B = (S^3)(F_A \cdot D_A) = S^3 \cdot T_A \quad (4.20)$$

$$T_B = S^3 \cdot T_A \quad (4.21)$$

en donde: S = factor de escala
 T_B = Par real
 T_A = Par del motor escalado

La relación de potencia entre el motor real y el motor escalado se muestra a continuación

$$Pot_B = T_B \cdot n_B \quad (4.22)$$

$$Pot_B = (S^3 \cdot T_A) \left(\frac{n_A}{S} \right) \quad (4.23)$$

$$Pot_B = S^2 \cdot Pot_A \quad (4.24)$$

en donde: S = factor de escala
 Pot_B = Potencia real
 Pot_A = Potencia del motor escalado

De las ecuaciones anteriores se concluye que el par decrece en orden cúbico con respecto a la disminución del tamaño de los motores, mientras que, el caudal y la potencia decrecen en orden cuadrado.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentarán y analizarán los resultados de las pruebas realizadas en la caracterización de los motores hidráulicos. Como se mencionó anteriormente en las condiciones de operación, se realizaron pruebas inyectando el aceite lubricante a 1, 2, 3 y 4 kg/cm² de presión.

Para realizar las pruebas, se permitía que se estabilizara el flujo y la presión en el banco, aproximadamente entre unos 10 a 15 segundos. A partir de ese momento se empezaban a tomar las mediciones.

Cabe aclarar que, tal vez el tiempo de espera no era el más adecuado, pero por la misma configuración del banco de pruebas no era pertinente esperar tanto tiempo, en especial a altas presiones ya que el tanque se vaciaba rápidamente y solamente empezaba a circular aire en todo el banco.

En las gráficas presentadas a continuación, las trayectorias de los puntos obtenidos experimentalmente se visualizan con líneas continuas y las líneas de tendencia obtenidas con el paquete de cómputo Excel se indican con líneas discontinuas. También se indican las barras de error; generalmente este tipo de errores se utilizan para los valores graficados en el eje Y, pero esta vez se tomó la decisión de utilizarlos en X por que en este eje se graficaron los valores que se midieron experimentalmente, por lo que presentan variaciones.

5.1 MOTOR DE DOS ENGRANES

En las primeras gráficas se observa el comportamiento del par y la potencia del motor de dos engranes cuando varía la velocidad de rotación.

Se graficó el comportamiento a las diferentes presiones con las que se trabajó. Como se puede apreciar, al incrementar la presión de trabajo aumenta la potencia, el par y la velocidad de rotación del motor.

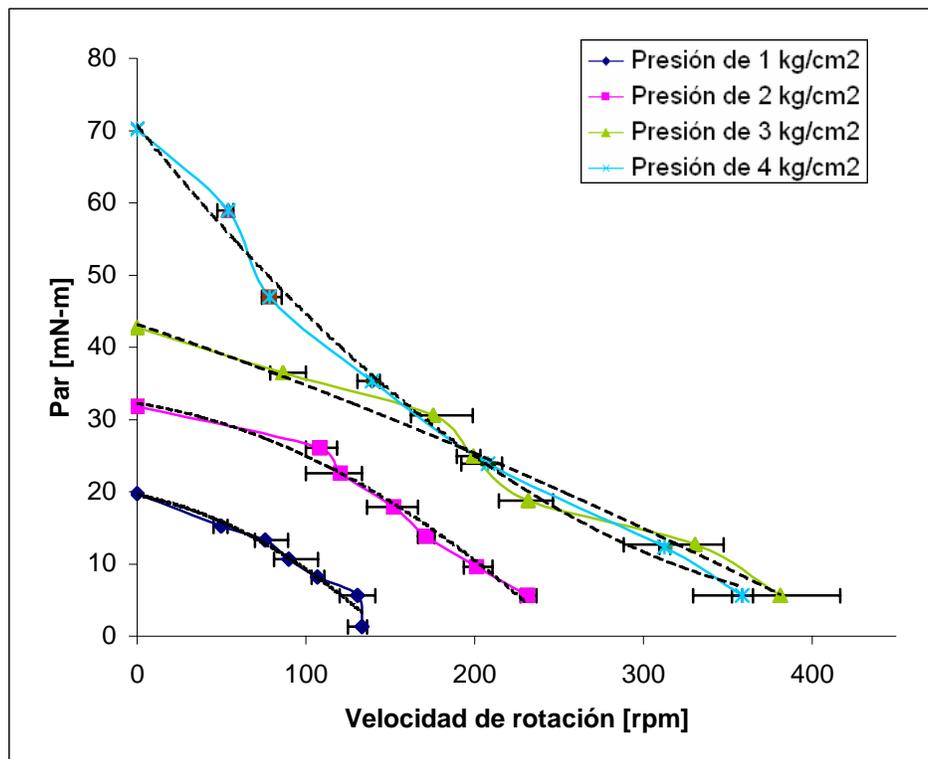


Fig. 37 Curvas: Par vs Velocidad de rotación

En todos los casos, la potencia tiene un comportamiento tipo parabólico, es decir, empieza a incrementarse conforme aumenta la velocidad de rotación hasta alcanzar un valor máximo, para posteriormente tender a caer. El par, por el contrario tiene su valor máximo a velocidades de rotación bajas y disminuye conforme aumenta la velocidad de rotación.

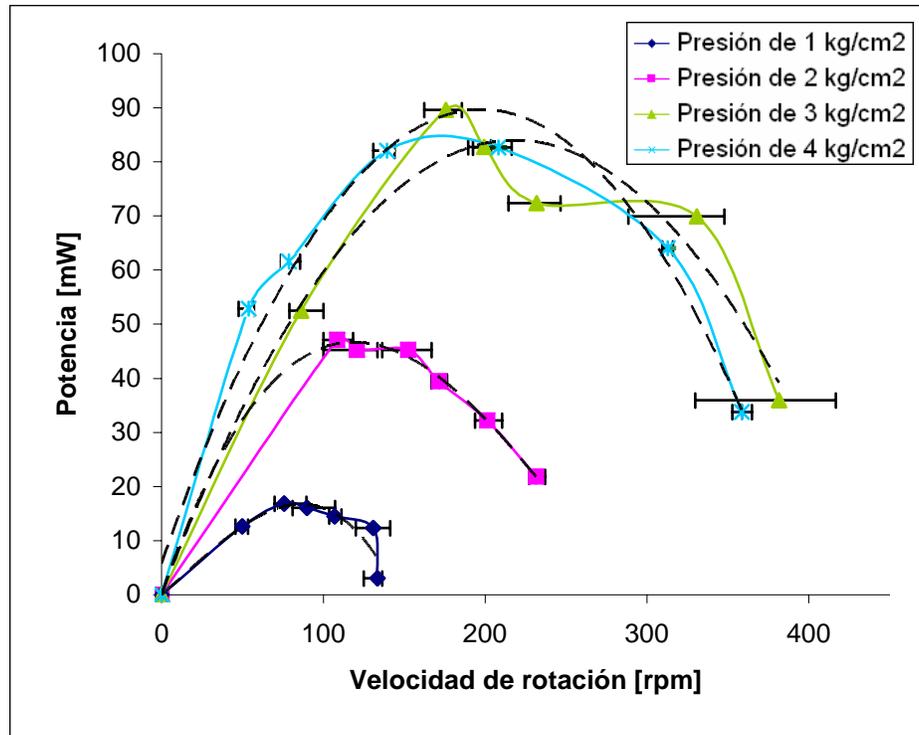


Fig. 38 Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación

Cuando la presión de funcionamiento del motor es de 3 kg/cm^2 la potencia máxima obtenida es 89.6 mW y el par es de $30.6 \text{ mN}\cdot\text{m}$ a 175.6 rpm ; mientras que el par a rotor bloqueado es igual a $42.7 \text{ mN}\cdot\text{m}$.

En las gráficas anteriores se aprecia que a partir de cierta velocidad de rotación, el comportamiento del motor a 4 kg/cm^2 es inferior comparada con los resultados a 3 kg/cm^2 . Esto puede deberse a que se está llegando a la máxima capacidad de funcionamiento de este motor. Por lo que si se sigue aumentando la presión de trabajo el motor ya no funcionará adecuadamente, porque gran parte de la energía que se le proporciona se estará desperdiciando.

5.2 MOTOR DE CUATRO ENGRANES

Para el motor de cuatro engranes las curvas de par y potencia tienen un comportamiento muy similar a las curvas del motor anterior. En estas gráficas también se representan los casos para cada una de las presiones.

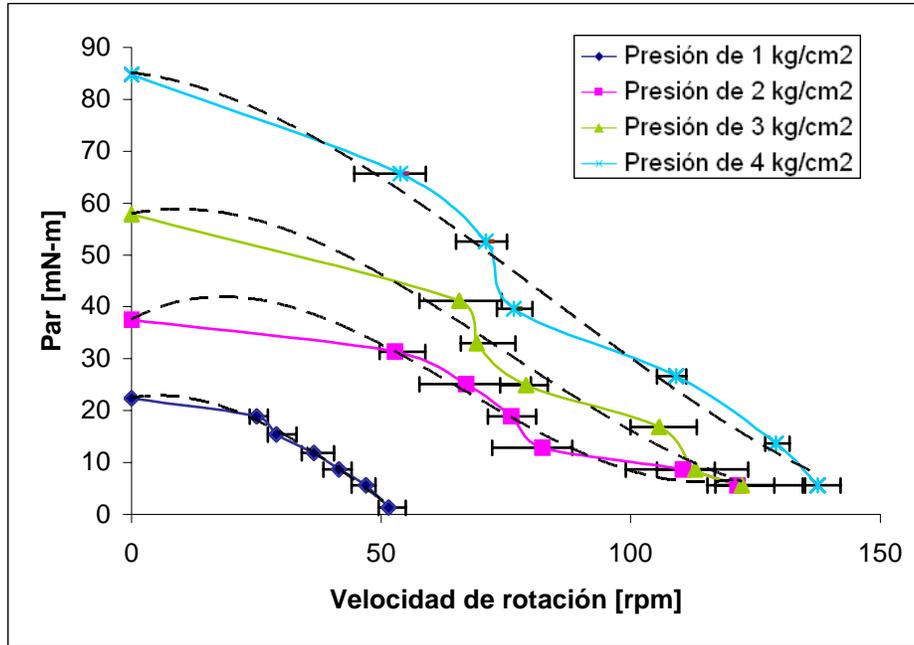


Fig. 39 Curvas: Par vs Velocidad de rotación

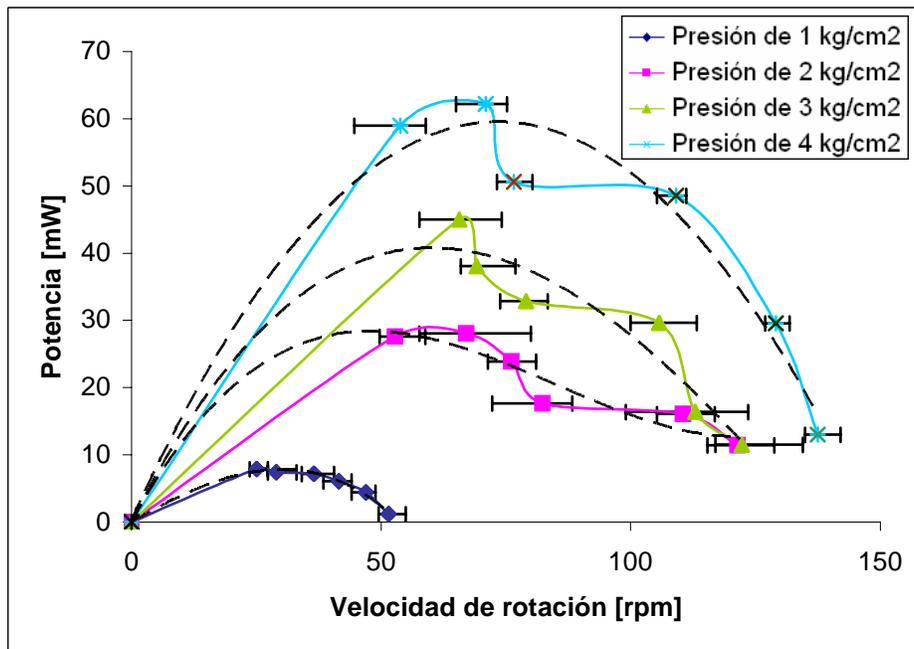


Fig. 40 Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación

En este caso, cuando la presión de trabajo es $3 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, la potencia máxima y el par a 65.6 rpm son de 44.98 mW y 57.8 mN-m respectivamente y el par a rotor bloqueado es 57.8 mN-m .

Para este prototipo, el funcionamiento a $4 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ sigue comportándose de manera semejante a los casos de 1, 2 y $3 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$. Obteniendo una potencia máxima de 62.19 mW y un par de 52.71 mN-m a 70.92 rpm; el par a rotor bloqueado es de 84.77 mN-m.

Al realizar los experimentos, los engranes del segundo modelo opusieron mayor resistencia al movimiento que los engranes del primer modelo, este fenómeno se debe simplemente a que se requiere menos energía para mover dos engranes, comparándola con la energía que se necesita para mover cuatro engranes. Esto se vio reflejado en los resultados, ya que la velocidad de rotación y la potencia del segundo motor son menores que los valores obtenidos en el primer modelo, más sin embargo, el par a rotor bloqueado y el par cuando se alcanza la máxima potencia del motor de cuatro engranes son superiores en todas las pruebas.

5.3 MOTOR DE CUATRO ENGRANES DE DIFERENTES DIÁMETROS

Para caracterizar el tercer motor era necesario trabajar con una presión superior a $5 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$, este aumento se debe a la gran masa que debe mover el fluido; en comparación con los otros dos modelos, lo cual nos indica que muy probablemente alcanzará mayores valores de par que los modelos anteriores, pero su exigencia de alta cantidad de energía para funcionar, fue la clave para hacerlo a un lado en esta ocasión; por lo que no se caracterizó. Las gráficas siguientes muestran la estimación de su comportamiento, comparado con el motor de cuatro engranes funcionando a $3 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$.

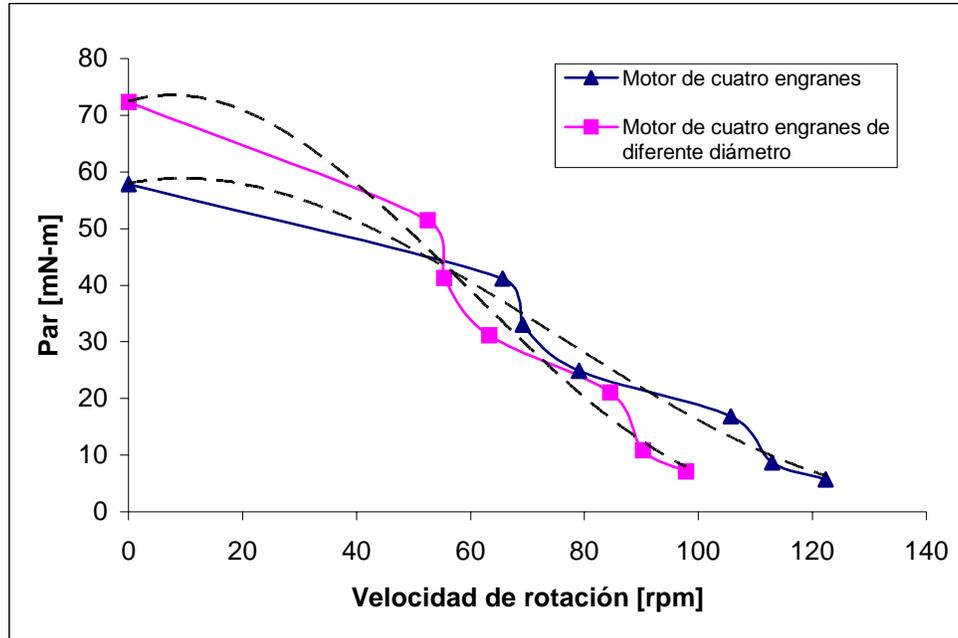


Fig. 41 Curvas: Par vs Velocidad de rotación

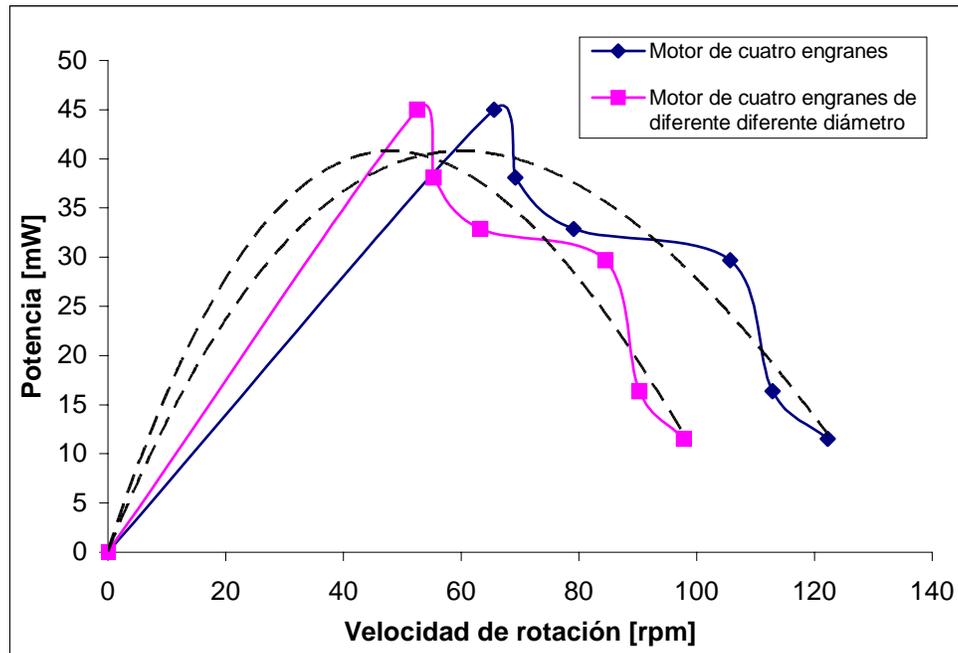


Fig. 42 Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación

Los resultados estimados del motor de cuatro engranes de diferente diámetro son: Potencia máxima de 44.98 mW y par de 51.41 mN-m a 52.49 rpm. El par a rotor bloqueado es 72.29 mN-m

Las pocas pruebas a las que fue sometido el modelo provocó que una manguera que conectaba el paso de la etapa 1 a la etapa 2, se reventara (Fig. 43) debido a la alta presión de trabajo. Aunque cabe aclarar que la manguera utilizada para conectar las etapas en los motores de cuatro engranes era de látex, la cual no resiste altas presiones, por lo cual se tuvo que optar por utilizar una manguera más resistente para los dos motores de tres etapas. Estéticamente no resulto ser la mejor opción, pero para fines prácticos fue la mejor decisión.

Una de las causas aparentes por las que no funcionó este motor fue la manufactura de los engranes; al parecer los dientes llegaban a atorarse por lo que alteraba el funcionamiento del motor, ya que le era difícil superar la fuerza de inercia.



Fig. 43 Manguera rota

5.4 MOTORES A ESCALA

En las siguientes gráficas se muestra una aproximación del comportamiento del par y la potencia (cuando la presión de trabajo es de 3 kg/cm^2), si los motores fueran escalados un 50 por ciento, es decir, si los motores se redujeran a la mitad de su tamaño actual. Las trayectorias con el nombre de “Motor real” son los datos obtenidos con la caracterización de los motores, mientras que las trayectorias tituladas “Motor escalado” son aproximaciones resultantes del análisis matemático adimensional.

Como se indicó en el apartado de análisis adimensional, si las presiones de trabajo son las mismas que las utilizadas en estos experimentos, teóricamente la potencia de los motores disminuirían cuatro veces su valor actual y el par disminuirían ocho veces en comparación a su valor original.

5.4.1 Motor de dos engranes

En las gráficas 44 y 45 se puede apreciar la comparación del motor de dos engranes en su tamaño actual y el motor escalado.

La potencia máxima del motor escalado es de 22.4 mW a 351.2 rpm y el par es de 3.82 mN-m a la misma velocidad de rotación. El par a rotor bloqueado es de 5.33 mN-m.

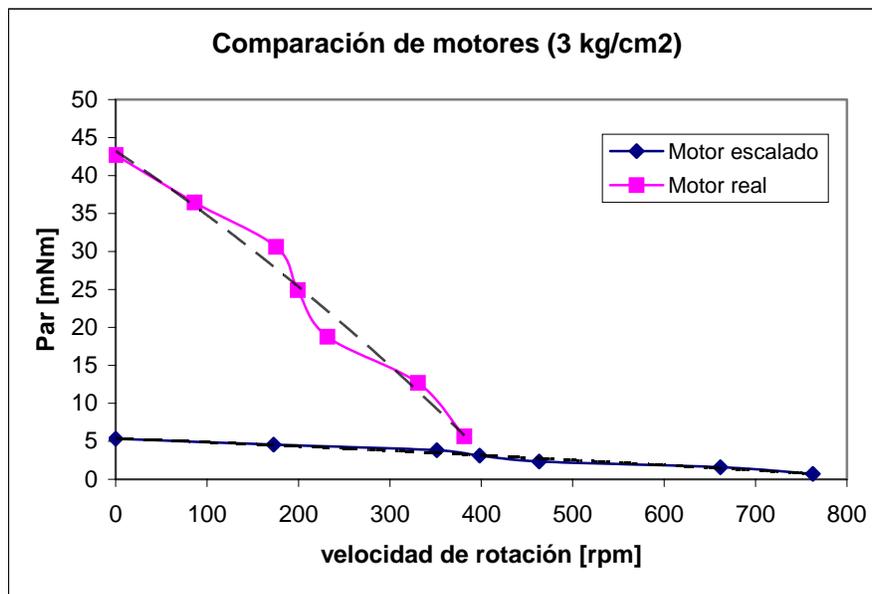


Fig. 44 Curvas: Par vs Velocidad de rotación

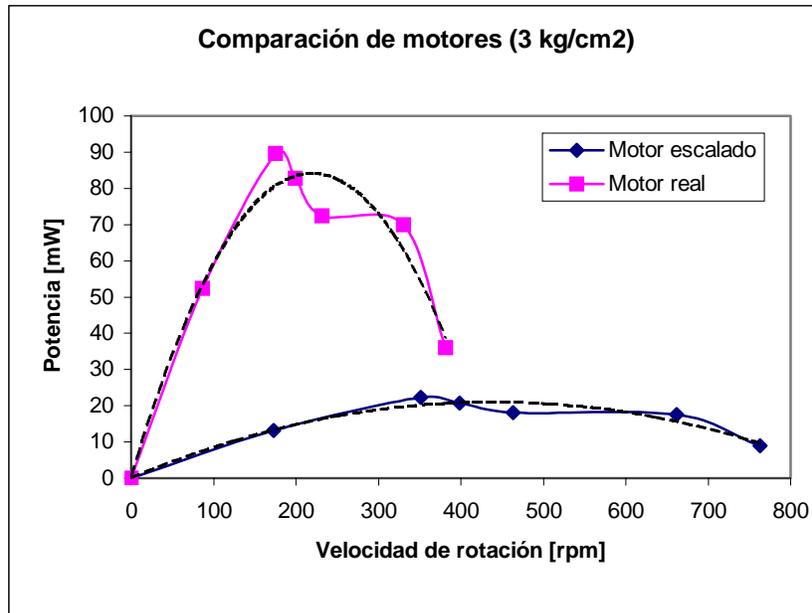


Fig. 45 Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación

5.4.2 Motor de cuatro engranes

El comportamiento del motor escalado y el motor real de cuatro engranes es ilustrado en las gráficas siguientes. Cuando la velocidad de rotación es de 131.24 rpm el par es de 5.14 mN-m y la potencia máxima es de 11.24 mW; el par a rotor bloqueado es de 7.22 mN-m.

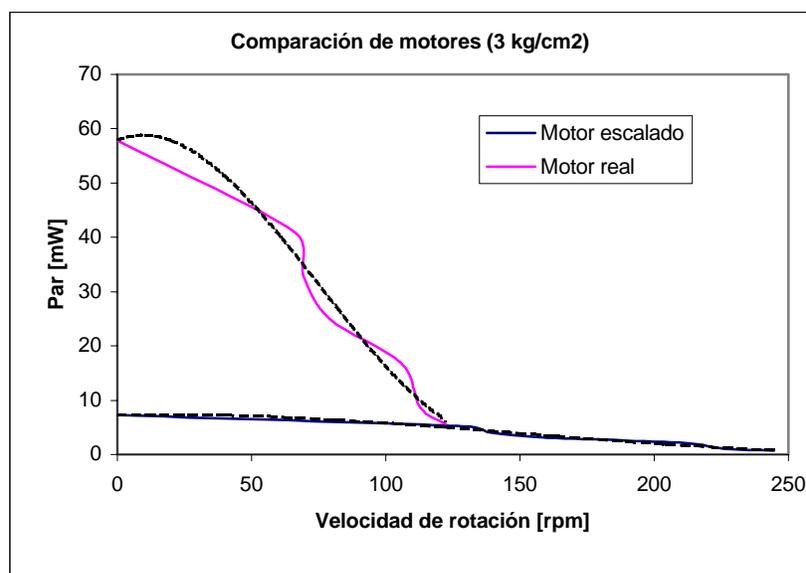


Fig. 46 Curvas: Par vs Velocidad de rotación

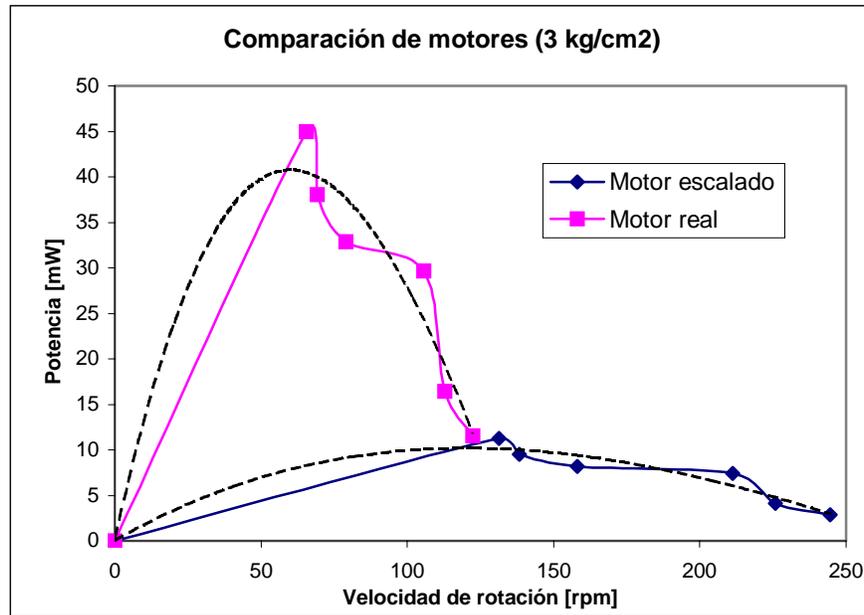


Fig. 47 Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación

5.5 OTROS MOTORES

A continuación en este pequeño apartado se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de los motores de alta potencia desarrollados en el Laboratorio de Micromecánica y Mecatrónica. En esta sección no se pretende decir que motores son mejores, simplemente se tiene como objetivo dar a conocer a grandes rasgos las características de funcionamiento de estos motores y así tener a la mano datos importantes que ayuden a la selección de los motores según las prioridades o requerimientos que se tengan.

Abajo se muestran los resultados del motor electromagnético desarrollado por el M.I. Paulo López [15]. Se observa que al aumentar el voltaje de los pulsos de entrada se puede obtener un mejor desempeño en el torque del motor, así como alcanzar mayores velocidades. Haciendo esto se lograron obtener velocidades de 6000 RPM para el motor PLM con un T_H de 0.1 Nm usando un voltaje de entrada de 30 V; con pulsos de 15 V en el motor EK se logro obtener una velocidad de 8000 RPM con un torque T_H 0.026 Nm.

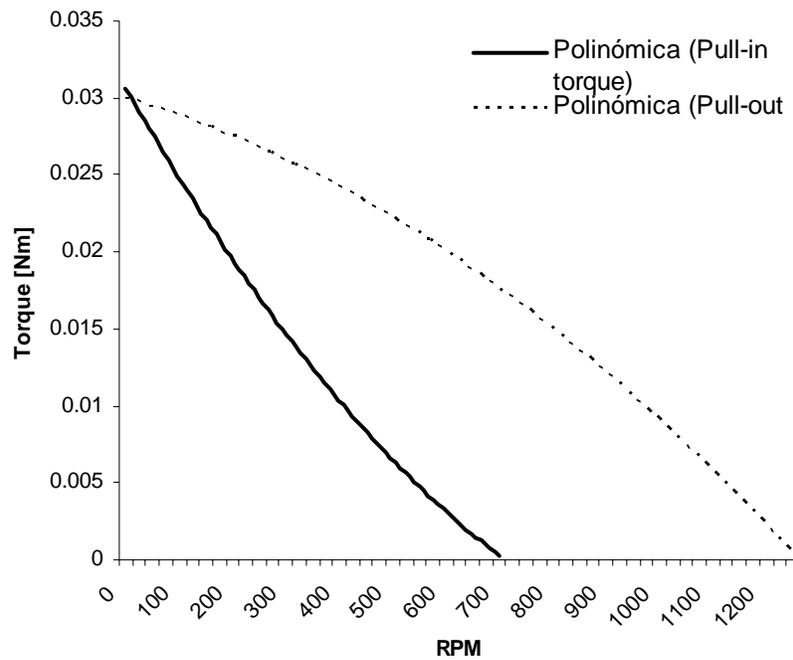


Fig.48. Curvas de torque dinámico del motor PLM con pulsos de alimentación de 10 V.

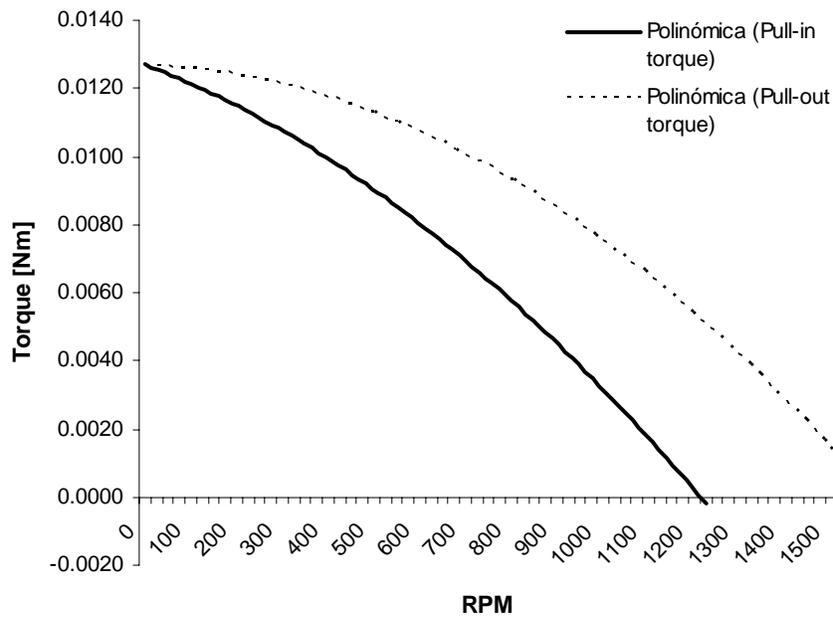


Fig. 49 Curvas de torque dinámico del motor EK con pulsos de alimentación de 7 V.

Por último se muestran los resultados del motor implementado por el M.I. Javier Naranjo [37], este motor funciona bajo los principios neumáticos.

La primer gráfica muestra el comportamiento del par conforme aumenta la presión de trabajo y la segunda gráfica muestra el comportamiento de la potencia a diferentes presiones de trabajo.

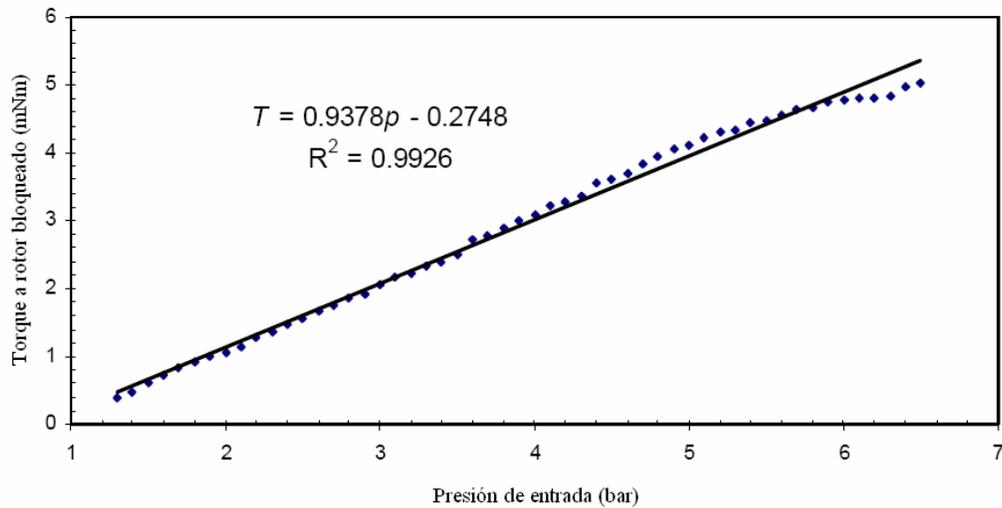


Fig. 50 Curva: Par vs Presión de entrada

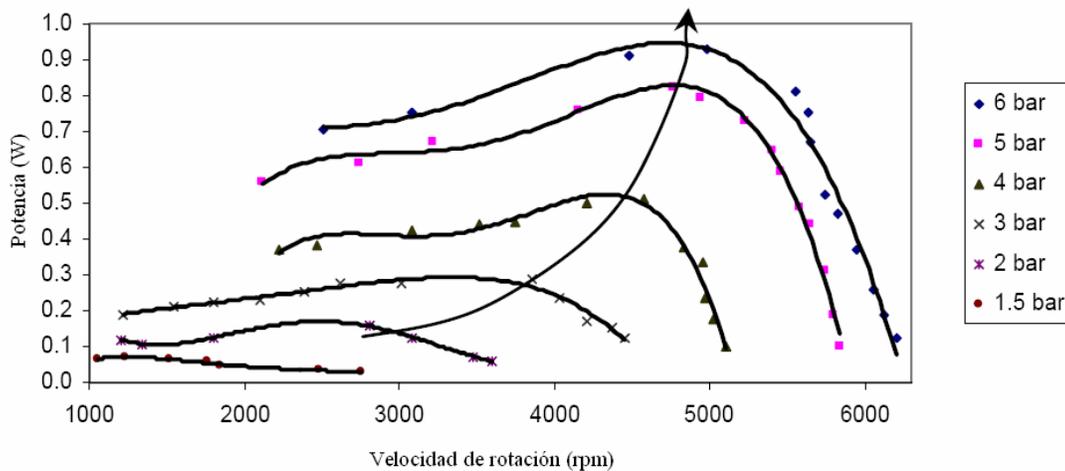


Fig. 51 Curvas: Potencia vs Velocidad de rotación

Los valores máximos de potencia, par y velocidad son: 0.911 W, 5.03 mN-m y 8500 rpm respectivamente. En el cuadro N°3 se presentan las características principales del motor.

Tabla N°3 Características del motor neumático

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro del rotor	mm	17
Diámetro del estator	mm	11
Excentricidad	mm	1
Longitud	mm	14.5
Peso	gr	66.13
Numero de paletas		6
Reversibilidad		Si
Velocidad máxima	rpm	8500
Torque máximo	mN-m	5.03
Potencia máxima	W	0.911
Mejor presión de funcionamiento	bar	5
Flujo volumétrico	l/min	55

CONCLUSIONES

En esta tesis se presentaron tres diferentes propuestas de diseño de un motor, cuyo forma de operación se basa en los principios hidráulicos.

Los tres motores emplean engranes externos de dientes rectos como elementos móviles. Se diseñaron y fabricaron configuraciones de dos y cuatro engranes del mismo diámetro y de cuatro engranes de diámetros diferentes.

Solo los motores de engranes del mismo diámetro fueron caracterizados; el tercer prototipo fue hecho a un lado en esta ocasión por la alta presión que necesita para trabajar, pero sería bueno que también se estudiará junto con los otros dos motores cuando se reduzcan de tamaño.

La caracterización constó en obtener el comportamiento del par, la potencia y la velocidad de rotación, trabajando a diferentes presiones.

Para realizar esta tarea, fue necesario diseñar un banco de pruebas en donde se pudiera variar la presión de trabajo y por ende el flujo del aceite. El banco, también es descrito en la tesis.

Los resultados de las pruebas muestran que se obtiene mayor par a rotor bloqueado (57.8 mN-m) del motor de cuatro engranes, mientras que el motor de dos engranes es el que tiene mayor potencia (89.6 mW), cuando la presión de operación es de 3 kg_f/cm². La máxima velocidad de rotación (381.35 rpm) también fue alcanzada por el motor de dos engranes. Por lo tanto, no se puede decir que un motor es mejor que otro, simplemente tienen diferentes características, las cuales pueden ser aprovechadas según las circunstancias que se presenten. Por ejemplo, se podrían utilizar para mover los bancos de las micromáquinas o en procesos de corte.

Por los datos obtenidos, se puede concluir que los motores caracterizados arrojan buenos resultados en lo referente a la potencia y al par, sin embargo, es necesario mejorar la calidad de manufactura de los engranes, para que estos dejen poco espacio entre la tapa y la carcasa, para evitar que haya fugas entre estos huecos ya que ahí existe una pérdida de flujo y por ende el desempeño de los motores se ve afectado. Un claro ejemplo de estas pérdidas es el comportamiento del motor de dos engranes cuando se trabaja a 4 kgf/cm^2 .

TRABAJO A FUTURO

La siguiente etapa de este proyecto es fabricar los tres motores reduciéndolos a la mitad de su tamaño actual. Se sugiere verificar en diversos catálogos, si existen engranes que se adapten a las características que se requieren para adquirirlos de una manera más rápida y tener que evitar la manufactura de los mismos.

Obtener las curvas características de los nuevos motores, realizándoles las mismas pruebas presentadas en esta tesis y compararlas con los resultados estimados.

También es recomendable adaptar el banco de pruebas para que funcione con flujo continuo y así permitir que las condiciones de prueba se establezcan adecuadamente. Además de permitir que los motores operen por más tiempo. Esencialmente, el banco debe estar compuesto por un tanque de almacenamiento y una bomba que impulse el fluido de forma continua (Fig. 52).

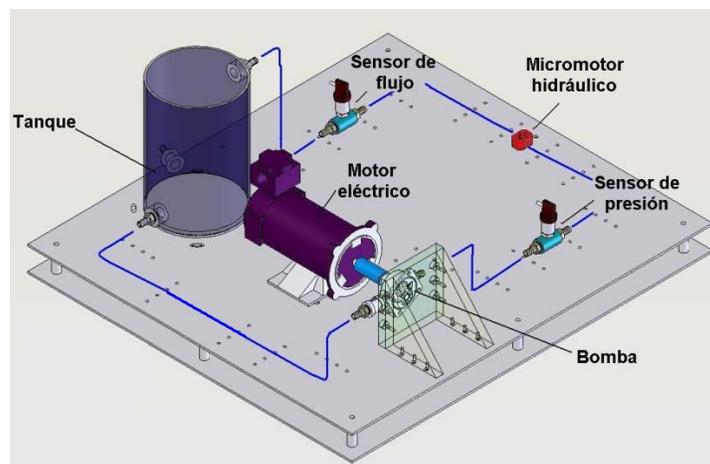


Fig. 52 Banco de pruebas (Diseño conceptual)

Otro aspecto que se debe solucionar cuando los motores sean escalados son las conexiones entre etapas de los motores de cuatro engranes. Se debe buscar una manguera flexible y resistente a la vez, o en su defecto diseñar conexiones rígidas, como otra forma de interconectar las diferentes etapas de los motores.

Posteriormente se deben someter a las pruebas de corte de materiales para conocer su comportamiento y verificar que efectivamente son adecuados para esta tarea; para esto es necesario adaptar un pequeño portapiezas (chuck) en el eje del engrane conductor para sujetar el material a maquinar, de tal manera que el motor haga la función de un torno (Fig. 53).

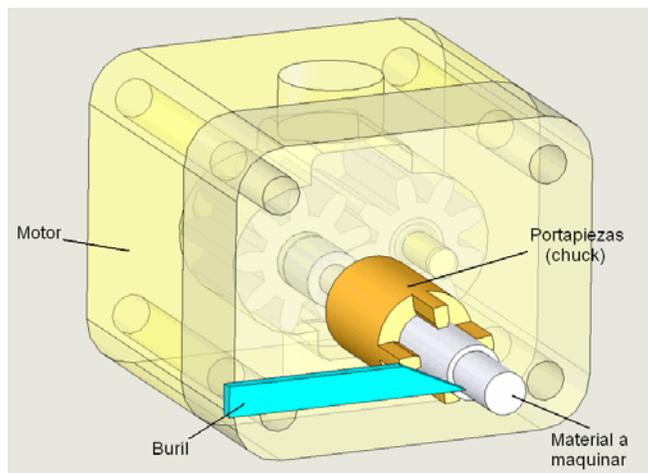


Fig. 53 Funcionamiento (Diseño conceptual)

Como parte de estas pruebas es importante verificar que las micromáquinas soportarán las vibraciones y las presiones de trabajo de los motores.

REFERENCIAS

- [1] Feynman R. (1992) "There's Plenty of Room at the Bottom", Journal of microelectromechanical systems, vol.1 (no. 1), pp. 60 - 66
- [2] CCADET – Laboratorio de micromecánica y mecatronica.
<http://www.cinstrum.unam.mx/grupos/laboratorio.jsp?id=10>
- [3] Ruiz, L. (Septiembre 2000). "Diseño y construcción de un microcentro de maquinado de bajo costo", Tesis de Maestría (Área de Diseño)
- [4] Velasco G., Saavedra G. (2005), "Analysis and kinematics simulation of a parallel micromanipulator", Congreso SOMIM – SOBIM. pp. 1 – 5
- [5] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology "Microfactories"
http://www.aist.go.jp/aist_e/museum/science/19/19.html
- [6] Investigación y Desarrollo (Octubre 2001), "Microfabricas automatizadas...pero mexicanas", Periodismo de Ciencia y Tecnología
- [7] Ruiz L. (2005), "Desarrollo de microequipo para celulas de manufactura", Tesis de doctorado (Área mecánica)
- [8] Prime Faraday Technology Watch (2001) "An introduction to MEMS", pp. 1 – 53
- [9] Fujita H. (1996), "Future of actuators and microsystems", Sensors and actuators, pp. 110 – 111
- [10] Fujita H. (1998), "Microactuators and micromachines", Proceedings of the IEEE, vol. 86 (no 8), p. 1721 – 1732

-
- [11] Fujimasa I. (1996) "Micromachines. A new era in mechanical engineering" Oxford University Press, Estados Unidos
- [12] Kussul E., Rachkovskij D., Baidyk T., Talayev S. (1996) "Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment", *Micromechanical engineering and microequipment*, pp. 410 - 425
- [13] Okazaki Y., Mishima N., Ashida k. (2004), "Microfactory-Concept, History and Developments", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, pp. 837 - 844
- [14] Marín E., Ruiz L., Caballero A., Kussul E. (2004), "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)*, vol. 1 (no 5), pp. 182 – 187
- [15] López P. (Octubre 2005), "Diseño de un motor de pasos de alta potencia y propuesta de control adaptativo" Tesis de maestría. Área Eléctrica. DEPFI, UNAM.
- [16] McGeough, J. (2002). "Micromachining of engineering materials" Marcel Dekker, Inc. Estados Unidos.
- [17] Bourell, D. "Materials" WTEC. Workshop on Non-lithography-based micromanufacturing.
- [18] Kim B. H., Ryu S. H., Choi D. K., Chu C. N. (2004), "Micro electrochemical milling", pp. 124 – 129
- [19] Gilbertson R., Busch J. (1996), "A survey of micro-actuator technologies for future spacecraft missions", *The Journal of The British Interplanetary Society*, vol. 49, pp. 129 – 138

-
- [20] Cabal A., Ross D., Lebens J., Trauernicht D. (2005), "Thermal actuator with optimized heater for liquid drop ejector", pp. 531 – 539
- [21] Kim K. H., Yoon H. J., Jeong O. C., Yang S. S. (2004), "Fabrication and test of a micro electromagnetic actuator", Journal of micromechanics and microengineering, pp. 8 – 16
- [22] López T. (1975) "Automatismo y control" 2ª edición, Editorial Gustavo Gili. España
- [23] Kenjo T., Sugawara A. (1994) "Stepping motors and their microprocessor controls" 2ª edición. Clarence Press. Estados Unidos
- [24] Ito S., Iijima D., Hayashi A., Aoyama H., Yamanaka M. (2005) "Micro turning system: a super small CNC precision lathe for microfactories", Microfactory, vol. 1, pp. 50 – 55
- [25] Maekawa H., Komoriya K. (2001), "Development of a Micro Transfer Arm for a Microfactory", IEEE, pp. 1444 – 1451
- [26] Silva H. (Agosto, 2005), "Automatización de una micromáquina herramienta de primera generación" Tesis de licenciatura. Área Eléctrico Electrónico.
- [27] Naranjo J., Ascanio G., Kussul E. (2005) "Diseño de un micromotor neumático de aspas" Congreso SOMIM – SOBIM, pp. 1 – 5
- [28] Mataix C. (1998), "Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas" Ediciones del Castillo, S.A. España.
- [29] Viejo M., Palacios A. (1997). "Energía hidroeléctrica. Turbinas y plantas generadoras", Editorial Limusa. México.
- [30] White, F. (1988). "Mecánica de fluidos" McGraw-Hill. México
- [31] Viejo M. (1983), "Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones", Editorial Limusa. México.
- [32] Speich H., Bucciarelli A. (1978), "Oleodinámica", Editorial Gustavo Gili. Barcelona.

- [33] Catálogo de Verderflex “Bombas peristálticas”, pp. 1 – 8
- [34] Dickenson T. C. (1998), “Pumping Manual” Elsevier Science Ltd.
- [35] De Groot J. P. (1990), “Tecnología de los circuitos hidráulicos”, Ediciones CEAC. España.
- [36] Kussul E., Baidyk T., Ruiz-Huerta L., Caballero_Ruiz A., Velasco G. (2006) “Scaling down of microequipment parameters”, Precision Engineering, pp. 211 – 222
- [37] Naranjo J., Ascanio G., Kussul E. (2006), “Characterization of a pneumatic vanes micromotor without springs” SOMIM XXI, pp. 1 – 6