

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

## DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBAS DE UN PAR CINEMÁTICO PARA APLICACIONES DE CUARTOS LIMPIOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

( M E C Á N I C A )

P R E S E N T A :

J E S Ú S T R E N A D O S O T O



DIRECTOR DE TESIS:

M. I. LEOPOLDO ADRIÁN GONZÁLEZ GONZÁLEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D. F. 2005

# **AGRADECIMIENTOS**

**A MI MADRE:**

**CON TODO EL CARIÑO DE HIJO  
POR EL APOYO, COMPENSIÓN,  
AFECTO Y CONFIANZA INFINITA  
QUE SIEMPRE DEPOSITO EN MI**

**A LA MEMORIA DE MI PADRE:**

**QUE EN PAZ DESCANSE  
Y SE SIENTA ORGULLOSO DE MI**

**A MIS HERMANOS  
POR SU GRAN APOYO**

**A MIS PROFESORES, AMIGOS, COMPAÑEROS  
Y PERSONAL ADMINISTRATIVO DE LA SECCIÓN  
“GRACIAS”**

# Índice General

## **Capítulo 1: INTRODUCCIÓN**

---

Introducción .....	2
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Hipótesis .....	4

## **Capítulo 2: CUARTOS LIMPIOS (CLEAN ROOMS)**

---

2.1. Introducción .....	6
2.2. Cuartos limpios .....	6
2.3. Norma Americana FED-STD-209 .....	9

## **Capítulo 3: EL TEFLÓN**

---

3.1. Introducción .....	12
3.2. Teflón .....	12
3.3. Ventajas del Teflón .....	13
3.4. Las Propiedades del Teflón .....	14
3.4.1 Características del Teflón Reforzado con Otros Materiales .....	15

## **Capítulo 4: CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE LA EXTREMIDAD DEL ROBOT FROG LEG**

---

4.1. Introducción .....	18
4.2. Cinemática .....	19
4.2.1 Análisis de La Extremidad del Robot Frog Leg .....	19
4.2.2 Ecuación de Posición .....	21
4.2.3 Ecuación de Velocidad .....	23
4.2.4 Ecuación de Aceleración .....	24
4.3. Dinámica .....	26
4.3.1 Determinación de las Fuerzas Resultantes .....	29
4.3.2 Determinación de los Momentos Resultantes .....	32
4.3.3 Determinación de la Aceleración Angular Resultante “ $\ddot{q}$ ” .....	40
4.4. Resultados del Análisis Matemático .....	43
4.4.1 Resultados del Análisis Cinenámico .....	43
4.4.2 Resultados del Análisis Dinámico .....	47
4.5. Cálculos .....	51

**Capítulo 5: DISEÑO CONCEPTUAL**

---

5.1.	Introducción .....	53
5.2.	Definición del Problema .....	53
5.3.	Especificaciones y Requerimientos Generales .....	54
5.4.	Diseño Conceptual .....	54
5.4.1	Sistemas Funcionales .....	56
5.4.2	Matriz Morfológica .....	58
5.4.3	Evaluación de los Conceptos Generados .....	62

**Capítulo 6: DISEÑO DE DETALLE DEL COJINETE**

---

6.1.	Introducción .....	71
6.2.	Ley de Petroff .....	71
6.3.	Cálculo del Cojinete .....	74
6.4.	Dimensionamiento .....	76

**Capítulo 7: PRUEBAS Y RESULTADOS**

---

7.1.	Introducción .....	79
7.2.	Montaje .....	80
7.3.	Pruebas .....	83
7.4.	Resultados .....	85

<b>Conclusiones</b> .....	88
---------------------------	----

**ANEXOS**

---

Anexo A	Programa para el análisis de la cinemática y dinámica de la extremidad .....	90
Anexo B	Tablas de tolerancias.....	96

<b>Bibliografía</b> .....	99
---------------------------	----

# RESUMEN

## INTRODUCCIÓN

Se expone el diseño conceptual de una extremidad de un robot tipo “Frog Leg”, así como el diseño, y la fabricación de un cojinete de teflón, para ser usado en una de las articulaciones rotacionales de la extremidad del robot, por otro lado también se evaluará el nivel de partículas contaminantes generadas por el cojinete debidas a su funcionamiento,

### Hipótesis:

- ¿Un cojinete de teflón es mucho más barato que un rodamiento ultra-limpió?
- ¿Cumple con el mismo desempeño que un rodamiento ultra-limpió?
- ¿Es posible alcanzar un nivel de limpieza clase 1 con un cojinete de teflón?
- ¿Un cojinete de teflón puede competir con un rodamiento ultra-limpió?

## CUARTOS LIMPIOS

Los cuartos limpios son áreas delimitadas por paredes, techo, piso y accesos controlados. Esto se obtiene controlando el aire suministrado que es filtrado para este fin, y por la ligera presión positiva, previniendo que partículas del exterior entren al cuarto.

## TEFLÓN

El teflón químicamente llamado es un polímero, con la unidad que se repite de  $(F_2C-CF_2)$ . Es uno de los materiales más resistentes químicamente que se conocen sus propiedades lo hacen apto para ser empleado en múltiples aplicaciones.

Se exhiben las características y propiedades físicas del teflón.

## CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE LA EXTREMIDAD DEL ROBOT

Se presenta el modelado matemático de la articulación. con el fin de determinar la magnitud de la fuerza que tendrá que soportar el cojinete y usar este dato para su diseño.

## DISEÑO CONCEPTUAL.

Aplicación de la metodología de diseño para llevar acabo el diseño del cojinete y la propuesta de diseño conceptual de la extremidad del robot.

## DISEÑO DE DETALLE DEL COJINETE

Descripción breve sobre la ley de Petroff. Se presentan los requerimientos de diseño y los cálculos realizados para el diseño final.

## PRUEBAS Y RESULTADOS

Se presenta una descripción del montaje, pruebas y resultados de emisión de partículas realizadas al cojinete.

# CAPÍTULO 1.

# INTRODUCCIÓN

v

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Siguiendo la línea de investigación de “robots para cuartos limpios” que se ha venido desarrollando en el Centro de Diseño y Manufactura (CDM) desde hace unos años, y debido a la importancia de su aplicación en la industria de la microelectrónica, médica y estéril, se propone el siguiente trabajo en el cual se expone el diseño conceptual de una extremidad de un robot tipo “Frog Leg”, así como el diseño, y la fabricación de un cojinete de teflón, para ser usado en una de las articulaciones rotacionales de la extremidad del robot, por otro lado también se evaluará el nivel de emisión de partículas contaminantes generadas por el cojinete debidas a su funcionamiento, para determinar si es susceptible de emplearse en un robot para cuartos limpios.

En este caso el robot “frog leg”, tiene la finalidad de transportar discos de silicio en un arreglo radial de caseteras como se muestra en la figura 1.1. La razón principal de utilizar la configuración de este tipo de robot para transportar discos de silicio, es debido a que con esta configuración, se obtienen movimientos lineales a partir de pares cinemáticos rotacionales, los cuales tienden a producir una menor cantidad de partículas generadas por el desgaste mecánico que un par cinemático prismático. [Drof, 1982]

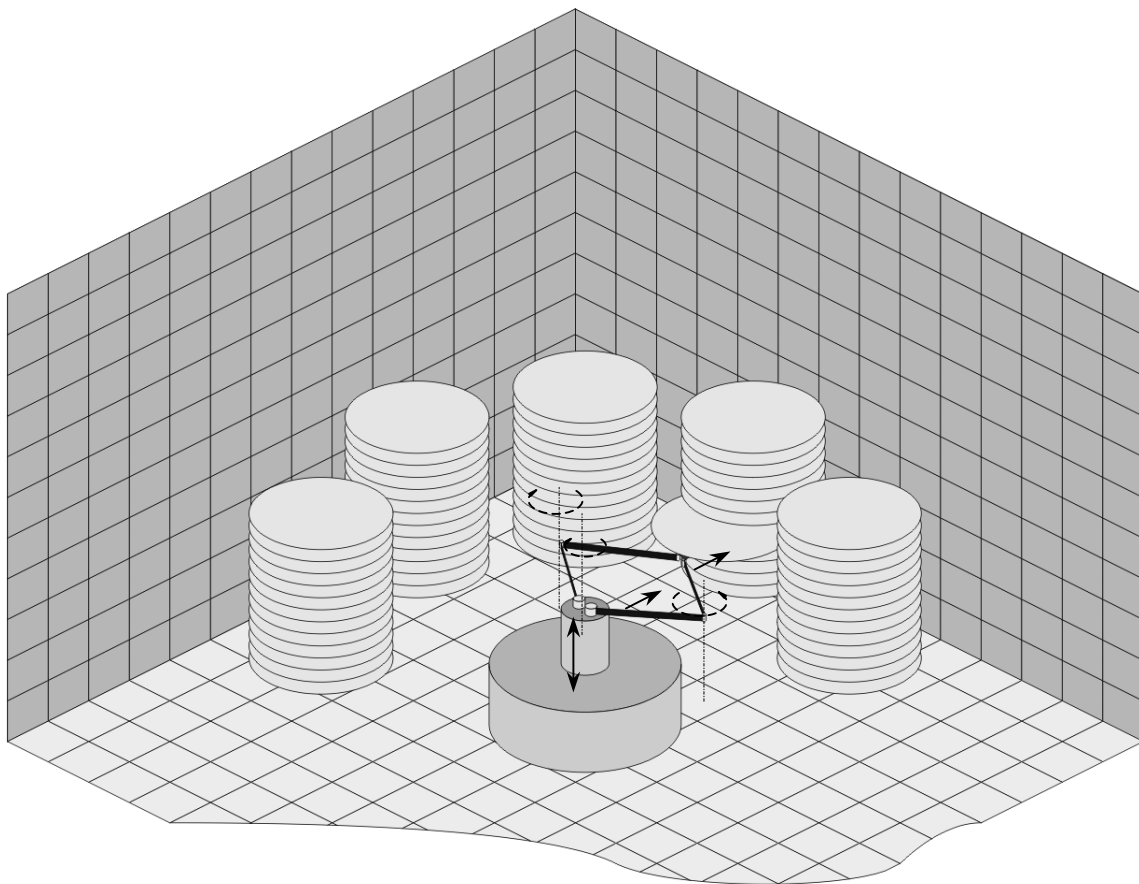


Figura 1.1. Arreglo radial de caseteras.



## 1.1. Antecedentes

En la actualidad las industrias experimentan avances tecnológicos muy rápidos, por ejemplo, en la industria de la microelectrónica. Los principales fabricantes investigan y desarrollan nuevos procesos de ultra escala de integración, desarrollando circuitos integrados cada vez más pequeños y complejos, pero dicha miniaturización de los circuitos los ha hecho más susceptibles (vulnerables) a partículas contaminantes que se encuentran en el medio ambiente, y a las que se generan dentro de los mismos procesos de producción.

Debido a lo anterior, los circuitos integrados deben ser manufacturados en áreas de trabajo llamadas cuartos limpios (clean rooms), que son áreas cerradas donde la cantidad de partículas es controlada por la aplicación de un flujo laminar de aire descendente, el flujo de aire primero barre las partículas de polvo conduciéndolas hacia los sistemas de filtrado en la parte inferior del cuarto limpio, y posteriormente este aire es reciclado hacia los sistemas de filtrado y después hacia los generadores del flujo laminar.

Lograr bajos niveles de partículas contaminantes no es una tarea fácil, por ejemplo, el ambiente de una oficina típica se puede clasificar según la norma [FED STD 209 E], como clase 100,000, esto quiere decir que existen 100,000 partículas de 0.5 micras de diámetro o mayor en una muestra de aire de un pie cúbico. Para apreciar el tamaño de las partículas, en la figura 1.2. se muestra la comparación entre un cabello humano y una partícula de 0.5 micras de diámetro, también se puede mencionar como ejemplo, el polvo común casero, el cual presenta diámetros entre 0.01 a 5.0 micras, el humo del tabaco de 0.01 a 0.5 micras, las células de la piel humana van de 1.0 a 50.0 micras [Papanek, 87].

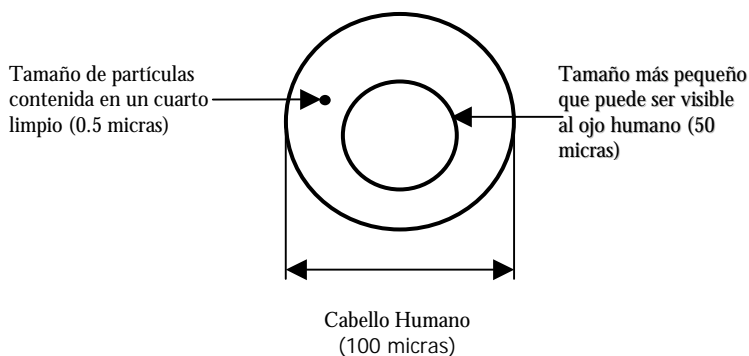


Figura 1.2. Comparación de tamaño entre un cabello humano y una partícula de 0.5 micras de diámetro.

En la literatura se han encontrado documentos que han demostrado que un robot genera menos partículas contaminantes que un operador humano, a pesar de lo anterior, un robot tradicional genera un número de partículas que rebasa los requerimientos de los procesos actuales, por lo tanto, robots especiales han sido diseñados para alcanzar las especificaciones y criterios de un cuarto limpio, considerando principalmente la norma American Federal Standard (FED STD 209 E) y la norma japonesa (JIS B 9920). [Goldstein, 92].

Los robots para cuartos limpios son empleados en la industria de la microelectrónica y de semiconductores principalmente para la manipulación de discos de silicio. En la industria química, para el manejo y el control de procesos. En la industria farmacéutica y de la medicina, para el empaque, manejo e incluso asistir en una cirugía. En la industria alimentaria, para el manejo de productos estériles. En todas estas industrias, los robots brindan una alta precisión, destreza, velocidad y limpieza.

El futuro de los robots para cuartos limpios es muy prometedor. La combinación de requerimientos más estrictos en cuanto la generación de partículas contaminantes junto con los requerimientos ergonómicos, inevitablemente lleva a la investigación y desarrollo de robots más limpios. [Trenado, 1999].

Por lo que en este trabajo se pretende realizar el diseño de un cojinete fabricado con teflón y determinar si este es capaz de trabajar en robots para cuartos limpios.

## 1.2. Objetivos

- Diseñar y fabricar un cojinete de teflón para evaluar el nivel de emisión de partículas contaminantes generadas por el funcionamiento de este montado en un par cinemático rotacional, y determinar si es susceptible de ser utilizado en un cuarto limpio.
- Comparar un cojinete de teflón con un rodamiento ultra-limpio.

## 1.3. Hipótesis

Después de la revisión bibliográfica no se encontró información de si una articulación rotacional que utilice un cojinete de teflón es apta para ser usada en un robot para ambientes controlados, lo que lleva a formular las siguientes hipótesis:

- Un cojinete de teflón cumple con el mismo desempeño (vida útil) que un rodamiento ultra-limpio.
- Un cojinete de teflón tiene un nivel de limpieza clase 10.
- Un cojinete de teflón compite con un rodamiento ultra-limpio.
- Un cojinete de teflón es mucho más barato que un rodamiento ultra-limpio.

# CAPITULO 2.

# CUARTOS LIMPIOS (CLEAN ROOMS)

## CAPITULO 2. CUARTOS LIMPIOS (CLEAN ROOMS)

### 2.1. Introducción

En este capítulo se explica lo que es un cuarto limpio y sus características más importantes, así como se presenta la norma americana FED-STD-209 con la que se clasifica los niveles de limpieza de un cuarto limpio

### 2.2. Cuartos Limpios.

Los cuartos limpios son áreas delimitadas por paredes, techo, piso y accesos controlados. Esto se obtiene debido al control del aire suministrado que es filtrado por equipos diseñados para este fin, y por la ligera presión positiva que se tiene en el cuarto, previniendo que partículas del exterior se dirijan al interior del cuarto.

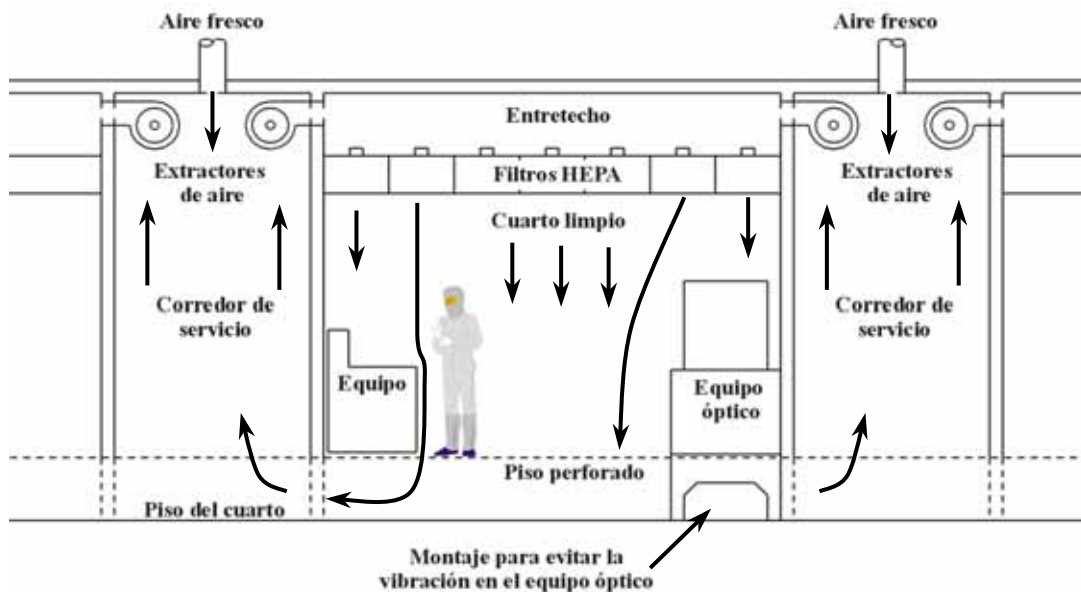


Figura 2.1. Sección transversal de un cuarto limpio.

El diseño de un cuarto limpio abarca más que el tradicional diseño de un lugar con aire acondicionado que solo controla la temperatura y la humedad. En el diseño de un cuarto limpio también se debe tener control sobre las partículas contenidas en el aire, control del flujo del aire, ruido y vibración, así como aspectos de ingeniería industrial tienen que ser considerados.

Actualmente, al continuo desarrollo en el diseño de cuartos limpios y tecnología de filtrado, han permitido áreas de fabricación como la mostrada en la figura 2.1.

En los diseños actuales, la filtración de aire con filtros HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) o filtros ULPA (*Ultra Low Penetration Air*) se colocan en el techo con retorno en el piso, o ranura en la parte baja de las paredes proporcionando un continuo flujo de aire limpio. (En el piso existen perforaciones que permiten que el aire filtrado pase a través de este).

Uno de los parámetros más importantes en un cuarto limpio es su tiempo de recuperación, que es el tiempo necesario para que este vuelva a obtener las condiciones de limpieza para el que fue diseñado después de alguna perturbación.

Otros factores importantes en el control de partículas son los parámetros de la humedad y la temperatura los cuales deben estar bajo control en un cuarto limpio.

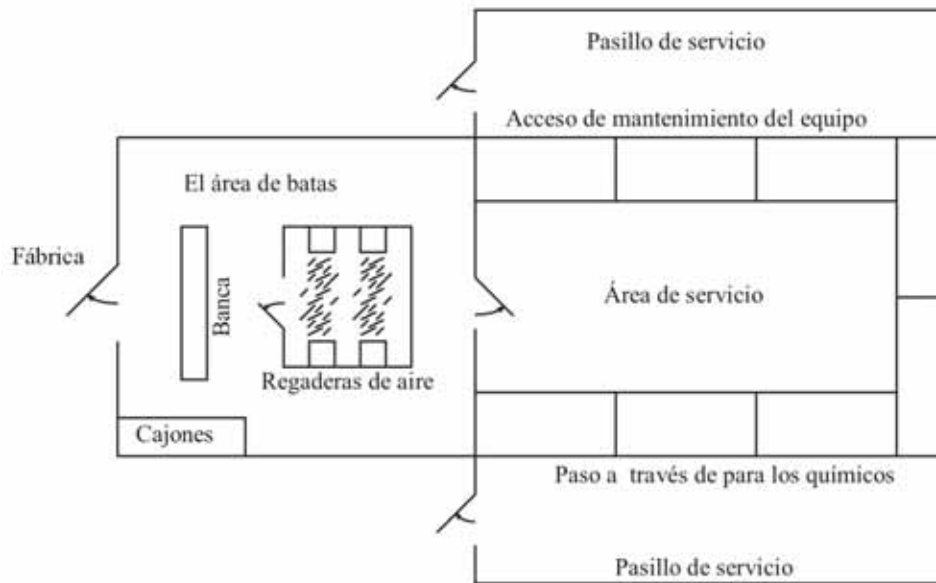


Figura 2.2. Cuarto limpio

Hay que tener en cuenta que muchos procesos no requieren que se tenga control sobre la temperatura, más sin embargo esto es necesario para el confort de los operarios.

Un factor crítico es la humedad ya que la condensación de esta sobre los productos es considerada como contaminación.

Un cuarto limpio debe de ser una construcción sellada, en la cual se deben de utilizar solo materiales que no contaminen y deben de usarse sistemas y elementos que eviten la contaminación accidental del exterior o de los operadores.

Los aceros inoxidable son recomendados para ser utilizados en las superficies de trabajo. Se debe de evitar en lo posible de superficies en donde se pueda coleccionar el polvo.

Es recomendable colocar a la entrada del cuarto un tapete con superficie adhesiva lo que evita que entren las partículas de la suela de los zapatos de trabajo del personal que ingrese al cuarto limpio.

Otra recomendación es que el acceso al cuarto limpio cuente con una antecámara y varias puertas, (sistema de esclusas) las cuales nunca se deben abrir al mismo tiempo, este procedimiento asegura que el cuarto limpio nunca sea expuesto directamente a áreas sucias como se muestra en la figura 2.2., el

personal que ingrese al cuarto limpio antes debe pasar a la antecámara, que es donde el personal se cambia, posteriormente este pasa por un sistema de limpieza que los prepara para el ingreso al cuarto, este sistema de limpieza consiste de regaderas de aire limpio con un flujo de alta velocidad (se sopletean en una ducha de aire).

Es importante que el cuarto limpio tenga una presión positiva con respecto a la antecámara y al resto de la fábrica, esto es con el fin de que partículas de la antecámara y de la fábrica misma no puedan entrar cuando las puertas del cuarto limpio son abiertas.

Todos los equipos, herramientas y materiales que entren a un cuarto limpio deben de ser limpiados antes de entrar.

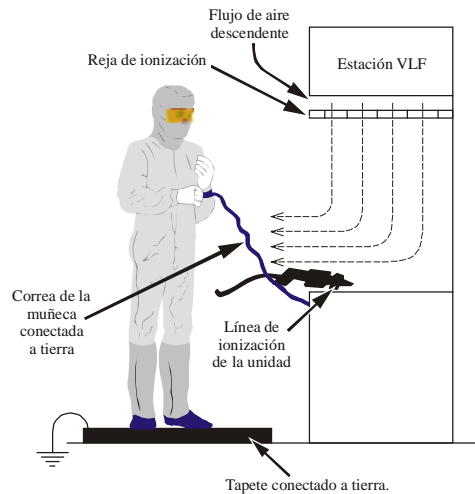


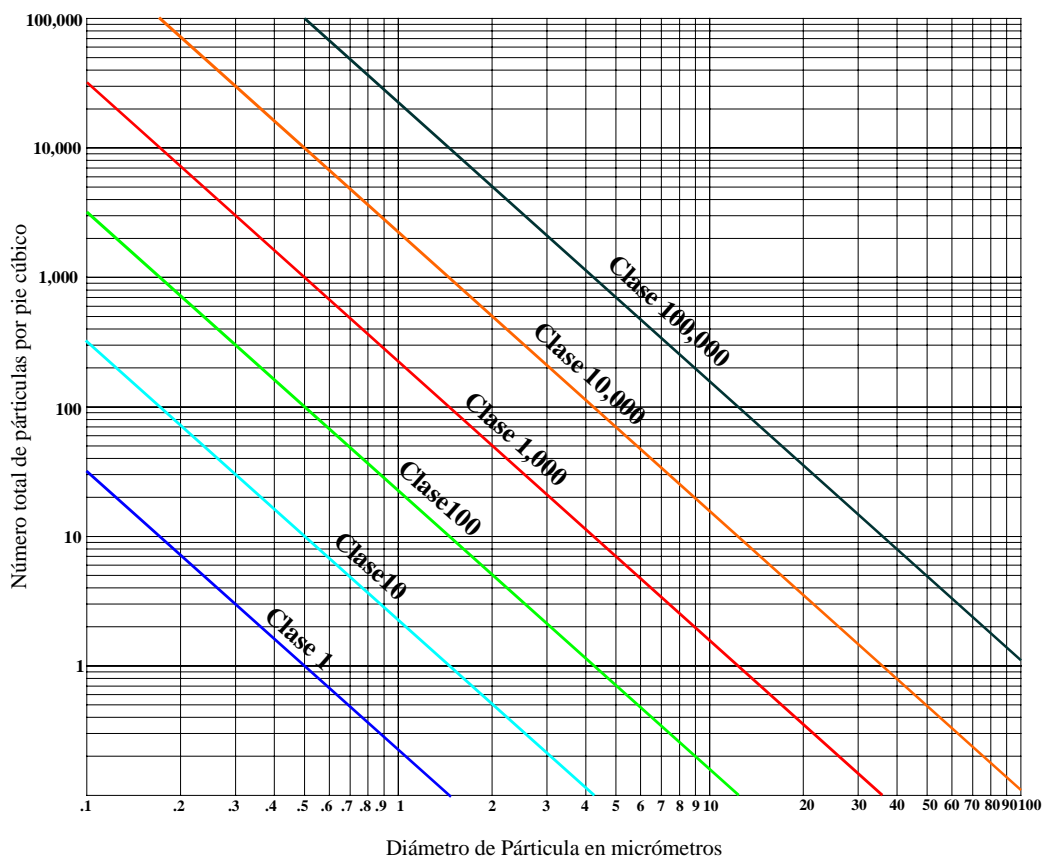
Figura 2.3. inclusión de ionizadores a los procesos.

Una de las fuentes de contaminación es la provocada por la carga estática que se puede generar en el producto, equipos, herramientas y superficies de trabajo; esto ocasiona que las partículas que se encuentran en la ropa del personal o en el ambiente sean atraídas por estos. Las cargas estáticas son controladas por métodos de descarga. Entre estas técnicas de prevención se puede mencionar el uso de materiales antiestáticos, recubrimientos antiestáticos, ionizadores, aplicación de soluciones a las superficies, conexiones a tierra, correas de descarga estática, etc., como se muestra en la figura 2.3.

### 2.3. Norma Americana FED-STD-209;

Hoy en día el documento más usado en la clasificación de los cuartos limpios es la Norma Americana FED-STD-209; los cuartos limpios se clasifican en niveles de limpieza o Clases de acuerdo a la cantidad de partículas permitidas en una unidad de volumen de aire. En la gráfica 2.1., se presentan los diferentes niveles de limpieza para áreas limpias. Las industrias de alta tecnología como la microelectrónica y la de semiconductores requieren trabajar en ambientes con un nivel de limpieza Clase 1.

En la tabla 2.1., se muestran los valores para los diferentes niveles de clases en los que se clasifican los cuartos limpios además de la equivalencia de la norma americana FED-STD-290E con la norma ISO.



Gráfica 2.1. Relación entre número de partículas y diámetro de partículas (micras)

Clase	FED-STD -290E	0.1 μm		0.2 μm		0.3 μm		0.5 μm		5 μm	
		m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	ft <sup>3</sup>
M1		350	9.91	75.7	2.14	30.9	1	10	0		
M1.5	1	1,240	35	265	7.5	106	3	35.3	1		
M2		3,500	99.1	757	21.4	30	8.75	100	3		
M2.5	10	12,400	350	2,650	70	1,060	30	353	10		
M3		35,000	991	7,570	214	3,090	87.5	1,000	28		
M3.5	100			26,500	750	10,600	300	3,530	100		
M4				75,700	2,140	30,900	875	10,000	283		
M4.5	1,000							35,300	1,000	247	7
M5								100,000	1,830	618	18
M5.5	10,000							353,000	10,000	2,470	70
M6								1,000,000	28,300	6,180	175
M6.5	100,000							3,530,000	100,000	24,700	700
M7								10,000,000	283,000	61,800	1,750

Tabla 2.1. Clasificación de los cuartos limpios según la “Federal Standard 209-E”.



# CAPITULO 3.

# EL TEFLÓN

## CAPITULO 3 EL TEFLÓN

## 3.1. Introducción

En este capítulo se explica que es el teflón algunas de sus propiedades y ventajas, así como las características más importantes del teflón virgen y del teflón reforzado con otros materiales, aplicaciones más comunes en la industria y propiedades físicas.

## 3.2. Teflón

El politetrafluoretileno (PTFE) o mejor conocido por su marca comercial como teflón es un polímero, con la unidad que se repite de  $(F_2C-CF_2)$ . En las figuras 3.1a y 3.1b se muestra la estructura de este material.

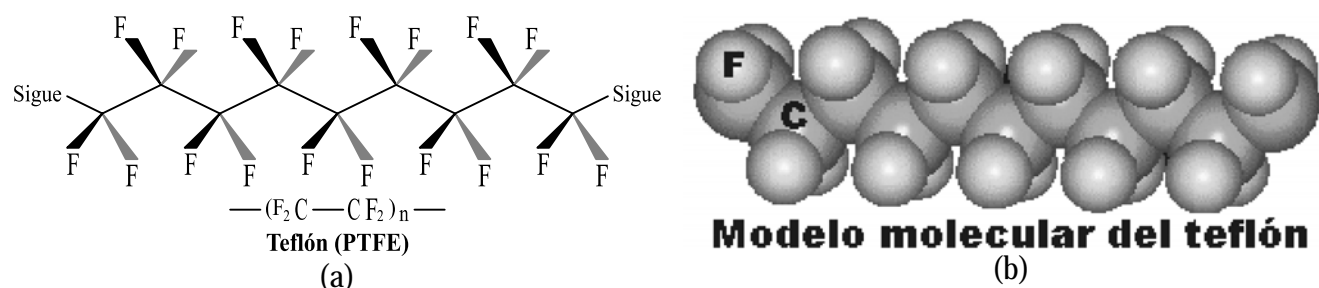


Figura 3.1. (a) Estructura molecular del teflón. (b) Modelo molecular del teflón

[www-1]

El PTFE es uno de los materiales más resistentes químicamente que se conocen, ya que sólo es atacado por productos como el sodio fundido o el flúor nascente. Sus propiedades lo hacen apto para ser empleado en múltiples aplicaciones como, por ejemplo, el recubrimiento de sartenes y otros utensilios de cocina a modo de antiadherente. Se emplea también en funciones tan diversas como la construcción de diminutos cojinetes de pequeños mecanismos, y en la fabricación de válvulas cardíacas y casquillos aislantes en acoplamientos para altas frecuencias.

Aunque se trata de un termoplástico, no puede moldearse dado que su viscosidad en fundido es tan alta que no puede moverse la masa utilizando máquinas convencionales. Para obtener piezas hay que recurrir al prensado en frío del polímero en polvo, para sinterizar después el bloque y proceder a su posterior mecanización. La dificultad de aplicación hace que se trate de un plástico caro. Debido a estas dificultades se han desarrollado variantes que permiten el moldeo, entre ellos el copolímero de etileno y fluoretileno, PETFE.

[www-4]

### 3.3. Ventajas del Teflón.

Entre las ventajas más relevantes del teflón se pueden mencionar:

- Es capaz de resistir temperaturas de unos 300° C durante largos periodos sin apenas sufrir modificaciones.
- Es resistente a la mayoría de los ácidos y las bases.
- Es resistente (insoluble) a muchos disolventes orgánicos. [www-1]
- Frente al agua presenta una resistencia completa y una absorción absolutamente nula.
- Es incombustible, flexible y antiadherente.
- No absorbe olores ni sabores.
- Es aislante eléctrico
- Presenta una resistencia total al envejecimiento y a los rayos ultravioletas. [www-2]

A continuación se mencionan algunas de las características mas importantes del teflón

#### **Anti-adherencia**

Ninguna sustancia se adhiere permanentemente en un recubrimiento de teflón aún los productos que contienen propiedades muy adherentes: pegamentos, plásticos y otros, se deslizan al contacto con el teflón.

#### **Estabilidad térmica**

El producto recubierto con teflón resiste temperaturas muy bajas desde -450 °F hasta temperaturas muy elevadas 550 °F sin perder ninguna de sus propiedades.

#### **Propiedades eléctricas**

Sobre un amplio rango de frecuencias el teflón tiene una alta fuerza dieléctrica, un factor bajo de disipación y muy alta resistencia superficial. Además el teflón puede ser utilizado como conductor para disipar la estática.

#### **Resistencia química**

El teflón no es atacado prácticamente por ningún producto químico, por lo tanto no es afectado al estar en contacto con ambientes corrosivos.

#### **Bajo coeficiente de fricción**

El coeficiente de fricción del teflón es más bajo que el de cualquier sólido conocido, se encuentra generalmente en un rango de 0.05 a 0.20.

#### **Anti-permeable**

Una superficie cubierta con teflón es oleofásica e hidrofásica, permitiendo también que la limpieza de la superficie sea más fácil.

#### **Grado alimenticio**

Sus propiedades térmicas y antiadherentes lo hacen ideal para trabajar en contacto con alimentos.

[www-3]

### 3.4. Las Propiedades del Teflón

Las propiedades del teflón se deben básicamente a que los átomos de flúor crean una especie de barrera que dificulta el ataque de agentes químicos sobre la estructura carbonada del mismo.

El teflón fue patentado para utensilios de cocina en 1960. El teflón, además de evitar que los alimentos se peguen en ollas y sartenes, en la actualidad se utiliza en la refrigeración, plásticos, revestimiento para hilos eléctricos y cables, vainas de protección, bobinado de motores, articulaciones de prótesis, diafragmas y membranas y en la industria aeroespacial, especialmente para fabricar trajes espaciales. [www-2]

Desarrollo en la industria:

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones más comunes de la industria en general, debido a sus propiedades y características.

- Placas selladoras
- Rodillos de impresoras
- Agitadores
- Dosificadores
- Rodillos textiles
- Matrices de inyección
- Rodillos antiadherentes
- Cojinetes
- Asientos para válvulas
- Empaques



[www-5]

Figura 3.2. Ejemplos de algunas de las aplicaciones del teflón en el hogar y la industria

### 3.4.1. Características del Teflón Reforzado con Otros Materiales.

El Teflón PTFE Virgen por sus extraordinarias propiedades antiadherentes, resistencia a los químicos, temperaturas extremas y por tener el más bajo coeficiente de fricción respecto a cualquier sustancia sólida, ofrece numerosas aplicaciones en todo tipo de industria, especialmente en la industria papelera, química, petrolera, eléctrica, nuclear, metalúrgica, farmacéutica, alimenticia, etc.

Aunque las propiedades del teflón son tales, que se ha vuelto indispensable en la industria para resolver una serie de problemas muy difíciles y complejos, existen algunas aplicaciones específicas en donde las propiedades del teflón tienen que ser mejoradas tales como expansión térmica, conductividad térmica, resistencia al desgaste y fenómeno electrostático generado por la fricción, que se obtienen incorporando al teflón alguna CARGA. Por lo que se le ofrece las siguientes alternativas:

- **Combinado con carbón ofrece:**

Excelente comportamiento a la compresión y resistencia al desgaste.

Buena conductividad térmica, baja permeabilidad. Es una de las cargas más inertes, excepto en medios ácidos en donde la fibra de vidrio se comporta mejor. Por su contenido de carbón se vuelve antiestático. Es bueno en uso húmedo.

Sus principales aplicaciones son: Ampliamente utilizado en sellos donde requiere gran resistencia al desgaste bajo alta presión (anillos de pistón para compresores no lubricados, cojinetes).

- **Combinado con grafito:**

Sus principales características son: Buena conductividad térmica, bajo coeficiente de fricción y baja permeabilidad, tiene excelentes propiedades de resistencia al desgaste, especialmente con metales blandos.

Sus principales aplicaciones son: En sellos dinámicos donde la auto lubricidad es importante (juntas de amortiguadores).

- **Combinado con bisulfuro de molibdeno:**

Sus principales características son: Bajo coeficiente de fricción (estática), buena conductividad térmica, resistencia al desgaste. Tiene poco efecto en sus características eléctricas. Es poco reactivo a químicos. Buena elasticidad.

Sus principales aplicaciones son: En sellos dinámicos donde la auto lubricidad es importante, generalmente va combinado con fibra de vidrio o bronce. (cojinetes, anillos de sellos, anillos para pistón).

- **Combinado con bronce:**

Sus principales características son: Excelente resistencia al desgaste y a la compresión. Buena conductividad térmica. Buen coeficiente de fricción cuando se combina con bisulfuro de molibdeno o con grafito. No es bueno para aplicaciones eléctricas y es atacado por algunos químicos.

Sus principales aplicaciones son: Sellos dinámicos donde se requiere de alta resistencia al desgaste sometido a mucha compresión, pero cuando la resistencia química no es importante. (anillos de compresión, cojinetes y sistemas hidráulicos).

- **Combinado con fibra de vidrio:**

Sus principales características son: Mejora la resistencia a la compresión y al desgaste, mejora la resistencia a la fricción del teflón en alta y baja temperatura. Excelente estabilidad química, excepto fuertes alcalis y ácido fluorídrico. Tiene mejor conductividad térmica y coeficiente de fricción cuando es combinado con bisulfuro de molibdeno o con grafito. Tiene excelentes propiedades eléctricas.

Sus principales aplicaciones son: Es la carga más usual para sellos cuando hay rotación y alternación en los movimientos (aplicación en uso neumático, hidráulico, cojinetes, anillos para pistón, asientos para válvulas y partes mecánicas).

- **Combinado con acero inoxidable:**

Sus principales características son: Mejora la resistencia a la compresión, tiene baja permeabilidad.

Sus principales aplicaciones son: Es bueno en aplicaciones cuando se requiere de alta compresión y resistencia química, es bueno en aplicaciones dinámicas (sellos y cojinetes para cierta maquinaria de la industria alimenticia).

En la tabla 3.1. se presentan algunas de las propiedades físicas del teflón virgen y teflón reforzado.

Propiedades	Unidad	Tipos de teflón					
		Virgen	Fivi 25%	Carb 25%	Fivi/Mos%	Bce 60%	Grafi 15%
Gravedad Especifica	-	2.16	2.24	2.12	2.26	3.93	2.16
Dureza Shore D	-	55	58	63	59	64	56
Resistencia Tensil	kg/cm <sup>2</sup>	250-300	175-185	160-200	174-225	170-190	150-230
Elongación a la Ruptura	%	250-300	230-250	80-100	230-240	130-150	195-240
Deformación bajo Presión (140 kgs/cm <sup>2</sup> 24 horas a 23 °C)	%	9.5-11	10-11.5	5-6	4.8-5	5-5.5	9-10
Deformación Permanente (después de 24 horas a 23 °C)	%	5-5.5	4.5-6	1.8-2.2	2.6-2.8	1.7-1.9	4.5-5
Coefficiente de Dilatación Térmica a 25-100 °C	10-5/°C	12-13	8-12	7-12	6.4-20.8	8-8.5	8-13.5
Coefficiente de Fricción Estática (velocidad 150mm/min, presión: 5grs/cm <sup>2</sup> , tem. 23 °C)	-	0.08	0.17	0.15	0.06	0.19	0.13
Coefficiente de Fricción Dinámica (velocidad 150mm/min, presión: 5grs/cm <sup>2</sup> , tem. 23 °C)	-	0.06	0.14	0.11	0.09	0.17	0.10
Coefficiente de Desgaste pv= 100(kg m/cm <sup>2</sup> min) (cm <sup>3</sup> min/kg m h)10 -8 velocidad: 30 m/mi	-	20-25	10-20	30-40	6	10-15	1.750
Volumen de Resistividad	OHM. cm	10 18	10 15	10 4	10 15	10 7	10 7
Temperatura de Fusión	°C	327	327	327	327	327	327
Temperatura de Servicio	°C	260	260	260	260	260	260

Tabla 3.1. Propiedades físicas del teflón virgen y teflón reforzado

[www-6]

Por lo tanto, para nuestro caso se utilizará como uno de los datos importantes para el diseño del cojinete el coeficiente de fricción dinámica del teflón virgen.

# CAPÍTULO 4.

# CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE LA EXTREMIDAD DEL ROBOT FROG LEG

## CAPÍTULO 4. CINEMÁTICA Y DINÁMICA DE LA EXTREMIDAD DEL ROBOT FROG LEG

### 4.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelado matemático de una articulación de un grado de libertad. El objetivo de este análisis es determinar la magnitud de la fuerza que tendrá que soportar el cojinete de teflón y usar este dato para su diseño, para lo cual se generan las ecuaciones de posición, velocidad y aceleración por cinemática inversa.

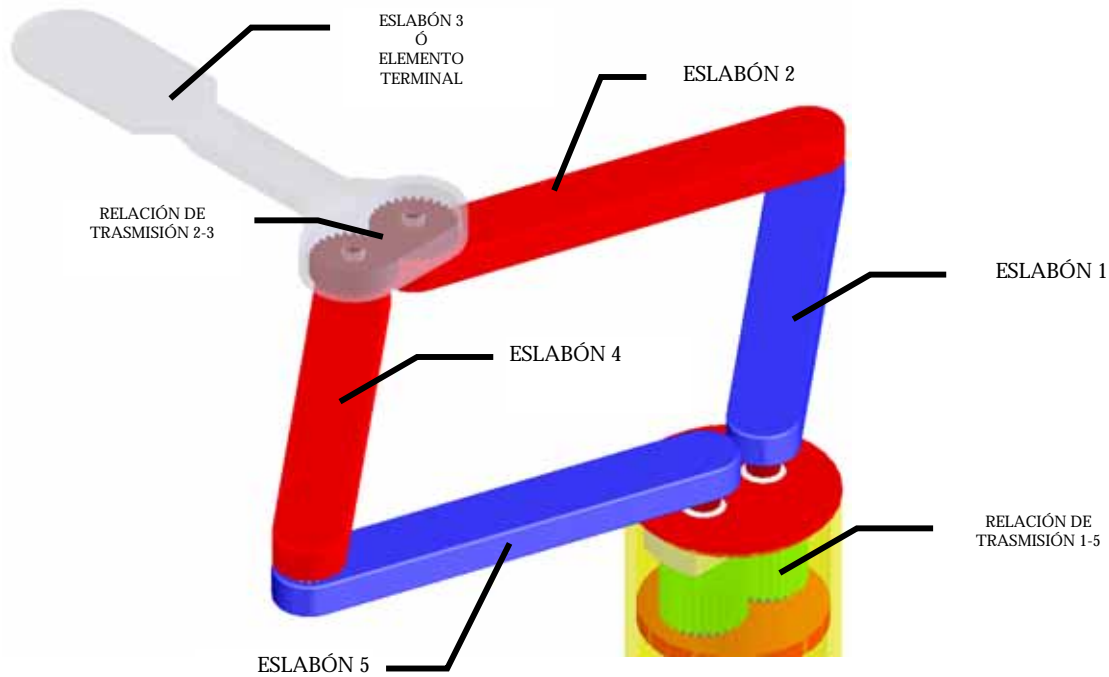


Figura 4.1. Extremidad de un robo Frog Leg

La extremidad del robot tipo Frog Leg es una cadena cinemática cerrada formada por 5 cuerpos rígidos como se muestra en la figura 4.1. acoplados por medio de juntas rotacionales, existe una relación de transmisión (engranes) uno a uno entre los eslabones 1 - 5 y eslabones 2 - 4, esto es lo que permite que el elemento terminal tenga como resultado un desplazamiento lineal.

A continuación se presentan los siguientes datos de referencia para llevar a cabo el análisis:

Desplazamiento total del elemento terminal	$y_p = 29 \text{ cm}$
Velocidad del elemento terminal	$v_p = 0.45 \text{ m / seg.}$
Aceleración del elemento terminal.	$a_p = 0 \text{ m/seg.}^2$



## 4.2. Cinemática

### 4.2.1. Análisis de la Extremidad del Robot Frog Leg

En la figura 4.2 se muestra el esquema para determinar la posición  $y_p$  del punto P localizado en el Elemento Terminal (E.T.).

De la figura 4.2. se observa que las coordenadas del punto P dependen de:

$$\theta_4 = \theta_1, \quad \text{“Relación 1”}$$

$$\theta_2 = \theta_5, \quad \text{“Relación 2”}$$

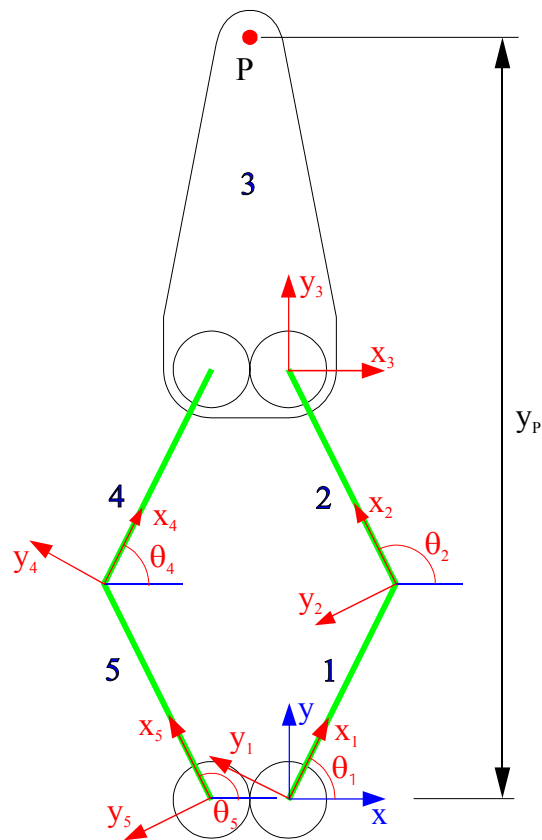


Figura 4.2. Esquema de la extremidad del robot

De la figura 4.3 se establece que:

$$\begin{aligned} (x_1 &= x_5) \\ (y_1 &= y_5) \\ y \\ (d_1 &= d_5) \end{aligned}$$

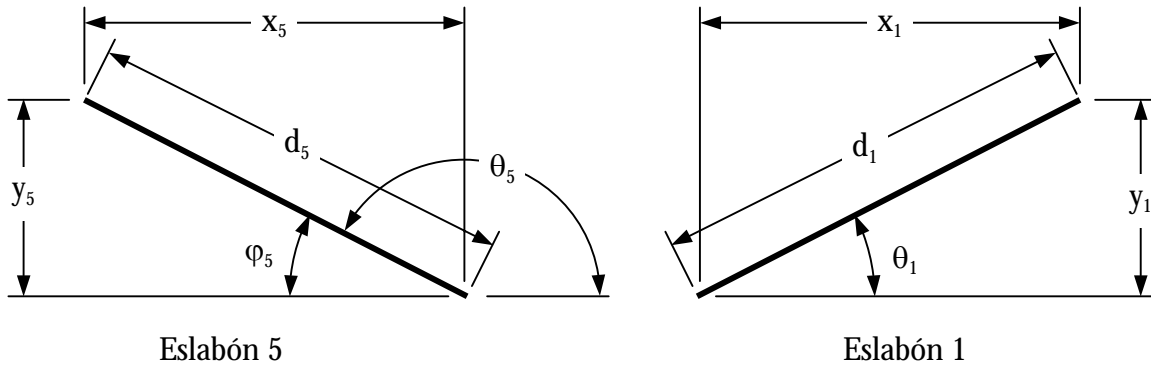


Figura 4.3. Relación entre los eslabones 1 y 5

por lo que:

$$\theta_1 = \varphi_5$$

como:

$$\theta_5 + \varphi_5 = 180^\circ$$

despejando  $\theta_5$  se tiene que:

$$\theta_5 = 180^\circ - \varphi_5$$

ya que  $\theta_1 = \varphi_5$  entonces:

$$\theta_2 = 180 - \theta_1 \quad \text{“Relación 3”}$$

y las variables son:

$$y_p = ?$$

$$\theta_1 = ?$$

De las figuras 4.2., y 4.3., se observa que la posición del órgano terminal solo depende del ángulo  $\theta_1$ , por lo que si se da el valor de la variable  $y_p$ , se calcula  $\theta_1$ ,

4.2.2. Ecuación de Posición.

Dado que la extremidad es simétrica se usa el esquema de la figura 4.4 para obtener la ecuación de posición.

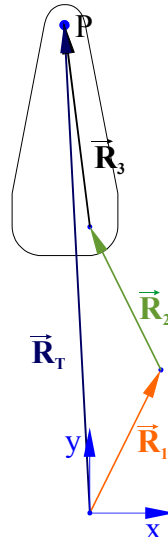


Figura 4.4. Diagrama de los vectores de posición

De la suma de vectores de posición de la figura 4.4 se define la posición del punto P por la ecuación (4.1).

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \vec{R}_3 = \vec{R}_T \quad (4.1)$$

donde:

$$\vec{R}_1 = [R_{\theta_1}] r_1 \quad (4.2)$$

como;

$$[R_{\theta_1}] = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 \\ \text{sen}\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

y

$$r_1 = \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

entonces;

$$\vec{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 \\ \text{sen}\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cdot d_1 \\ \text{sen}\theta_1 \cdot d_1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

donde:

$$\vec{\mathbf{R}}_2 = [\mathbf{R}_{\theta_2}] \mathbf{r}_2 \quad (4.6)$$

como;

$$[\mathbf{R}_{\theta_2}] = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 \\ \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

y

$$\mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} d_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

entonces;

$$\vec{\mathbf{R}}_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 \\ \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 \cdot d_2 \\ \text{sen}\theta_2 \cdot d_2 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

donde:

$$\vec{\mathbf{R}}_3 = \begin{bmatrix} -x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

y donde:

$$\vec{\mathbf{R}}_T = \begin{bmatrix} -x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.5), (4.9), (4.10) y (4.11) en la ecuación (4.1) se obtienen las ecuaciones (4.12) y (4.13) para determinar la posición del punto P:

$$\cos \theta_1 \cdot d_1 + \cos \theta_2 \cdot d_2 - x_3 = -x_p \quad (4.12)$$

$$\text{sen } \theta_1 \cdot d_1 + \text{sen } \theta_2 \cdot d_2 + y_3 = y_p \quad (4.13)$$

### 4.2.3. Ecuación de Velocidad.

Derivando la ecuación (4.1) con respecto al tiempo se obtiene la ecuación (4.14), la cual se utiliza para determinar la velocidad del punto P.

$$\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = \vec{V}_T \quad (4.14)$$

donde:

$$\vec{V}_1 = [\mathbf{w}_1] \vec{R}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_1 \\ \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cdot d_1 \\ \text{sen } \theta_1 \cdot d_1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

donde:

$$\vec{V}_2 = [\mathbf{w}_2] \vec{R}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_2 \\ \omega_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cdot d_2 \\ \text{sen } \theta_2 \cdot d_2 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

donde:

$$\vec{V}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

donde:

$$\vec{V}_T = \begin{bmatrix} 0 \\ v_p \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

sustituyendo las ecuaciones (4.15), (4.16), (4.17) y (4.18) en la ecuación (4.14), se obtiene:

$$-\omega_1(\text{sen } \theta_1 \cdot d_1) - \omega_2(\text{sen } \theta_2 \cdot d_2) + 0 = 0 \quad (4.19)$$

$$\omega_1(\cos \theta_1 \cdot d_1) + \omega_2(\cos \theta_2 \cdot d_2) + 0 = v_p \quad (4.20)$$

despejando  $\omega_1$  de la ecuación (4.19) se tiene:

$$\omega_1 = -\frac{\omega_2 \cdot \text{sen } \theta_2 \cdot d_2}{\text{sen } \theta_1 \cdot d_1} \quad (4.21)$$

y substituyendo  $\omega_1$  en la ecuación (4.20) se tiene:

$$\omega_2 = \frac{v_p}{-\frac{(\text{sen } \theta_2 \cdot d_2)}{(\text{sen } \theta_1 \cdot d_1)} + (\cos \theta_2 \cdot d_2)} \quad (4.22)$$

Sustituyendo el valor de la velocidad del punto P,  $v_p$  de 0.45 m/s (dato de referencia) y los valores de las longitudes de los eslabones  $d_1$  y  $d_2$  de 0.16 m, se pueden calcular  $\omega_1$  y  $\omega_2$ .

#### 4.2.4. Ecuación de Aceleración

Derivando la ecuación (4.1) dos veces con respecto al tiempo se obtiene la ecuación (4.23) para determinar la aceleración del punto P.

$$\vec{A}_1 + \vec{A}_2 + \vec{A}_3 = \vec{A}_p \quad (4.23)$$

donde:

$$\vec{A}_1 = [A_1] \vec{R}_1 \quad (4.24)$$

como;

$$[A_1] = \begin{bmatrix} -(\omega_1)^2 & -\alpha_1 \\ \alpha_1 & -(\omega_1)^2 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

entonces;

$$[A_1] = \begin{bmatrix} -(\omega_1)^2 & -\alpha_1 \\ \alpha_1 & -(\omega_1)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cdot d_1 \\ \sin \theta_1 \cdot d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\omega_1)^2 \cdot \cos \theta_1 \cdot d_1 - \alpha_1 \cdot \sin \theta_1 \cdot d_1 \\ \alpha_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot d_1 - (\omega_1)^2 \cdot \sin \theta_1 \cdot d_1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

donde:

$$\vec{A}_2 = [A_2] \vec{R}_2 \quad (4.27)$$

como;

$$[A_2] = \begin{bmatrix} -(\omega_2)^2 & -\alpha_2 \\ \alpha_2 & -(\omega_2)^2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

entonces;

$$[A_2] = \begin{bmatrix} -(\omega_2)^2 & -\alpha_2 \\ \alpha_2 & -(\omega_2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cdot d_2 \\ \sin \theta_2 \cdot d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\omega_2)^2 \cdot \cos \theta_2 \cdot d_2 - \alpha_2 \cdot \sin \theta_2 \cdot d_2 \\ \alpha_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot d_2 - (\omega_2)^2 \cdot \sin \theta_2 \cdot d_2 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

donde:

$$\vec{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

donde:

$$\vec{A}_T = \begin{bmatrix} 0 \\ a_p \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

sustituyendo las ecuaciones (4.26), (4.29), (4.30) y (4.31) en la ecuación (4.23), se obtienen:

$$-(\omega_1)^2 \cdot \cos \theta_1 \cdot d_1 - \alpha_1 \sin \theta_1 \cdot d_1 - (\omega_2)^2 \cdot \cos \theta_2 \cdot d_2 - \alpha_2 \sin \theta_2 \cdot d_2 + 0 = 0 \quad (4.32)$$

$$\alpha_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot d_1 - (\omega_1)^2 \cdot \sin \theta_1 \cdot d_1 + \alpha_2 \cdot \cos \theta_2 \cdot d_2 - (\omega_2)^2 \cdot \sin \theta_2 \cdot d_2 + 0 = a_p \quad (4.33)$$

despejando  $\alpha_1$  de la ecuación (4.32) se tiene:

$$\alpha_1 = \left( -\frac{(\omega_2)^2 \cdot \cos \theta_2 \cdot d_2 + \alpha_2 \sin \theta_2 \cdot d_2 + 0 + (\omega_1)^2 \cdot \cos \theta_1 \cdot d_1}{\sin \theta_1 \cdot d_1} \right) \quad (4.34)$$

sustituyendo el valor de  $\alpha_1$  de la ecuación (4.34) en la ecuación (4.33) y despejando  $\alpha_2$  se tiene:

$$\alpha_2 = \frac{(\omega_1)^2 \cdot (\cos \theta_1 \cdot d_1)^2 - (\omega_2)^2 \cdot \cos \theta_2 \cdot d_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot d_1 - (\omega_1)^2 \cdot (\sin \theta_1 \cdot d_1)^2 - (\omega_2)^2 \cdot \sin \theta_2 \cdot d_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot d_1 - \sin \theta_1 \cdot d_1 \cdot a_p}{\sin \theta_2 \cdot d_2 \cdot \cos \theta_1 \cdot d_1 - \cos \theta_2 \cdot d_2 \cdot \sin \theta_1 \cdot d_1} \quad (4.35)$$

Sustituyendo el valor de referencia de la aceleración del punto P,  $a_p$  de cero  $m/s^2$  y los valores de las longitudes de los eslabones  $d_1$  y  $d_2$  de 0.16 m (datos de referencia) se pueden calcular  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ .

### 4.3. Dinámica

A continuación se determinan las fuerzas y momentos que actúan sobre cada uno de los eslabones que componen la articulación.

Considerando que las ecuaciones fundamentales del movimiento en forma escalar son:

$$\vec{F}_x = m \cdot \vec{a}_{Gx} \quad (4.36)$$

$$\vec{F}_y = m \cdot \vec{a}_{Gy} \quad (4.37)$$

$$\vec{M} = I_G \cdot \vec{\alpha} \quad (4.38)$$

Las ecuaciones (4.36) y (4.38) también se puede escribir de la siguiente manera:

$$m \cdot \vec{a}_{Gx} = \vec{F}_x \quad (4.39)$$

y

$$I_G \cdot \vec{\alpha} = \vec{M} \quad (4.40)$$

donde:

$$m \begin{bmatrix} a_{Gx} \\ a_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

en la que la representación de la ecuación (4.41) de forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{Gx} \\ a_{Gy} \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$[\mathbf{M}] \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{S} \quad (\text{para cada cuerpo}) \quad (4.43)$$

Para todo el sistema:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \\ \ddot{q}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

donde:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & I_{G1} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$



$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} m_2 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{G_2} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & I_{G_3} \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

$$\mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} m_4 & 0 & 0 \\ 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & I_{G_4} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

$$\mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} m_5 & 0 & 0 \\ 0 & m_5 & 0 \\ 0 & 0 & I_{G_5} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{G_{1X}} \\ \mathbf{a}_{G_{1Y}} \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{G_{2X}} \\ \mathbf{a}_{G_{2Y}} \\ \alpha_2 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{G_{3X}} \\ \mathbf{a}_{G_{3Y}} \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{G_{4X}} \\ \mathbf{a}_{G_{4Y}} \\ \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_5 = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{G_{5X}} \\ \mathbf{a}_{G_{5Y}} \\ \alpha_5 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} F_{1X} \\ F_{1Y} \\ M_1 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$\mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} F_{2X} \\ F_{2Y} \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

$$\mathbf{S}_3 = \begin{bmatrix} F_{3X} \\ F_{3Y} \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

$$\mathbf{S}_4 = \begin{bmatrix} F_{4X} \\ F_{4Y} \\ M_4 \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

$$\mathbf{S}_5 = \begin{bmatrix} F_{5X} \\ F_{5Y} \\ M_5 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

### 4.3.1. Determinación de las Fuerzas Resultantes

A continuación se determinan las fuerzas que actúan sobre cada uno de los eslabones que componen la articulación, en la figura 4.5., se presenta el diagrama de cuerpo libre del eslabón 1.

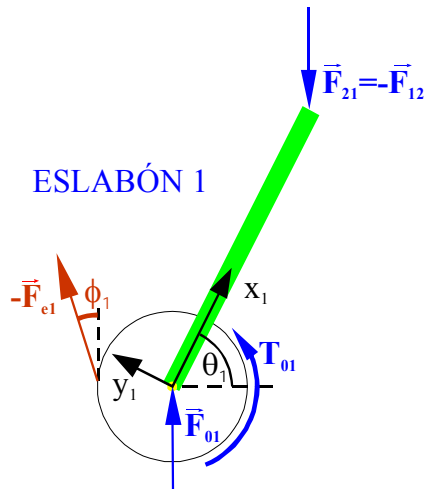


Figura 4.5. Diagrama de cuerpo libre del eslabón 1 en el que se muestran las fuerzas actuantes sobre el.

A partir de la figura 4.5. el valor de la fuerza resultante  $\vec{F}_1$  se obtiene por la ecuación (4.60):

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{01} - \vec{F}_{e1} - \vec{F}_{12} \tag{4.60}$$

Ahora, en la figura 4.6., se presenta el diagrama de cuerpo libre del eslabón 2

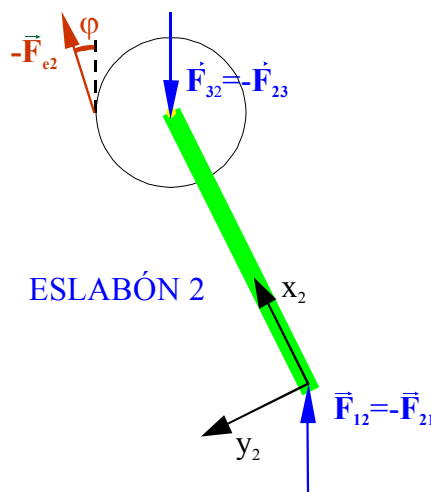


Figura 4.6. Diagrama de cuerpo libre del eslabón 2 en el que se muestran las fuerzas actuantes sobre el

A partir de la figura 4.6. se determina que el valor de la fuerza resultante  $\vec{F}_2$  se obtiene por la ecuación (4.61):

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{12} - \vec{F}_{23} - \vec{F}_{e2} \quad (4.61)$$

Ahora, en la figura 4.7., se presenta el diagrama de cuerpo libre del eslabón 3 (Elemento terminal)

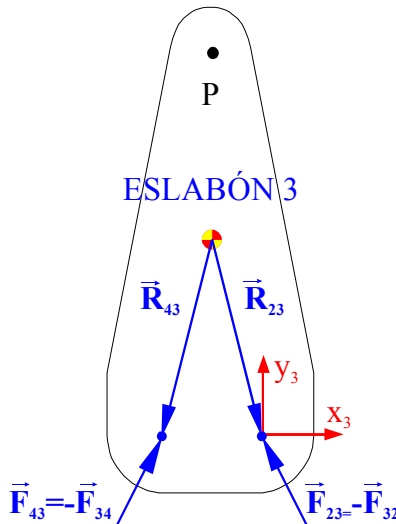


Figura 4.7. Diagrama de cuerpo libre en el que se muestran las fuerzas actuantes sobre el eslabón 3

A partir de la figura 4.7., se determina que el valor de la fuerza resultante  $\vec{F}_3$  se obtiene por la ecuación (4.62):

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{23} + \vec{F}_{43} \quad (4.62)$$

Ahora, en la figura 4.8., se presenta el diagrama de cuerpo libre del eslabón 4

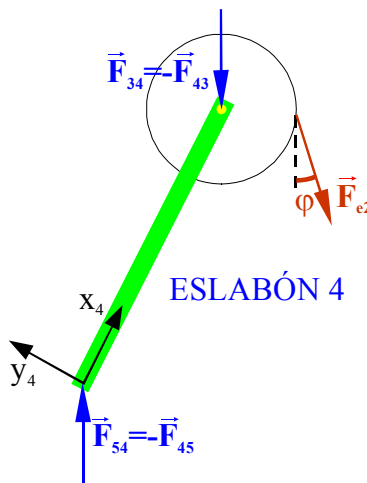


Figura 4.8. Diagrama de cuerpo libre del eslabón en el que se muestran las fuerzas actuantes sobre el

A partir de la figura 4.8., se determina que el valor de la fuerza resultante  $\vec{F}_4$  se obtiene por la ecuación (4.63):

$$\vec{F}_4 = \vec{F}_{54} - \vec{F}_{43} + \vec{F}_{e2} \quad (4.63)$$

Ahora, en la figura 4.9., se presenta el diagrama de cuerpo libre del eslabón 5

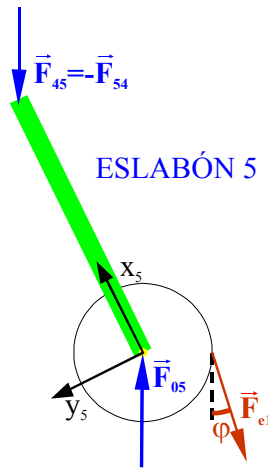


Figura 4.9. Diagrama de cuerpo libre del eslabón 5 en el que se muestran las fuerzas actuantes sobre el

A partir de la figura 4.9., se determina que el valor de la fuerza resultante  $\vec{F}_5$  se obtiene por la ecuación (4.64):

$$\vec{F}_5 = \vec{F}_{05} + \vec{F}_{e1} - \vec{F}_{54} \quad (4.64)$$

### 4.3.2. Determinación de los Momentos Resultantes

A continuación se determinan los momentos resultantes que actúan sobre cada uno de los eslabones que componen la articulación, en la figura 4.10., se presentan los diagramas de cuerpo libre del eslabón 1, 2, 3, 4 y 5.

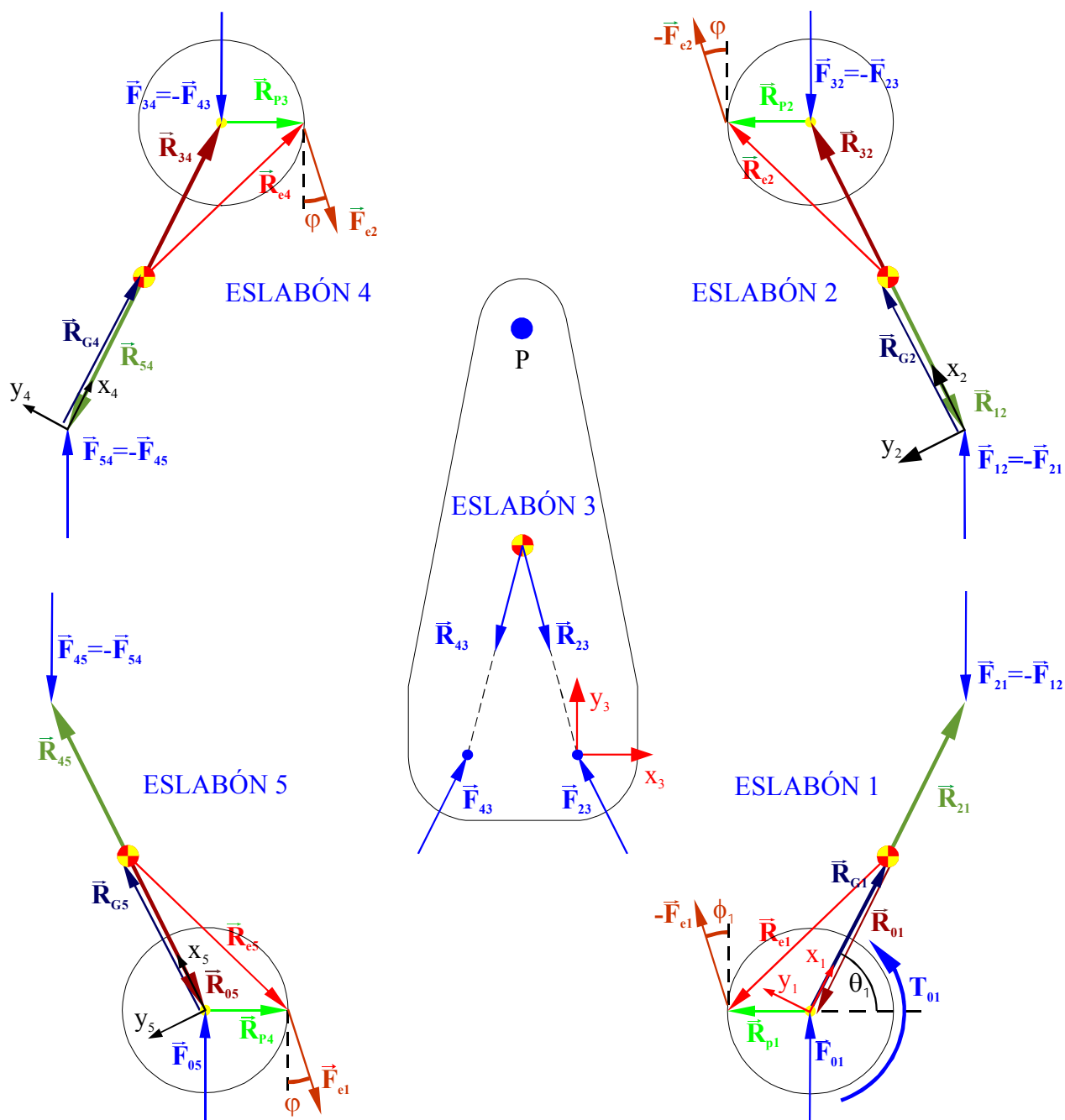


Figura 4. 10. Diagrama del eslabones 1, 2, 3, 4 y 5

Determinación del momento resultante  $S_1$ .

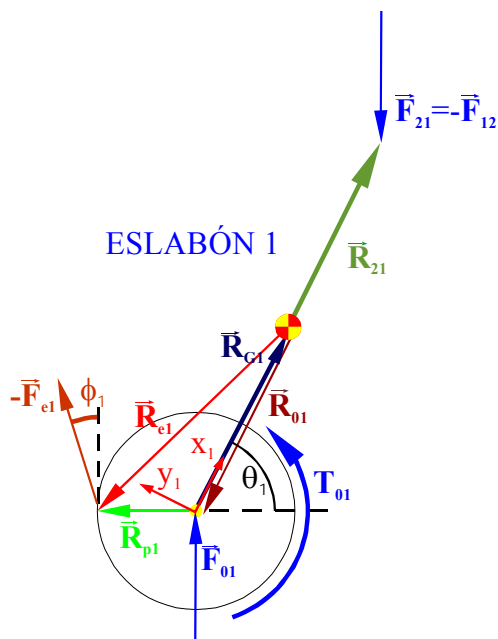


Figura 4.11. Diagrama del eslabón 1

Se tiene que  $S_1$ :

De la ecuación (4.55) se sabe que:

$$S_1 = \begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ M_1 \end{bmatrix}$$

de la ecuación (4.61) se sabe que:  $\vec{F}_1 = \vec{F}_{01} - \vec{F}_{e1} - \vec{F}_{12}$  donde:

$$\vec{F}_1 = \begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01x} - \cos(90^\circ + \varphi) \cdot f_{e1x} - F_{12x} \\ F_{01y} - \text{sen}(90^\circ + \varphi) \cdot f_{e1y} - F_{12y} \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

$$\vec{F}_{01} = [F_{01x}, F_{01y}]^T \quad (4.66)$$

$$\vec{F}_{12} = [F_{12x}, F_{12y}]^T \quad (4.67)$$

$$\vec{F}_{e1} = [R_{(90^\circ + \varphi)}] f_{e1} = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ + \varphi) & -\text{sen}(90^\circ + \varphi) \\ \text{sen}(90^\circ + \varphi) & \cos(90^\circ + \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{e1x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

A partir de la figura 4.11., se determina que:

$$\vec{M}_1 = \vec{R}_{01} \times \vec{F}_{01} + \vec{R}_{e1} \times (-\vec{f}_{e1x}) + \vec{R}_{21} \times (-\vec{F}_{12}) + \vec{T}_{01} \quad (4.69)$$

donde:

$$\vec{R}_{01} = -\vec{R}_{G1} \quad (4.70)$$

$$\vec{R}_{21} = -\vec{R}_{G1} + \vec{R}_1 \quad (4.71)$$

$$\vec{R}_{e1} = -\vec{R}_{G1} + \vec{R}_{P1} \quad (4.72)$$

$$\vec{R}_{P1} = [-x_p, 0]^T \quad (4.73)$$

$$\vec{R}_{G1} = [\mathbf{R}_{01}] \mathbf{r}_{G1} \quad (4.74)$$

$$\mathbf{r}_{G1} = \begin{bmatrix} x_{G1} \\ y_{G1} \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

Determinación del momento resultante  $S_2$ .

Se tiene que  $S_2$ :

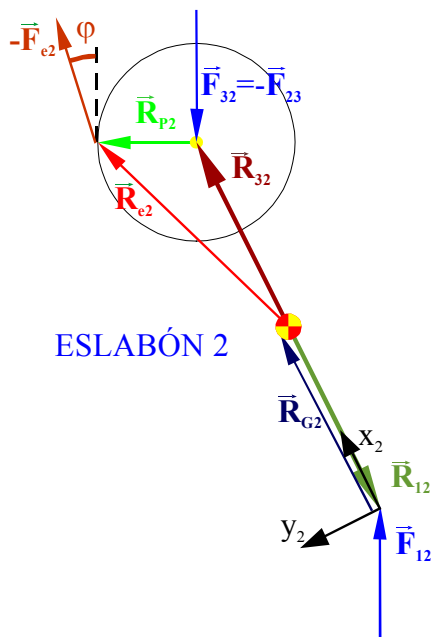


Figura 4.12. Diagrama del eslabón 2

De la ecuación (4.56) se sabe que  $S_2 = \begin{bmatrix} F_{2x} \\ F_{2y} \\ M_2 \end{bmatrix}$



de la ecuación (4.61) se sabe que para el eslabón 2  $\vec{F}_2 = \vec{F}_{12} - \vec{F}_{23} - \vec{F}_{e2}$  donde:

$$\vec{F}_{23} = [F_{23_x}, F_{23_y}]^T \quad (4.76)$$

$$\vec{F}_{e2} = [R_{(90^\circ+\varphi)}] f_{e2} \quad (4.77)$$

$$f_{e2} = \begin{bmatrix} f_{e2_x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

A partir de la figura 4.12., se determina que:

$$\vec{M}_2 = \vec{R}_{12} \times \vec{F}_{12} + \vec{R}_{32} \times (-\vec{F}_{23}) + \vec{R}_{e2} \times (-\vec{F}_{e2}) \quad (4.79)$$

donde:

$$\vec{R}_{G2} = [R_{02}] r_{G2} \quad (4.80)$$

$$r_{G2} = \begin{bmatrix} x_{G2} \\ y_{G2} \end{bmatrix} \quad (4.81)$$

$$\vec{R}_{12} = -\vec{R}_{G2} \quad (4.82)$$

$$\vec{R}_{32} = -\vec{R}_{G2} + \vec{R}_2 \quad (4.83)$$

$$\vec{R}_{e2} = \vec{R}_{32} + \vec{R}_{P2} = -\vec{R}_{G2} + \vec{R}_2 + \vec{R}_{P2} \quad (4.84)$$

$$\vec{R}_{P2} = [-x_{P2}, 0]^T \quad (4.85)$$

Determinación del momento resultante  $S_3$ .

Se tiene que  $S_3$ :

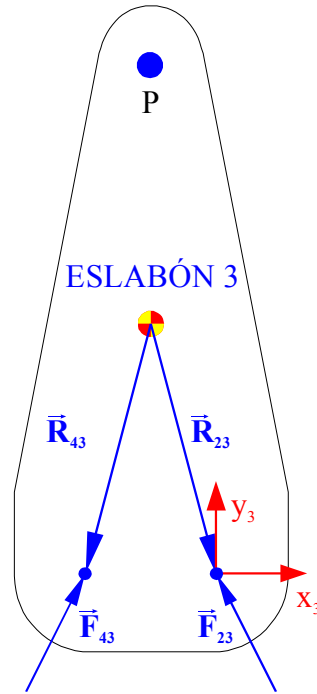


Figura 4. 13. Diagrama del eslabón 3.

De la ecuación (4.57) se sabe que  $S_3 = \begin{bmatrix} F_{3X} \\ F_{3Y} \\ M_3 \end{bmatrix}$

de la ecuación (4.62) se sabe que para el eslabón 3  $\vec{F}_3 = \vec{F}_{23} + \vec{F}_{43}$  donde:

$$\vec{F}_{43} = [F_{43x}, F_{43y}]^T \quad (4.86)$$

A partir de la figura 4.13., se determina que:

$$M_3 = \vec{R}_{23} \times \vec{F}_{23} + \vec{R}_{43} \times \vec{F}_{43} \quad (4.87)$$

$$\vec{R}_{23} = -\vec{R}_{G3} \quad (4.88)$$

$$\vec{R}_{G3} = [-x_{G3}, y_{G3}]^T \quad (4.89)$$

$$\vec{R}_{43} = [-x_{G3}, -y_{G3}]^T \quad (4.90)$$

Determinación del momento resultante  $S_4$ .

Se tiene que  $S_4$ :

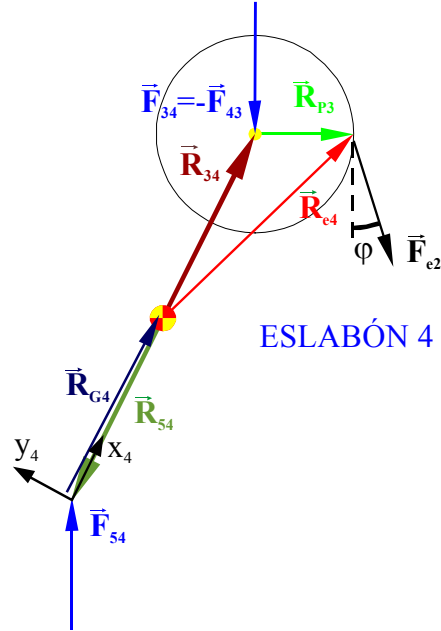


Figura 4. 14. Diagrama del eslabón 4.

De la ecuación (4.58) se sabe que  $S_4 = \begin{bmatrix} F_{4X} \\ F_{4Y} \\ M_4 \end{bmatrix}$

de la ecuación (4.63) se sabe que para el eslabón 4  $\vec{F}_4 = \vec{F}_{54} - \vec{F}_{43} + \vec{F}_{e2}$  donde:

$$\vec{F}_{54} = [F_{54x}, F_{54y}]^T \quad (4.91)$$

A partir de la figura 4.14., se determina que:

$$M_4 = \vec{R}_{54} \times \vec{F}_{54} + \vec{R}_{34} \times (-\vec{F}_{43}) + \vec{R}_{e4} \times \vec{F}_{e2} \quad (4.92)$$

$$\vec{R}_{54} = -\vec{R}_{G4} \quad (4.93)$$

$$\vec{R}_4 = [R_{04}]r_4 = [R_{01}]r_4 \quad (4.94)$$

$$r_4 = [d_4, 0]^T \quad (4.95)$$

$$\vec{R}_{34} = -\vec{R}_{G4} + \vec{R}_4 \quad (4.96)$$

$$\vec{\mathbf{R}}_{G4} = [\mathbf{R}_{01}] \mathbf{r}_{G4} \quad (4.97)$$

$$\mathbf{r}_{G4} = \begin{bmatrix} X_{G4} \\ Y_{G4} \end{bmatrix} \quad (4.98)$$

$$\vec{\mathbf{R}}_{e4} = -\vec{\mathbf{R}}_{34} + \vec{\mathbf{R}}_{P3} \quad (4.99)$$

$$\vec{\mathbf{R}}_{P3} = [-x_{p3}, 0]^T \quad (4.100)$$

Determinación del momento resultante  $\mathbf{S}_5$ .

Se tiene que  $\mathbf{S}_5$ :

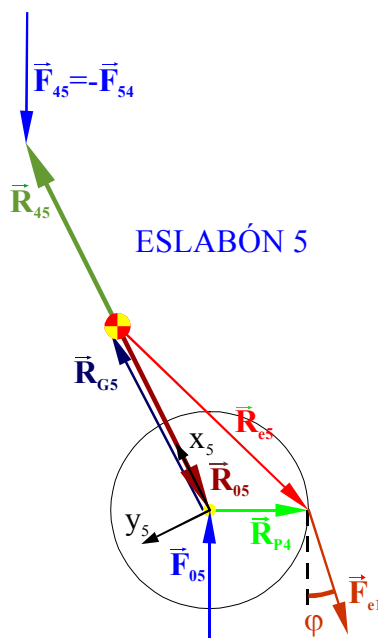


Figura 4.15. Diagrama del eslabón 5.

De la ecuación (4.59) se sabe que  $\mathbf{S}_5 = \begin{bmatrix} F_{5x} \\ F_{5y} \\ M_5 \end{bmatrix}$

de la ecuación (4.64) se sabe que para el eslabón 4  $\mathbf{F}_5 = \mathbf{F}_{05} - \mathbf{F}_{e1} + \mathbf{F}_{54}$  donde:

$$\vec{\mathbf{F}}_{05} = [F_{05x}, F_{05y}]^T \quad (4.101)$$

A partir de la figura 4.15., se determina que:

$$\vec{M}_5 = \vec{R}_{05} \times \vec{F}_{05} + \vec{R}_{e5} \times \vec{F}_{e1} + \vec{R}_{45} \times (-\vec{F}_{54}) \quad (4.102)$$

$$\vec{R}_{G5} = [R_{05}] r_{G5} = [R_{02}] r_{G5} \quad (4.103)$$

$$r_{G5} = [x_{G5}, y_{G5}]^T \quad (4.104)$$

$$\vec{R}_{05} = -\vec{R}_{G5} \quad (4.105)$$

$$\vec{R}_{45} = -\vec{R}_{G5} + \vec{R}_5 \quad (4.106)$$

$$\vec{R}_5 = [R_{05}] r_5 = [R_{02}] r_5 \quad (4.107)$$

$$r_5 = [d_5, 0]^T \quad (4.108)$$

$$\vec{R}_{e5} = \vec{R}_{05} + \vec{R}_{P4} \quad (4.109)$$

$$\vec{R}_{P4} = [-x_{P4}, 0]^T \quad (4.110)$$

4.3.3. Determinación de la Aceleración Angular Resultante “ $\ddot{q}$ ”

Desde el origen “O” de la figura 4.16. se trazan los vectores de posición de los centros de masa para obtener las aceleraciones totales de cada eslabón.

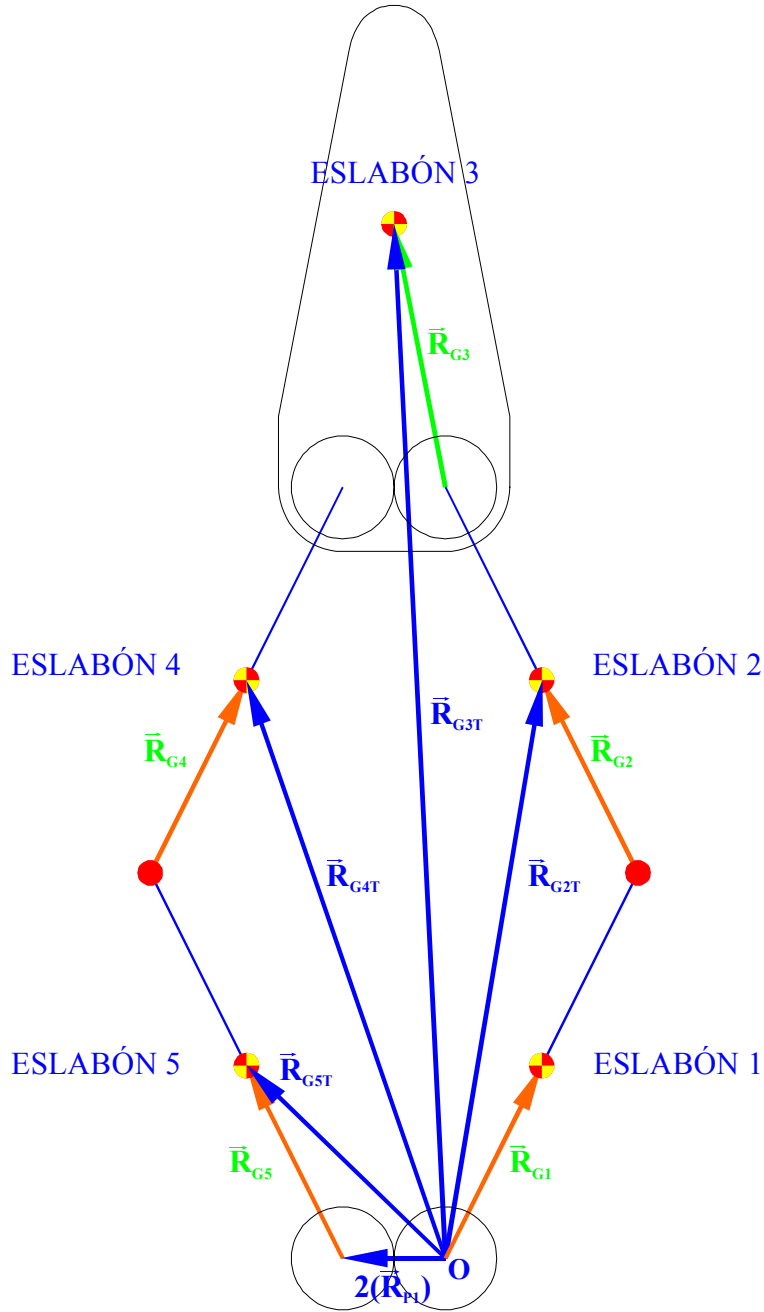


Figura 4. 16. Diagrama de los centros de masa de los eslabones.

Para la aceleración del centro de masa del eslabón 1 se tiene que considerar que:

$$\bar{\mathbf{A}}_{G1} = [\mathbf{A}_1] \bar{\mathbf{R}}_{G1} = [A_{G1x}, A_{G1y}]^T \quad (4.112)$$

Para la aceleración del centro de masa del eslabón 2 se tiene que considerar que:

$$\bar{\mathbf{R}}_{G2T} = \bar{\mathbf{R}}_1 + \bar{\mathbf{R}}_{G2} \quad (4.113)$$

Ahora derivando dos veces con respecto al tiempo se obtiene la aceleración que es:

$$\bar{\mathbf{A}}_{G2T} = \bar{\mathbf{A}}_1 + \bar{\mathbf{A}}_{G2} = [\mathbf{A}_1] \bar{\mathbf{R}}_1 + [\mathbf{A}_2] \bar{\mathbf{R}}_{G2} = [A_{G2x}, A_{G2y}]^T \quad (4.114)$$

Para la aceleración del centro de masa del eslabón 3 se tiene que considerar que:

$$\bar{\mathbf{R}}_{G3T} = \bar{\mathbf{R}}_1 + \bar{\mathbf{R}}_2 + \bar{\mathbf{R}}_{G3} = \bar{\mathbf{R}}_T \quad (4.115)$$

Ahora derivando dos veces con respecto al tiempo se obtiene la aceleración que es:

$$\bar{\mathbf{A}}_{G3T} = \bar{\mathbf{A}}_T = [0, a_p]^T = \begin{bmatrix} 0 \\ a_p \end{bmatrix} \quad (4.116)$$

Para la aceleración del centro de masa del eslabón 5 se tiene que considerar que:

$$\bar{\mathbf{R}}_{G5T} = 2\bar{\mathbf{R}}_{P1} + \bar{\mathbf{R}}_{G5} \quad (4.117)$$

Ahora derivando dos veces con respecto al tiempo se obtiene la aceleración que es:

$$\bar{\mathbf{A}}_{G5T} = 0 + \bar{\mathbf{A}}_{G5} = [\mathbf{A}_5] \bar{\mathbf{R}}_{G5} = \begin{bmatrix} a_{G5x} \\ a_{G5y} \end{bmatrix} \quad (4.118)$$

donde;

$$[\bar{\mathbf{A}}_5] = [\bar{\mathbf{A}}_2] = \begin{bmatrix} -(\omega_2)^2 & -\alpha_2 \\ \alpha_2 & -(\omega_2)^2 \end{bmatrix} \quad (4.119)$$

Para la aceleración del centro de masa del eslabón 4 se tiene que considerar que:

$$\bar{\mathbf{R}}_{G4T} = 2\bar{\mathbf{R}}_{P1} + \bar{\mathbf{R}}_5 + \bar{\mathbf{R}}_{G4} \quad (4.120)$$

Ahora derivando dos veces con respecto al tiempo se obtiene la aceleración que es:

$$\bar{\mathbf{A}}_{G4T} = 0 + \bar{\mathbf{A}}_5 + \bar{\mathbf{A}}_{G4} = [\mathbf{A}_5] \bar{\mathbf{R}}_5 + [\mathbf{A}_4] \bar{\mathbf{R}}_{G4} = \begin{bmatrix} a_{G4x} \\ a_{G4y} \end{bmatrix} \quad (4.121)$$

donde;

$$[\bar{\mathbf{A}}_4] = [\bar{\mathbf{A}}_1] = \begin{bmatrix} -(\omega_1)^2 & -\alpha_1 \\ \alpha_1 & -(\omega_1)^2 \end{bmatrix} \quad (4.122)$$

Finalmente se tiene que:

$$\ddot{\mathbf{q}}_1 = [a_{G1x}, a_{G1y}, \alpha_1]^T \quad (4.123)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_2 = [a_{G2x}, a_{G2y}, \alpha_2]^T \quad (4.124)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_3 = [0, a_p, 0]^T \quad (4.125)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_4 = [a_{G4x}, a_{G4y}, \alpha_1]^T \quad (4.126)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_5 = [a_{G5x}, a_{G5y}, \alpha_2]^T \quad (4.127)$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{\mathbf{q}}_1 \quad \ddot{\mathbf{q}}_2 \quad \ddot{\mathbf{q}}_3 \quad \ddot{\mathbf{q}}_4 \quad \ddot{\mathbf{q}}_5]^T \quad (4.128)$$



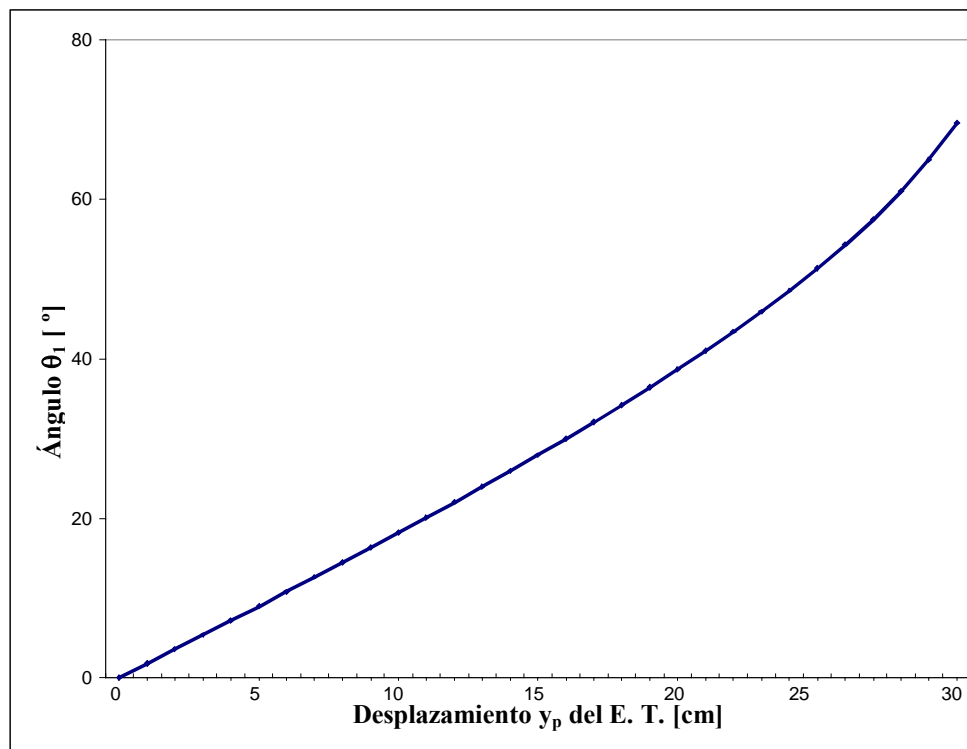
## 4.4. Resultados del Análisis Matemático

Los resultados obtenidos del modelado matemático presentado en el apartado anterior se presentan a continuación, en las gráficas donde se muestra el comportamiento de la posición angular, velocidades angulares, aceleraciones angulares, fuerzas y torque de cada uno de los elementos que componen a la extremidad con respecto al desplazamiento del E.T.

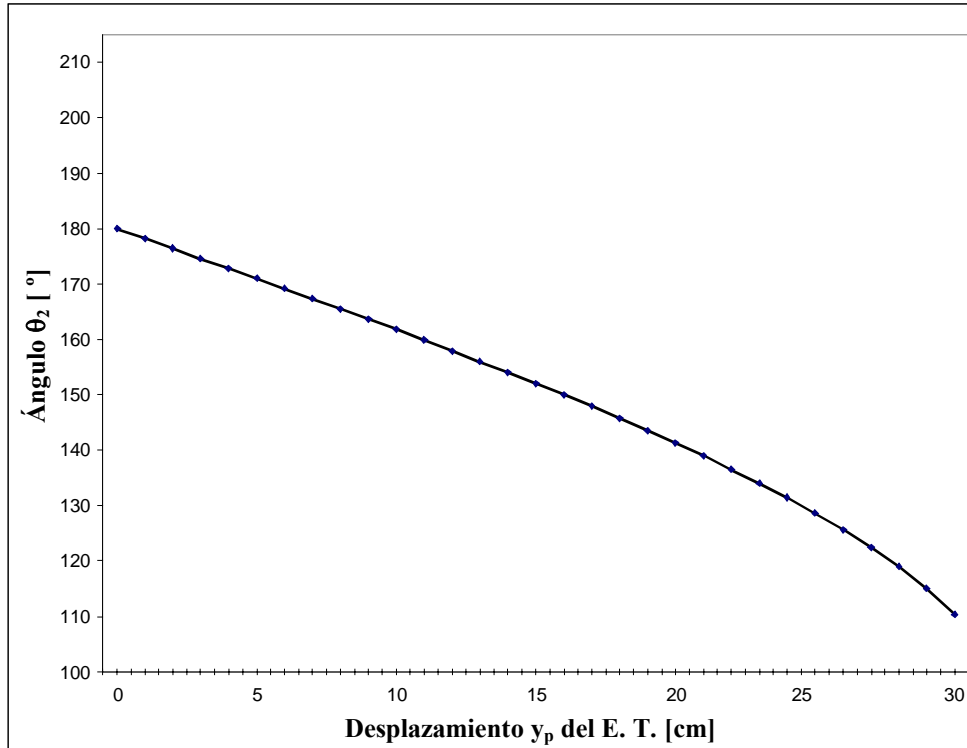
### 4.4.1. Resultados del Análisis Cinemático

Del análisis cinemático realizado a la extremidad, se obtienen las siguientes gráficas:

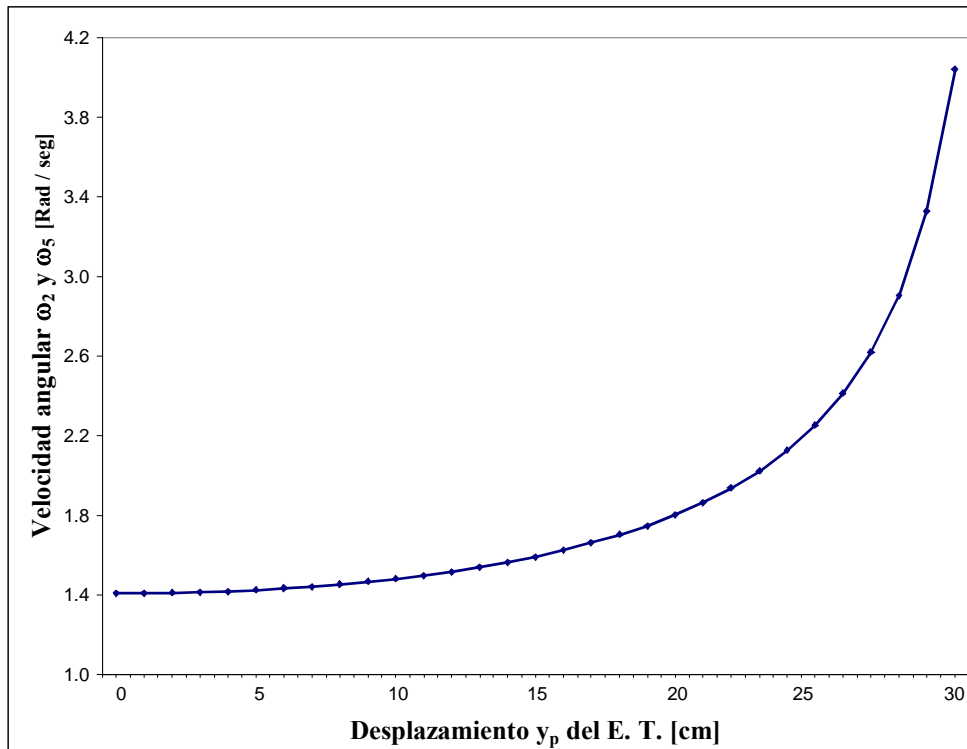
- En las gráficas 4.1. y 4.2. se puede observar cómo se modifican los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.
- En las gráficas 4.3. y 4.4. se muestra el comportamiento de las velocidades angulares  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_4$  y  $\omega_5$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.
- En gráficas 4.5. y 4.6., se muestra el comportamiento de las aceleraciones angulares  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_4$  y  $\alpha_5$  vs desplazamiento del  $y_p$  E.T.



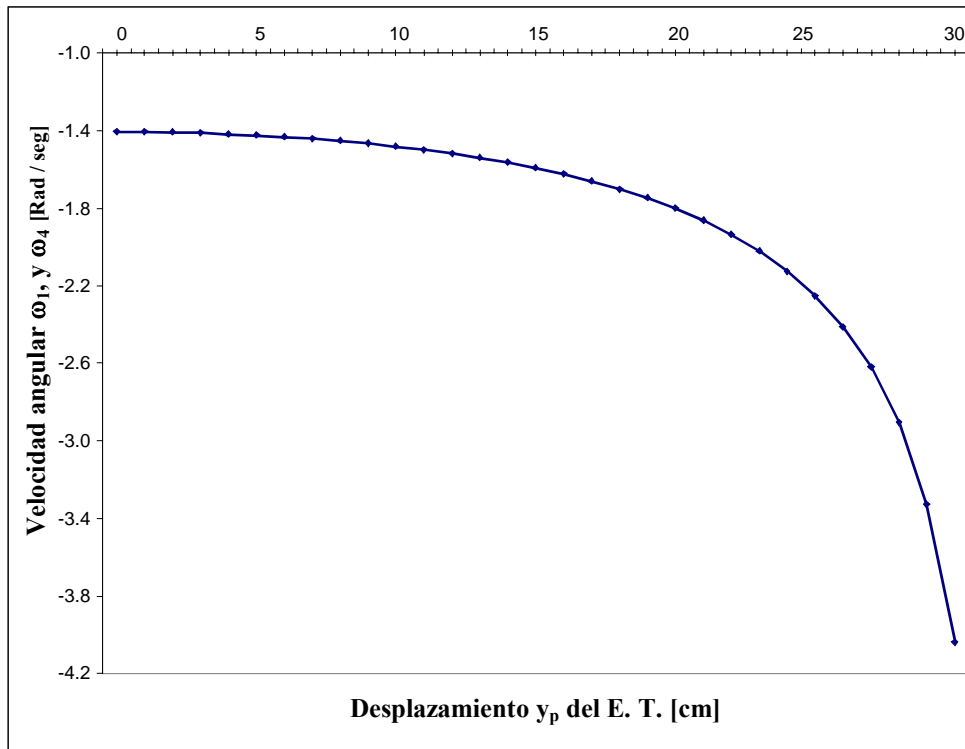
Gráfica 4.1. Comportamiento del ángulo  $\theta_1$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.



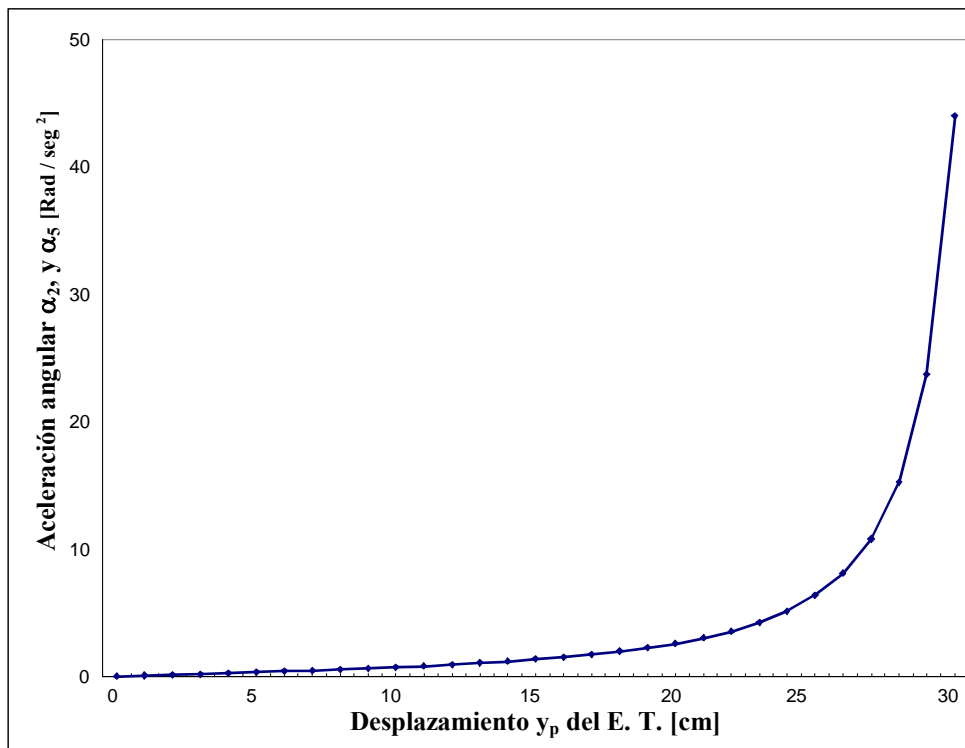
Gráfica 4.2. Comportamiento del ángulo  $\theta_2$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.



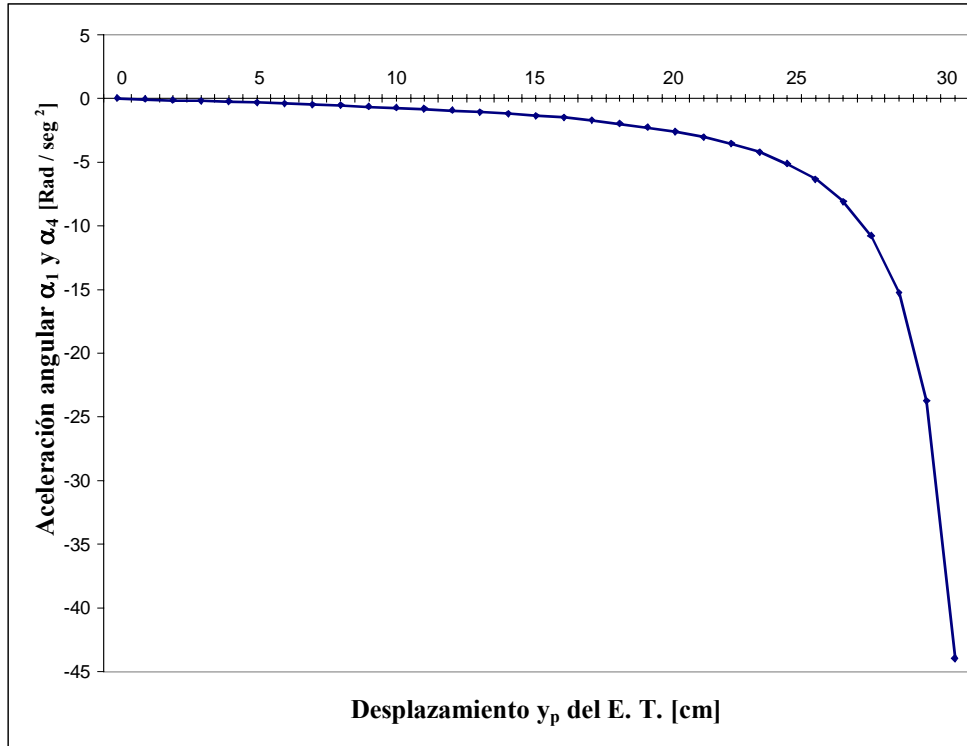
Gráfica 4.3. Comportamiento de las velocidades angulares  $\omega_2$  y  $\omega_3$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.



Gráfica 4.4. Comportamiento de las velocidades angulares  $\omega_1$  y  $\omega_4$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.



Gráfica 4.5. Comportamiento de las aceleraciones angulares  $\alpha_1$  y  $\alpha_4$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.



Gráfica 4.6. Comportamiento de las aceleraciones angulares  $\alpha_1$  y  $\alpha_4$  vs desplazamiento  $y_p$  del E.T.

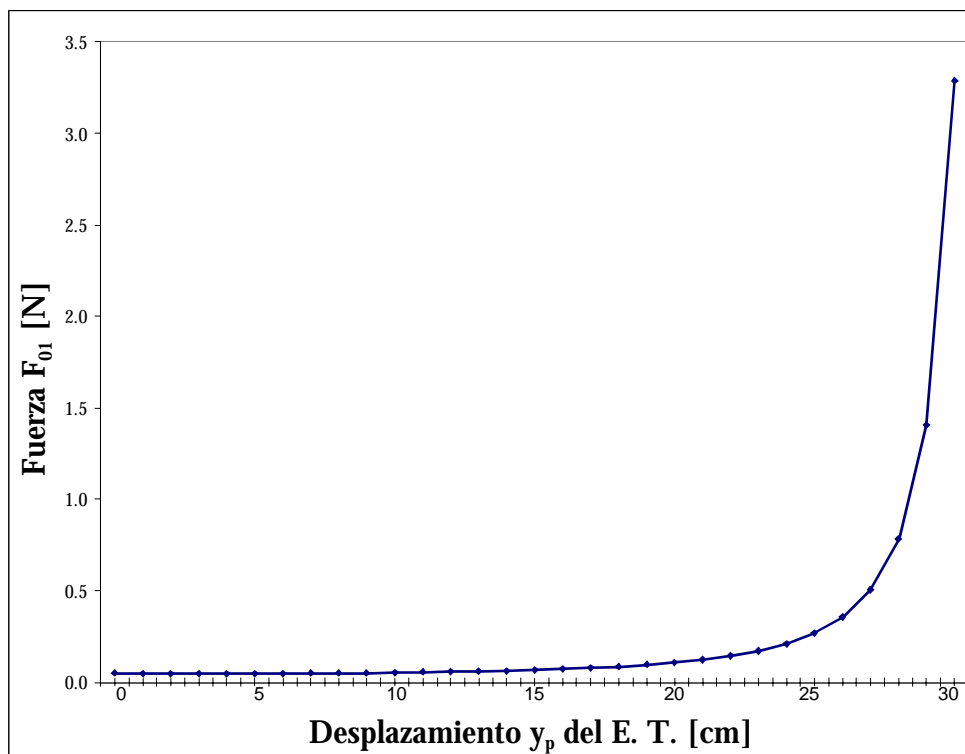
Observando las gráficas 4.1., con 4.2., 4.3. con 4.4., y las gráficas 4.5. con 4.6., se observa que mantienen un comportamiento simétrico.

### 4.4.2. Resultados del Análisis Dinámico

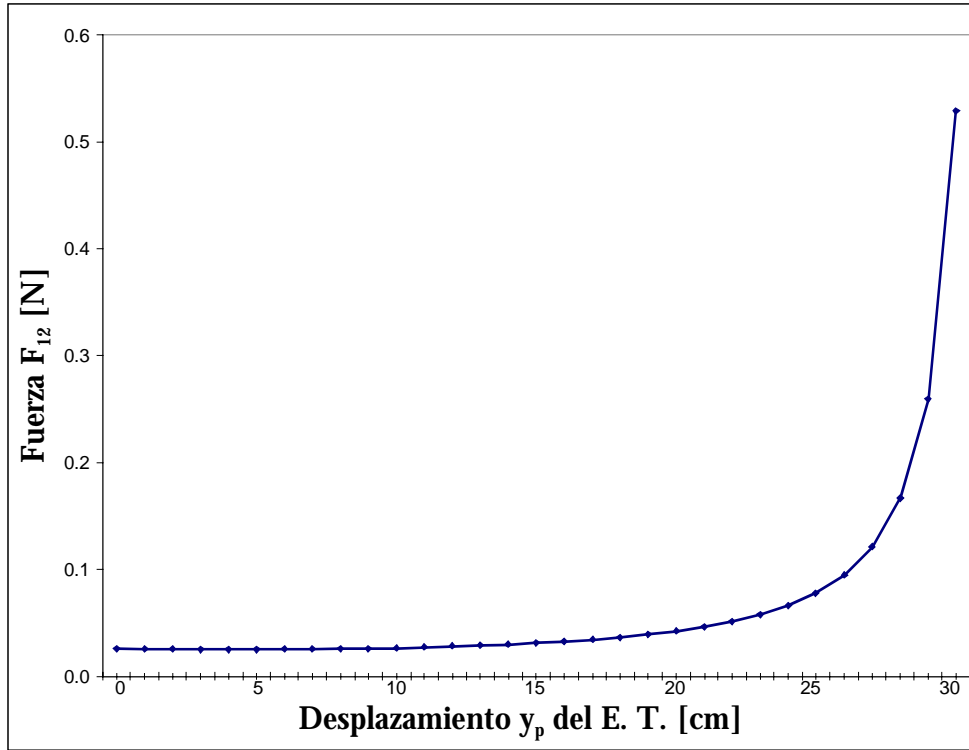
Gráficas de fuerza y gráfica de torque

Del análisis dinámico realizado a la extremidad, se obtuvieron las siguientes gráficas:

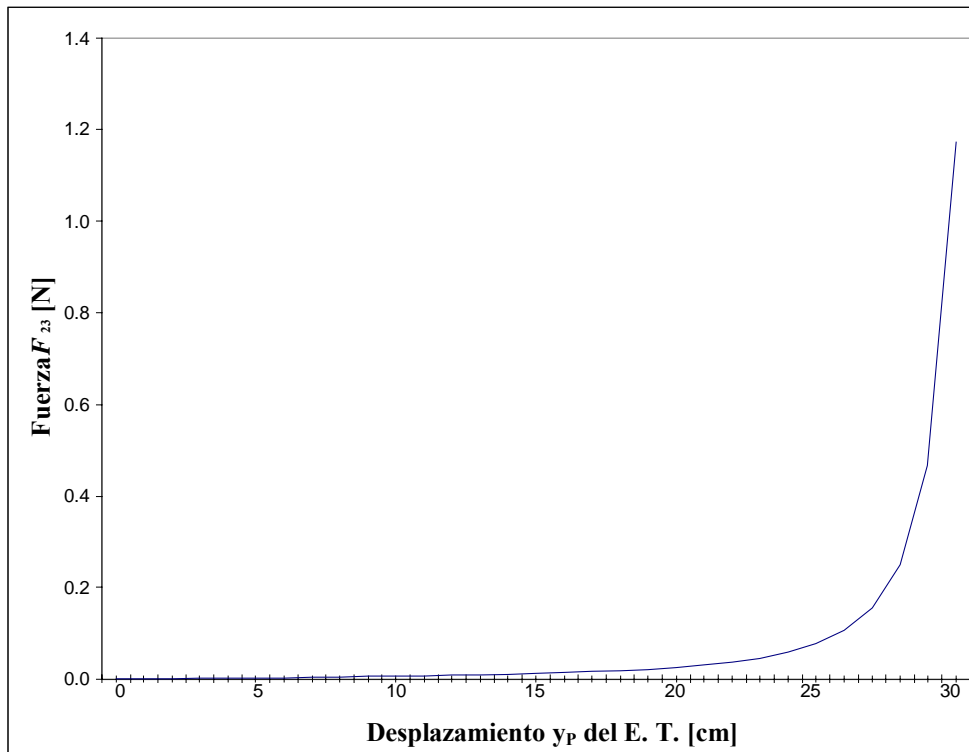
- De la gráfica 4.7 a la grafica 4.12 se muestra el comportamiento de las fuerzas vs desplazamiento del E. T. en cada uno de los pares rotacionales de la extremidad del robot
- También se obtuvo la gráfica, en la que se muestra el comportamiento del torque necesario para mover el sistema contra el desplazamiento del E. T.



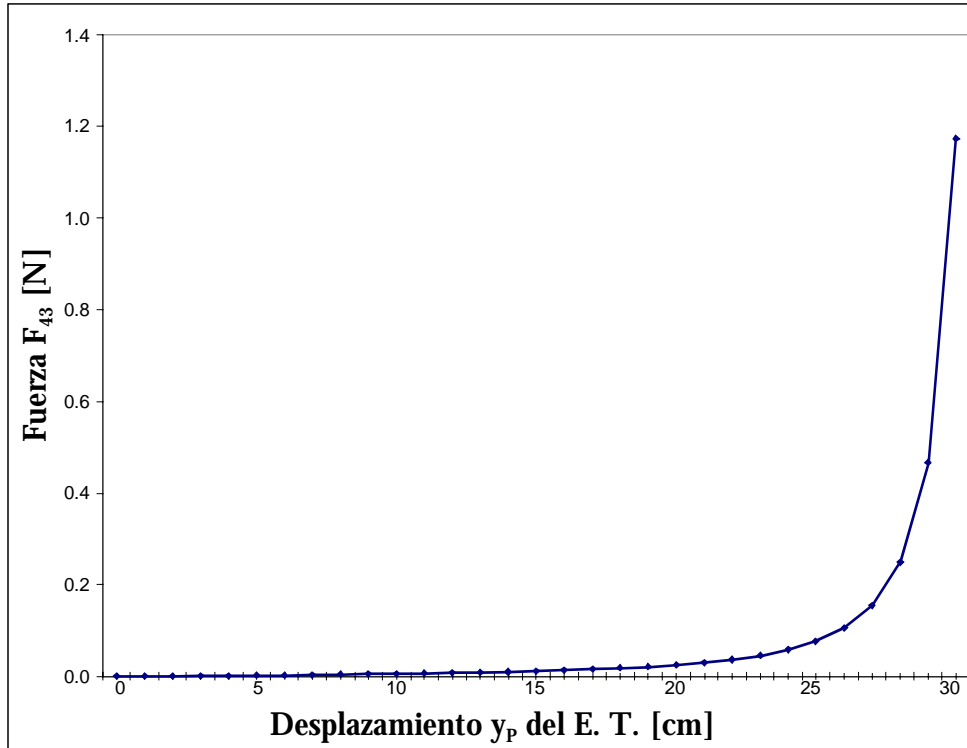
Gráfica 4.7. Comportamiento de la fuerza  $F_{01}$



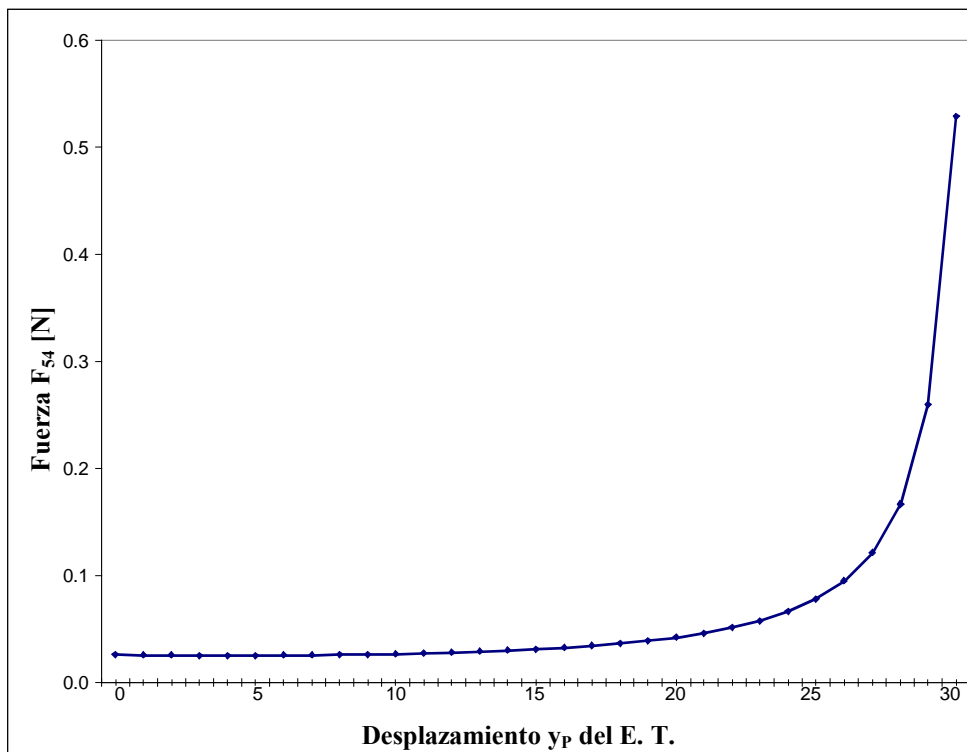
Gráfica 4.8. Comportamiento de la fuerza  $F_{12}$



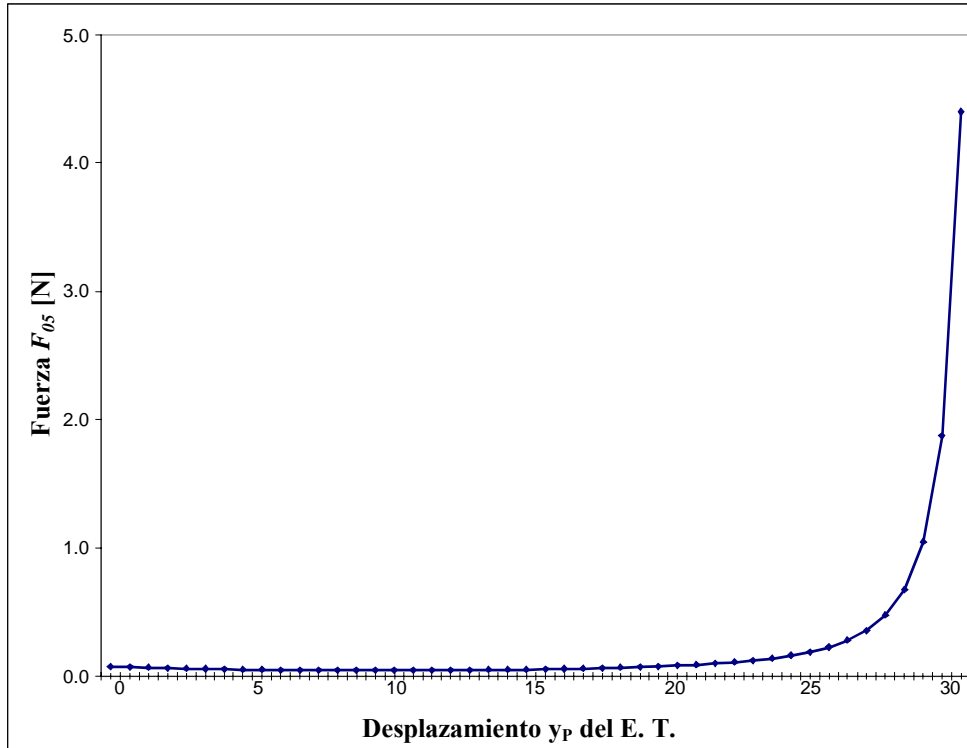
Gráfica 4.9. Comportamiento de la fuerza  $F_{23}$



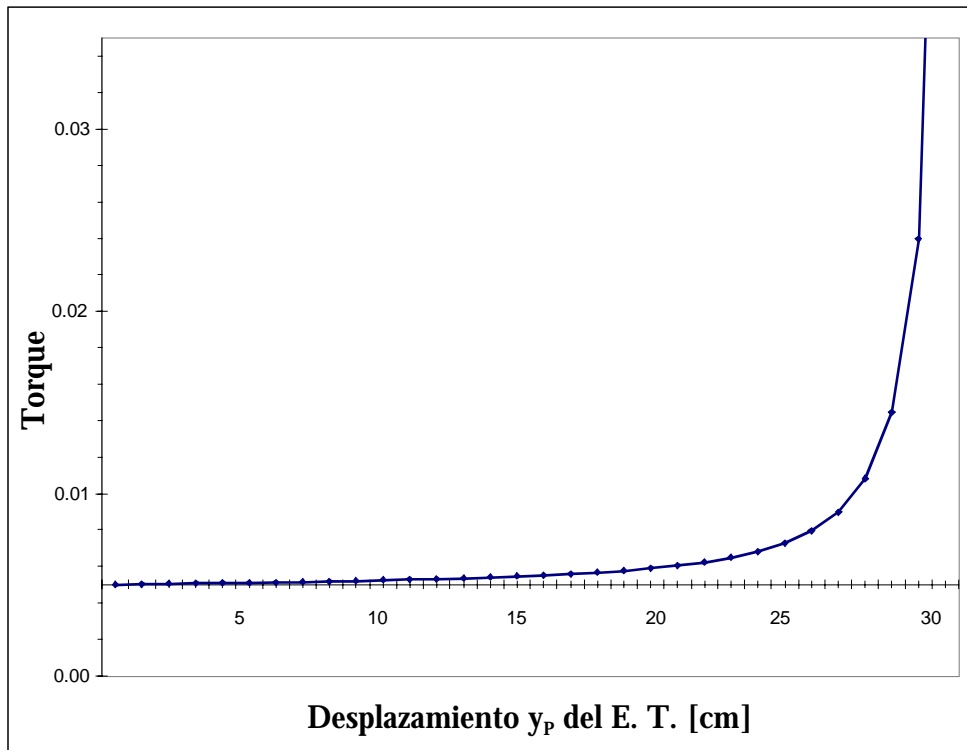
Gráfica 4.10. Comportamiento de la fuerza  $F_{34}$



Gráfica 4.11. Comportamiento de la fuerza  $F_{54}$



Gráfica 4.12. Comportamiento de la fuerza  $F_{05}$



Gráfica 4.13. Comportamiento del torque exigido en el motor Torque



En todas las gráficas de **Fuerza vs Desplazamiento** se observa que la fuerza se incrementa de manera casi constante hasta los 19 cm de desplazamiento del elemento terminal después empieza a incrementar hasta los 27 cm, pasando este punto la fuerza se incrementa abruptamente alcanzando su máximo valor en los 30 cm

Lo anterior significa que las fuerzas y el torque aumentan conforme la articulación va alcanzando la posición de máxima extensión.

Una manera de que la extremidad no alcance los puntos en que el torque y estas fuerzas se incrementan abruptamente, consiste en aumentar la longitud de los eslabones, con lo que se logra que la extremidad no requiera de extenderse totalmente para alcanzar la posición demandada del E. T.

De las cálculos se obtiene que la máxima magnitud de las fuerzas en las articulaciones son:

Máxima magnitud de la fuerza  $F_{01} = 3.28717$  N

Máxima magnitud de la fuerza  $F_{12} = 0.52841$  N

Máxima magnitud de la fuerza  $F_{23} = 1.17292$  N

Máxima magnitud de la fuerza  $F_{43} = 1.17292$  N

Máxima magnitud de la fuerza  $F_{54} = 0.52841$  N

Máxima magnitud de la fuerza  $F_{05} = 4.39795$  N

De los valores anteriores se puede observar que las fuerzas  $F_{12}$  con  $F_{54}$  y  $F_{23}$  con  $F_{43}$  son iguales, lo que corresponde a la simetría de la extremidad, lo que en cierto modo resulta obvio, mientras que la causa de que las fuerzas  $F_{01}$  y  $F_{05}$  no sean iguales, es debido a que en el eslabón 1, (ver figura 4.3.) se conecta el motor que proporciona el torque para mover el sistema, mientras que en el eslabón 5, (ver figura 4.7.) no existe un torque.

La gráfica **Torque vs Desplazamiento** se observa que el comportamiento del torque es similar al de las fuerzas, presenta un aumento casi constante hasta aproximadamente los 22 cm de desplazamiento, pasando este punto los incrementos en el torque cada vez son mayores, hasta los 28 cm de desplazamiento, pasando este punto los incrementos son mucho más grandes. alcanzando su valor máximo en los 30 cm.

De los cálculos se obtiene que el máximo valor del torque es:

Máxima magnitud del torque 0.18956 N m

## 4.5. Cálculos

Los cálculos de la cinemática y dinámica de la extremidad se realizaron utilizando el software Mathematica 4.1®, con lo que se determinó la posición, las velocidades y aceleraciones tanto lineales como angulares de la extremidad, también se calcularon las fuerzas en cada uno de los pares cinemáticos rotacionales con los que cuenta la extremidad.

En el anexo “A” se muestra el programa.

# CAPITULO 5.

# DISEÑO CONCEPTUAL

## CAPITULO 5. DISEÑO CONCEPTUAL

### 5.1. Introducción

En este capítulo se presenta la aplicación de la metodología de diseño mostrada en la figura 5.1 para llevar a cabo el diseño del cojinete y la propuesta conceptual de la extremidad de un robot conocido con el nombre de “Frog Leg” con el fin de evaluar experimentalmente un cojinete de politetrafluoretileno (PTFE) el cual va a ser diseñado.

El robot frog Leg debe proporcionar un movimiento tal que pueda trasladar discos de silicio en un arreglo radial de caseteras como se mostró en la figura 1.1.

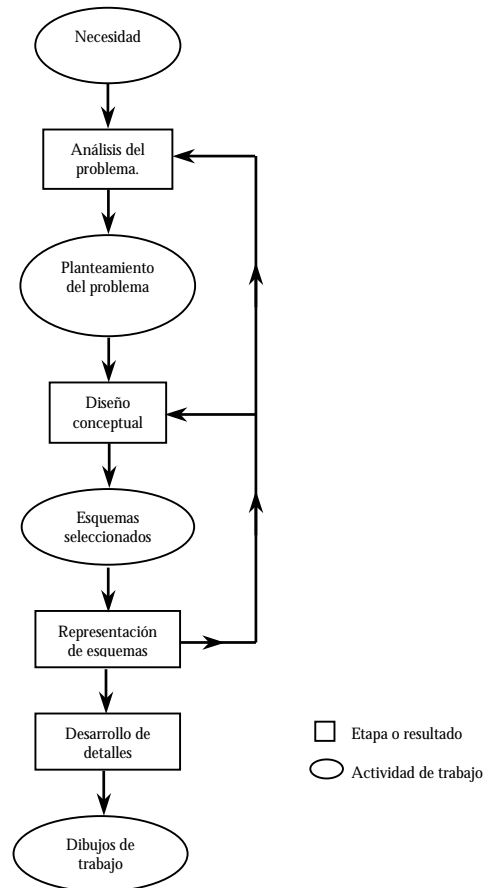


Figura 5.1. Proceso de diseño

### 5.2. Definición del Problema

Diseñar un cojinete fabricado de politetrafluoretileno PTFE (mejor conocido por su marca comercial como Teflón®), para la extremidad de un robot frog leg, y determinar si es capaz de competir con un rodamiento ultralimpio en cuanto a generación de partículas en un nivel de limpieza clase 10.

### 5.3. Especificaciones y Requerimientos Generales

A continuación se enuncian las especificaciones que debe de cumplir el diseño de la extremidad del robot tipo frog leg

1. Capacidad de carga hasta 10 N.
2. Tener control sobre las partículas que pueda generar el robot
3. Todos los componentes deben estar por debajo del producto a manipular (para este caso un disco de silicio)
4. Se deben manipular los discos en posición horizontal
5. Se busca un nivel de limpieza clase 10
6. Uso de pares rotacionales para obtener el movimientos lineales
7. Todos los elementos mecánicos deben estar contenidos dentro del robot
8. El volumen de trabajo debe ser un área descrita por un círculo de 90 cm de diámetro cuando menos
9. Transportar un disco a la vez.

### 5.4. Diseño Conceptual

Analogía con una rana

Comparando la forma de una rana con un robot del tipo llamado frog leg, desde el punto de vista funcional, y analizando las diferentes partes constituyentes de una rana se tiene la siguiente analogía:

- Cerebro-computador.
- Cuerpo-estructura mecánica.
- Piernas o ancas-extremidad
- Músculos-motores.
- Sentidos-sensores.

Imaginando el movimiento de la extremidad del robot similar al movimiento de las piernas de una rana al saltar, comparativamente cuando la rana extiende sus piernas, el robot extiende su extremidad, y cuando la rana las retrae, el robot retrae su extremidad.

En la figura 5.2 se muestra el movimiento que debe de tener la extremidad del robot, y en la figura 5.3 se muestra la similitud de este con una rana.

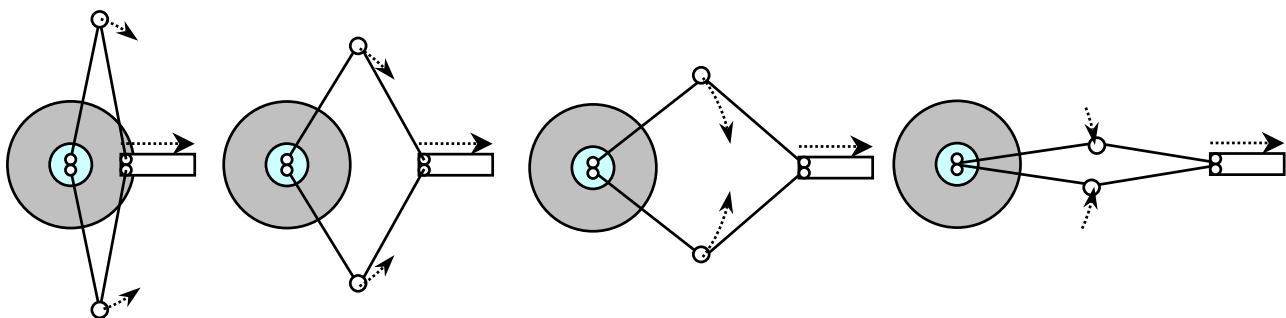


Figura 5.2. Desplazamiento lineal de la extremidad.  
 .....> Desplazamiento de los elementos de la articulación.

En la figura 5.3., se puede observar la similitud de la extremidad del robot con una rana

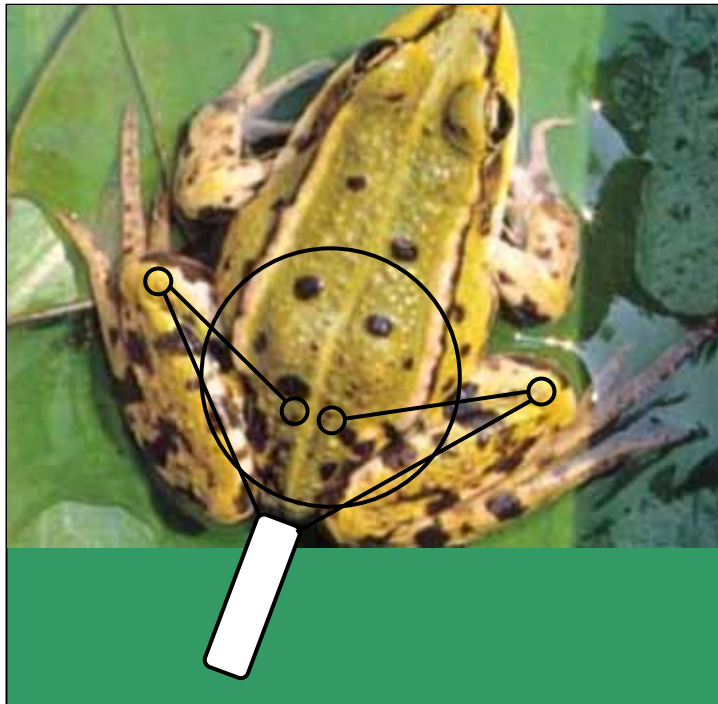


Figura 5.3. Comparación entre un robot frog leg y una rana

Considerando lo anterior, se determina a continuación las funciones necesarias para obtener el movimiento lineal a través de pares cinemáticos rotacionales, para lo cual se propone el diagrama de caja negra mostrado en la figura 5.4., en el cual se establece como entradas; la energía y las señales necesarias para controlar el movimiento lineal resultante en el sistema, y como la salida; el movimiento lineal del E. T.



Figura 5.4. Modelo de caja negra de una extremidad

Para lograr pasar del estado inicial al estado final, en la figura 5.5. se especifican las funciones.

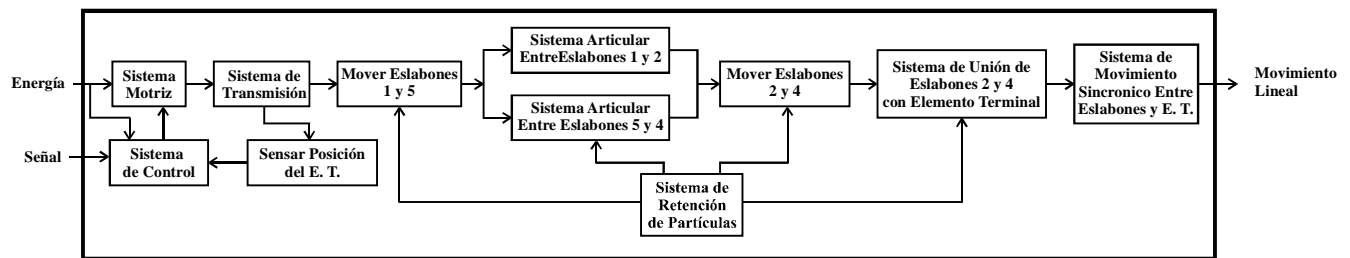


Figura 5.5. Análisis de funciones de la extremidad del robot frog leg

Para contar con una referencia de los diferentes eslabones, se presenta la figura 5.6., en la cual los cubos representan las funciones necesarias para que el robot cumpla con los movimientos requeridos.

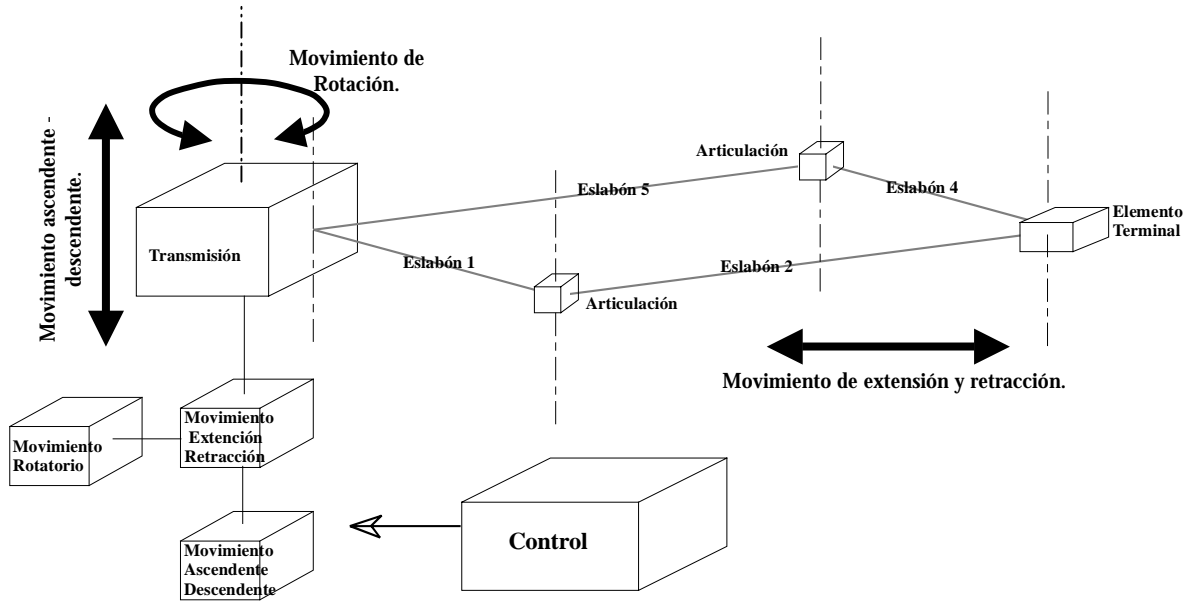


Figura 5.6. Esquema del robot frog leg, indicando los movimientos requeridos

### 5.4.1. Sistemas Funcionales

A continuación se explican las funciones de cada uno de los sistemas en que fue dividida la articulación:

- **Sistema motriz.**  
Este sistema es el encargado de mover los eslabones además de detenerse en las posiciones de extensión y retracción del brazo.
- **Sistema de control.**  
Este sistema es el encargado de establecer una interfase entre el motor y los sensores con una computadora para poder realizar la programación de los movimientos que debe de realizar la extremidad del robot.
- **Sistema de transmisión.**  
Como debe existir una reducción de velocidad del motor hacia los eslabones 1 y 5, además de contar con un movimiento síncrono entre los eslabones para lograr el movimiento lineal, este sistema es el encargado de realizar dicha reducción y sincronización de movimiento.
- **Sistema de sensado de posición**  
Este sistema es el encargado de detener la extremidad una vez alcanzada la posición requerida de extensión o retracción según sea el caso

- **Sistema de retención de partículas**  
Este sistema es el encargado de evitar la salida de las partículas de los eslabones al medio de trabajo
- **Sistema de unión entre la transmisión y los eslabones**  
Este sistema es el encargado de unir a la transmisión con los eslabones 1 y 5
- **Sistema de articulación entre eslabones 1, 2. Y 5, 4.**  
Este sistema es el encargado de permitir un movimiento de rotación entre los eslabones en el plano horizontal.
- **Sistema de unión de eslabones 2 y 4 con E. T.**  
Este sistema se encarga de unir a los eslabones 1 y 4 con el elemento terminal
- **Sistema de transmisión sincrónica de los eslabones 2 y 4 con E. T.**  
Este sistema es el encargado de mantener una relación de transmisión sincrónica entre el E. T. y los eslabones 2 y 4, obteniéndose el desplazamiento lineal del E. T., como se muestra en la figura 5.2.

Una vez definidas las funciones necesarias para lograr el movimiento de la extremidad del robot tipo frog leg, se presenta en la figura 5.7., una matriz morfológica, generada en una sesión de lluvia de ideas, mostrando los diferentes conceptos generados para cada uno de los sistemas.

Matriz Morfológica

5.4.2. Matriz Morfológica

		Opciones de Solución														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
I.	Sistema motor	Motor de C. D. Motor CD con reductor	Motor Neumático. Motor neumático	Motor a pasos. Motor a pasos	Servomotor Servomotor											
II.	Sistema de Control	Banda de potencia del motor de C. D.	Válvula	Banda de potencia del motor a pasos	Control del Servo motor											
III.	Sistema de Transmisión	Engrane	Banda cruzada	Banda y poleas dentadas												
IV.	Sistema de Posicionamiento	Micro Switch	Sensor	Encoder	Control del Servo motor											
V.	Control de partículas en la base de la extremidad															
VI.	Control de partículas en los eslabones															
VII.	Control de partículas en el elemento terminal															
VIII.	Unión entre transmisión y eslabones				Soldadura											
IX.	Articulación entre eslabones															
X.	Cojinete															
XI.	Unión de eslabones 2 y 4 con E. T.	Tornillos	Segura E. T.	Remache	Clic											
XII.	Transmisión sincronizada de los eslabones 2 y 4 con E. T.	Engrane	Banda cruzada	Arreglo de poleas	Arreglo de poleas											

Figura 5.7. Matriz Morfológica con las opciones de solución para cada sistema.



A continuación se mencionan los diferentes conceptos de solución generados para cada uno de los sistemas

**Para el sistema motriz se generaron cuatro conceptos:**

1. Motor de corriente directa
2. Motor neumático
3. Motor a pasos
4. Servomotor

**Para el sistema de control se generaron cuatro conceptos:**

1. Tarjeta de control del motor de corriente directa
2. Válvula 3/2 de aire
3. Tarjeta de control del motor a pasos
4. Fuente y control del servomotor

**Para el sistema de transmisión se generaron tres conceptos:**

1. Engranajes en las flechas de transmisión, (relación de transmisión 1 a 1)
2. Poleas con banda cruzada (relación de transmisión 1 a 1)
3. Banda y poleas dentadas, una polea a la flecha y otra a un eslabón (relación de transmisión 2 a 1)

**Para el sistema de posicionamiento se generaron tres conceptos:**

1. Micro switch
2. Sensor de presencia
3. Encoder

**Para el sistema de control de partículas en la base de la extremidad se generaron once conceptos:**

1. Reten de labio sujeto a la base por tornillos
2. Reten de labio sujeto a la flecha por tornillo
3. Reten de labio alojado en ranura
4. Reten de labio en U alojado en ranura de colocación rápida
5. Reten de doble labio alojado en ranura de colocación rápida
6. Reten de doble labio
7. Reten de labio sujeto a la flecha por ajuste
8. Reten de labio sujeto a la flecha por rosca
9. Reten de labio sin resorte
10. Reten de labio con resorte
11. Reten de empaquetadura - doble labio

**Para el sistema de control de partículas en los eslabones se generaron siete conceptos**

1. Anillo de doble labio
2. O-RING
3. Rondana, las superficies de los eslabones hacen contacto con la cara de la rondana
4. Doble rondana, existiendo movimiento relativo solo entre ellas
5. Sello de copa
6. Sello de ajuste alojado en ranura
7. Sello de labio ajustado a la flecha, el labio en contacto con la superficie del eslabón y el sello con ajuste de apriete a la flecha

**Para el sistema de control de partículas entre los eslabones 2 y 4 con el E. T., se generaron ocho conceptos**

1. Anillo de doble labio
2. O-RING
3. Rondana, las superficies de los eslabones hacen contacto con la cara de la rondana
4. Doble rondana, existiendo movimiento relativo solo entre ellas
5. Sello de copa
6. Sello de ajuste alojado en ranura
7. Sello de labio ajustado a la flecha, el labio en contacto con la superficie del eslabón y el sello con ajuste de apriete a la flecha
8. Sello de labio ajustado a base, el labio en contacto con la superficie del eslabón y el sello con ajuste de apriete al eslabón que lo aloja

**Para el sistema de unión entre transmisión y eslabones**

1. Unión flecha eslabón por ajuste de apriete (permanente)
2. Unión flecha eslabón por roscado
3. Unión flecha eslabón por ajuste de deslizamiento y prisionero
4. Unión de la flecha con el eslabón por soldadura
5. Unión flecha eslabón por ensamble espiga - caja con tornillo
6. Unión flecha eslabón por dos tornillos
7. Unión flecha eslabón por ensamble espiga - ranura con tornillo
8. Unión flecha eslabón por cola de milano
9. Unión flecha eslabón por ensamble espiga redonda - caja y tornillo
10. Unión flecha eslabón por ensamble con traslape a la flecha y tornillo

**Para el sistema de articulación entre los eslabones se generaron 11 conceptos:**

1. Tornillo pasado con tuerca.
2. perno pasado con seguro E o C
3. Tornillo sujeto a un eslabón
4. Perno sujeto a eslabón y asegurado con seguro E o C
5. Flecha roscada por ambos lados
6. Perno asegurado por ambos lados con seguros
7. Flecha ranurada asegurada con perno
8. Flecha sujeta con clic
9. Tornillo en el que la cabeza funciona como flecha
10. Perno asegurado por tornillo

**Para el concepto del cojinete se generaron nueve alternativas:**

1. Cojinete con hélice interna.
2. Cojinete ranurado.
3. Cojinete con sellos de labio.
4. Cojinete de cilindro.
5. Cojinete forma I.
6. Cojinete forma T.
7. Cojinete forma I con retenes de labio.
8. Cojinete forma T con reten de labio.
9. Cojinete forma T con retenes de labio.

**Para el sistema de unión de los eslabones 2 y 4 con E. T., se generaron cuatro conceptos:**

1. Sujeción por tornillo.
2. Sujeción por seguros E o C.
3. Sujeción por remache.
4. Sujeción por uñas en la flecha.

**Para el sistema de transmisión sincrónica de los eslabones 2 y 4 con E. T., se generaron 6 conceptos:**

1. Engranajes
2. Poleas y banda cruzada
3. Banda y poleas dentadas, una polea a un a de las flechas del E. T. y otra a uno eslabón (relación de transmisión 2 a 1).
4. Arreglo de banda y poleas dentadas, la banda tiene dentado por ambos lados.
5. Arreglo simétrico de banda y poleas dentadas.
6. Arreglo de banda y poleas dentadas.

### 5.4.3. Evaluación de los Conceptos Generados

Para realizar la evaluación de los conceptos y determinar la mejor opción para cada sistema se muestra en la figura 5.8 la escala de calificaciones, considerando a 0 como la más baja calificación en la propiedad o característica que se este buscando, y 10 como la mejor calificación.

Escala de once puntos	Significado
0	Muy difícil de obtener o prácticamente inútil
1	Inadecuada o muy difícil de obtener
2	Muy mala
3	Mala
4	Tolerable
5	Adecuada
6	Satisfactoria
7	Buena
8	Muy buena
9	Excelente
10	Ideal

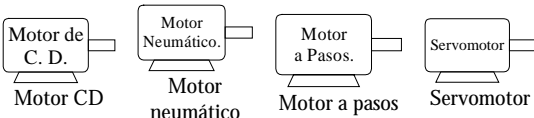
Figura 5.8. Escala de evaluación de las matrices de decisión de once puntos

[Cross 1999]

Utilizando la escala numérica de la figura 5.8., a continuación se presentan de la figura 5.9 a la figura 5.20., las matrices de decisiones para cada uno de los sistemas. La calificación más alta corresponderá al mejor concepto de solución.

Matriz de decisión del sistema motriz:

**Generación de movimiento.**

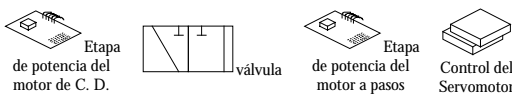


	1	2	3	4
Precio	10	6	8	2
Vibración	10	10	6	10
Precisión	8	6	8	2
Comercial	10	8	10	6
Fácil control	10	10	8	10
Reductor de velocidad	2	4	10	10
control de velocidad	6	2	10	10
	56	46	60	50

Figura 5.9. Matriz de selección del Sistema motriz.

Matriz de decisión del sistema de control:

**Control**

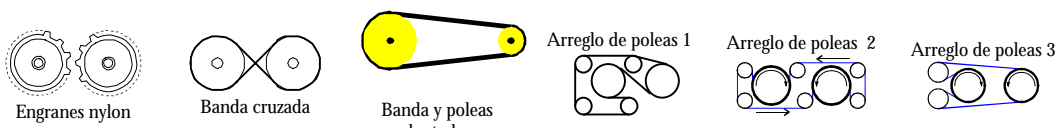


	1	2	3	4
Precio	10	6	10	2
Comercial	10	8	10	10
Ensamble	10	10	10	10
Desensamblable	4	10	4	10
Fácil operación	10	10	8	5
	44	44	42	37

Figura 5.10. Matriz de selección del Sistema de control.

Matriz de decisión del sistema de transmisión:


**Transmisión sincrónica**



	1	2	3	4	5	6
Costo	8	8	8	4	2	6
Ensamble	10	7	8	4	2	6
Desensamblable	10	7	8	4	2	6
Volumen	10	8	7	2	2	4
Componentes	10	8	8	4	2	6
Presenta singularidades con el resto del sistema.	0	0	10	0	0	0
	48	38	49	18	10	28

Figura 5.11. Matriz de selección del Sistema de transmisión.

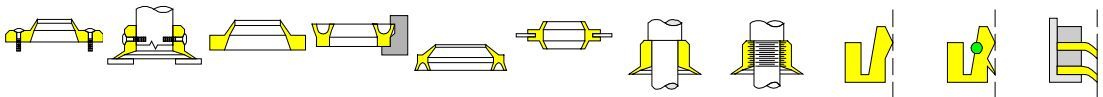
Matriz de decisión del sistema de sensado de posición:



Posicionamiento	1 suich	2 sensor	3 encoder	4 control del Servo motor
Precio	10	4	6	1
Comercial	10	10	6	4
Ensamble	10	10	10	10
Desensamblable	10	10	10	10
	40	34	32	25

Figura 5.12. Matriz de selección del Sistema de sensado de posición


Matriz de decisión del sistema de retención de partículas:



Retenes A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ensamble	7	6	8	10	10	8	10	8	8	8	8
Desensamblable	7	6	4	4	4	8	4	8	8	8	8
Fabricabilidad	8	8	10	8	7	4	10	9	2	2	2
Costo	9	7	10	9	8	2	7	5	5	3	1
	31	27	32	31	29	22	31	30	23	21	19

Figura 5.13. Matriz de selección del Sistema de retención de partículas

Matriz de decisión del sistema de retención de partículas entre los eslabones 2, 3 y 4, 5:



Retenes B	1	2	3	4	5	6	7
Costo	8	10	10	10	6	6	8
Ensamble	10	10	10	10	8	6	10
Desensamblable	10	8	10	10	8	10	10
Fabricabilidad	6	1	10	10	6	8	10
Sellado	7	6	4	5	8	7	10
	41	35	44	45	36	37	48

Figura 5.14. Matriz de selección del sistema de retención de partículas entre los eslabones 2, 3 y 4, 5

Matriz de decisión del sistema de de retención de partículas entre los eslabones 3 y 4 con E. T.:

Retenes C								
	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo	8	10	10	6	6	6	8	8
Ensamble	10	10	10	10	8	6	10	10
Desensamble	10	8	10	10	8	10	10	8
Fabricabilidad	6	1	10	10	6	8	10	8
Sellado	9	6	4	7	8	7	10	10
	43	35	44	43	36	37	48	44

Figura 5.15. Matriz de selección del sistema de retención de partículas entre los eslabones 3 y 4 con E. T.

Matriz de decisión del sistema de unión entre la transmisión y los eslabones:

Unión Flecha Eslabón										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fabricabilidad	7	5	6	8	3	10	2	1	9	4
Tiempo de elaboración	9	7	8	8	3	10	2	1	4	5
Ensamble	10	9	8	1	6	5	3	2	4	7
Desensamble	0	9	10	0	7	4	6	2	7	7
Rigidez	8	8	8	10	4	2	4	6	4	1
	34	38	40	27	23	31	17	12	28	24

Figura 5.16. Matriz de selección del Sistema de unión entre la transmisión y los eslabones

Matriz de decisión del sistema de articular entre eslabones:

Articulación										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costo	3	3	10	9	8	2	7	1	5	6
Fabricabilidad	5	2	9	10	6	3	8	1	7	4
Ensamble	6	2	8	3	4	1	5	19	9	7
Desensamble	6	4	10	4	8	4	7	5	10	9
Tiempo de elaboración	6	5	9	10	9	5	7	4	8	6
No. de piezas	6	6	10	8	8	4	8	10	10	6
	32	22	56	44	43	19	42	40	49	38

Figura 5.17. Matriz de selección del sistema articular entre eslabones

Matriz de decisión del cojinete:










Cojinetes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Costo	8	3	5	10	7	8	4	6	7
Fabricabilidad	9	3	5	10	7	8	4	6	6
Tiempo de elaboración	8	3	5	10	7	9	6	6	6
Ensamble	10	10	9	10	6	10	6	10	9
Desensamble	5	3	3	3	2	10	2	10	10
Sellado	3	2	10	0	0	0	10	5	10
	43	24	37	43	29	45	32	43	48

Figura 5.18. Matriz de selección del cojinete

Matriz de decisión del sistema de unión de eslabones 2 y 4 con E. T.:

Unión de eslabones 2 y 4 con E. T.

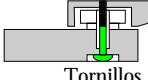

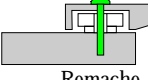

				
	Tornillos	Seguro "E" o "C"	Remache	Clic
	1	2	3	4
Costo	6	10	8	1
Fabricabilidad y/o Comercial	10	7	8	1
Ensamble	10	8	10	10
Desensamble	10	5	0	7
Tiempo de elaboración	6	8	10	1
	42	38	36	20

Figura 5.19. Matriz de selección del Sistema de unión de eslabones 2 y 4 con E. T.

Matriz de decisión del sistema de transmisión sincrónica de los eslabones 2 y 4 con E. T.:

Transmisión sincrónica de los eslabones 2 y 4 con E. T.

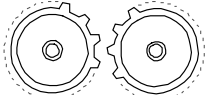
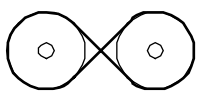
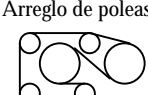
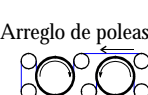
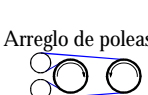
					
	Engranajes	Banda cruzada	Arreglo de poleas 1	Arreglo de poleas 2	Arreglo de poleas 3
	1	2	4	5	6
Costo	8	8	4	2	6
Ensamble	10	7	4	2	6
Desensamble	10	7	4	2	6
Volumen	10	8	2	2	4
Componentes	10	8	4	2	6
	48	38	18	10	28

Figura 5.20. Matriz de selección del Sistema de transmisión sincrónica de los eslabones 2 y 4 con E. T.



Es importante tomar en cuenta que existen relaciones entre los sistemas funcionales, los cuales deben ser compatibles, estas relaciones se muestran en la figura 5.21., la cual permite definir la selección final de los conceptos de solución

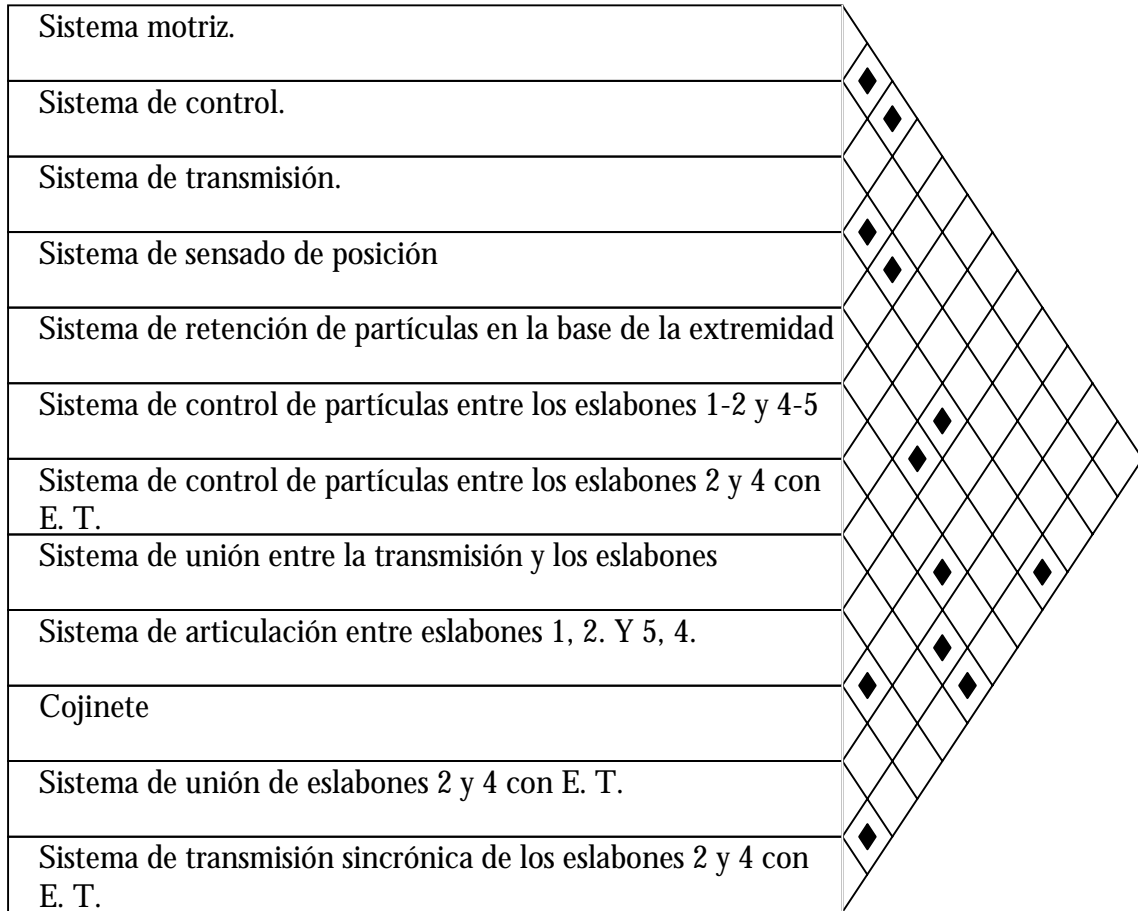


Figura 5.21. Matriz de relaciones entre las funciones

Después de la evaluación anterior, se debe verificar que los conceptos de solución sean compatibles, para lo cual, se resuelve la matriz de la figura 5.21 teniendo como resultado la matriz de la figura 5.22., en la que como se observa, todos los conceptos que tienen relación son compatibles.

Sistema motriz.									
Sistema de control.	Si								
Sistema de transmisión.		Si							
Sistema de sensado de posición	Si								
Sistema de retención de partículas en la base de la extremidad		Si							
Sistema de control de partículas entre los eslabones 1-2 y 4-5			Si						
Sistema de control de partículas entre los eslabones 2 y 4 con E. T.			Si						
Sistema de unión entre la transmisión y los eslabones				Si				Si	
Sistema de articulación entre eslabones 1, 2. Y 5, 4.					Si				
Cojinete	Si				Si				
Sistema de unión de eslabones 2 y 4 con E. T.									
Sistema de transmisión sincrónica de los eslabones 2 y 4 con E. T.	Si								

Figura 5.22. Determinación de si los conceptos de solución son compatibles.

Finalmente se obtiene la figura 5.23., en la cual, se visualiza qué alternativas son las más apropiadas para cada uno de los sistemas:

De acuerdo al objetivo planteado inicialmente se trabaja a continuación con el sistema X “Cojinete” en su etapa de diseño de detalle. Las demás opciones de los sistemas se desarrollarán en un trabajo posterior.

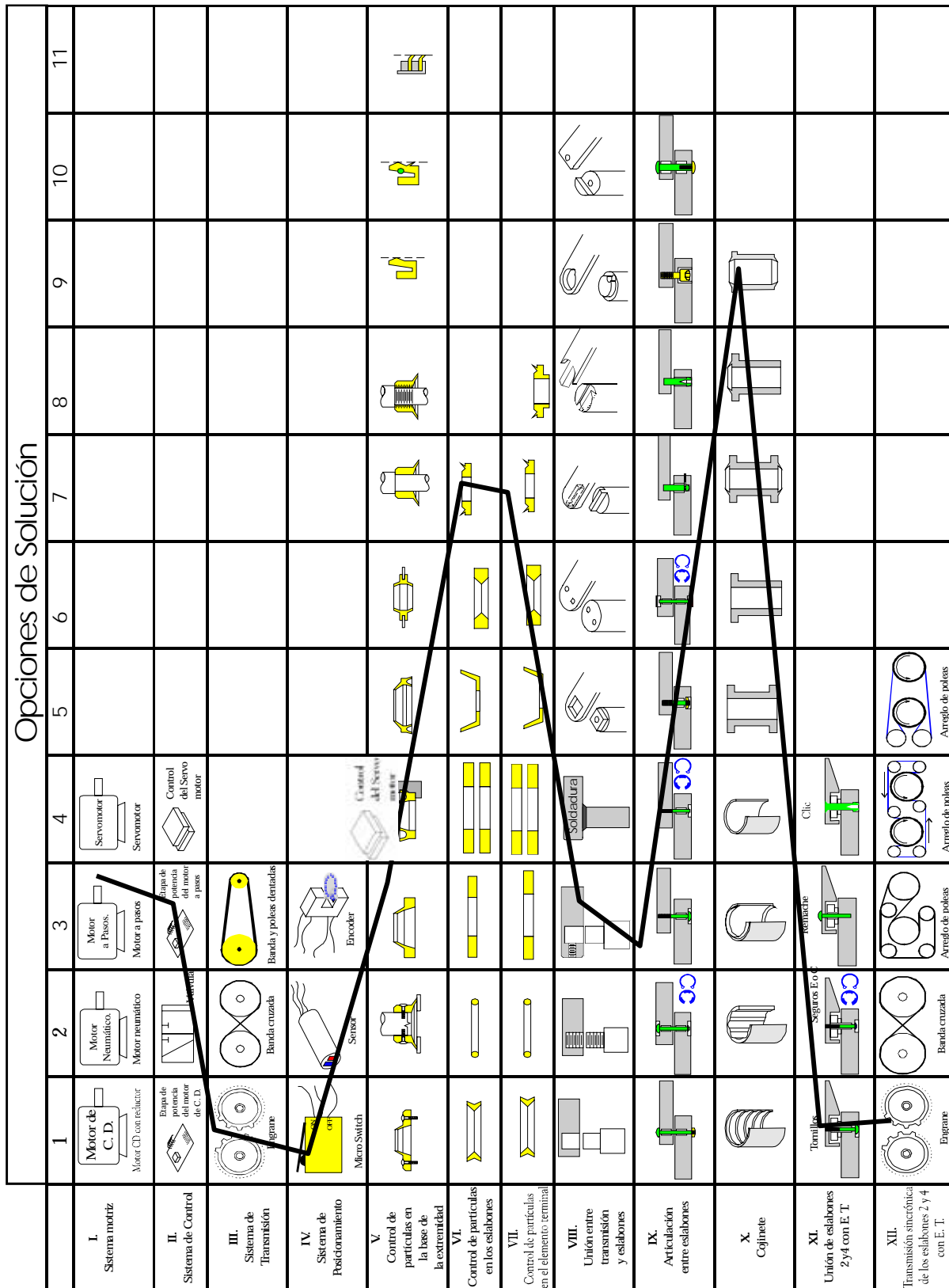


Figura 5.23. Carta morfológica resuelta

# CAPÍTULO 6.

# DISEÑO DE DETALLE DEL COJINETE.

## CAPÍTULO 6. DISEÑO DE DETALLE DEL COJINETE.

### 6.1. Introducción

Después de realizado el diseño conceptual del capítulo anterior se procede al diseño de detalle del cojinete, para lo cual se presenta a continuación una breve descripción sobre la ley de Petroff para el cálculo de cojinetes, la que se utilizara para el cálculo del cojinete.

### 6.2. Ley de Petroff

El fenómeno del rozamiento fue explicado por primera vez por Petroff. Este análisis da un coeficiente de fricción aceptable y permite introducir parámetros adimensionales de utilidad posterior.

De acuerdo con Newton, el esfuerzo cortante  $\tau$  en la película de liquido que se encuentra entre dos placas moviéndose una con respecto a otra, (figura 1) varía directamente con la velocidad  $U$  e inversamente con el espesor  $h$  de la película. Por tanto:

$$\tau = \mu \frac{U}{h} = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

Donde el coeficiente de proporcionalidad  $\mu$  se llama viscosidad absoluta o viscosidad dinámica.

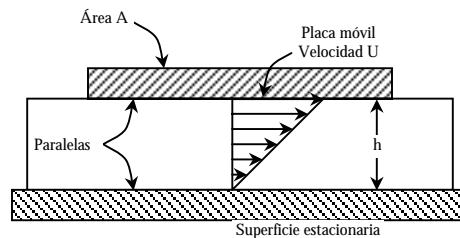


Figura 6. 1 Placa plana moviéndose sobre un fluido

La ecuación 6.1 puede adaptarse fácilmente al cojinete cilíndrico la placa se supone enrollada en el eje cilíndrico de la figura 2. si  $2r$  o  $d$  es el diámetro del eje y  $l$  es su longitud en dirección axial, el área  $A$  desarrollada del eje es  $2\pi \cdot r \cdot l$ .

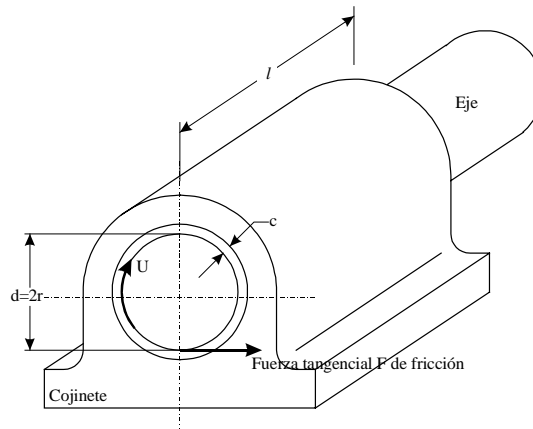


Fig. 6.2. Eje girando centrado en un cojinete.

El espesor  $h$  se vuelve la tolerancia radial  $c$ , o la diferencia entre el radio de la flecha y el radio interno del cojinete. Por tanto:

$$\tau = \mu \frac{U}{c} \quad (6.2)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6.3)$$

el momento de fuerza tangencial es igual a la fuerza multiplicada por el brazo de momento. Esto es:

$$T = (\tau \cdot A)r \quad (6.4)$$

sustituyendo los valores de  $\tau$  de las ecuaciones (6.1) y (6.2) tenemos que:

$$T = \mu \frac{U}{c} \cdot A \cdot r \quad (6.5)$$

$$T = \left( \frac{F}{A} \cdot A \right) r = F \cdot r \quad (6.6)$$

Igualando la ecuación (6.5) con la ecuación (6.6) se tiene:

$$\mu \frac{U}{c} \cdot A \cdot r = F \cdot r \quad (6.7)$$

Ahora sabiendo que:

$$F = W \cdot f \quad (6.8)$$

$$A = 2\pi \cdot r \cdot l \quad (6.9)$$

$$U = 2\pi \cdot r \cdot N \quad (6.10)$$

Donde  $W$  es la normal y  $N$  las revoluciones por minuto a la que gira la flecha.

Por otro lado, la carga que puede soportar un cojinete es la razón de la carga que actúa sobre el cojinete sobre el área proyectada de este, (ver figura 6.3.)

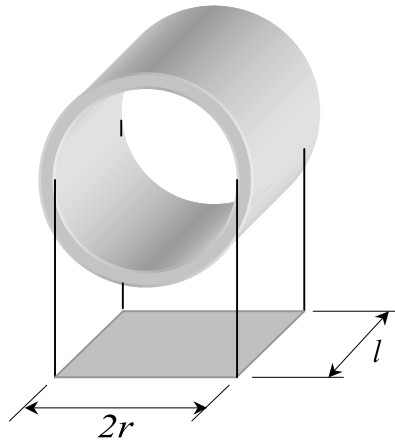


Figura 6.3. Área proyectada

Entonces:

$$P = \frac{W}{2 \cdot r \cdot l} \quad (6.11)$$

Despejando  $W$  de la ecuación (6.11) se tiene:

$$W = 2 \cdot P \cdot r \cdot l \quad (6.12)$$

Sustituyendo el valor de  $W$  de la ecuación (6.12) en la ecuación (6.8) se tiene:

$$F = 2 \cdot P \cdot r \cdot l \cdot f \quad (6.13)$$

Sustituyendo los valores de  $A$ ,  $U$  y  $F$  de las ecuaciones (6.9), (6.10) y (6.12) respectivamente en la ecuación (6.7) se tiene:

$$\frac{\mu(2\pi \cdot r \cdot N)(2\pi \cdot r \cdot l)}{c} = 2 \cdot P \cdot r \cdot l \quad (6.14)$$

Despejando  $f$  y simplificando la ecuación anterior se tiene:

$$f = \frac{\mu \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot N}{P \cdot c} \quad (6.15)$$

La ecuación (6.15) recibe el nombre de ley de Petroff

### 6.3. Cálculo del Cojinete

Una vez expuesta la ley de Petroff para el cálculo de cojinetes, se procede al cálculo del cojinete que se alojara entre los eslabones 1 y 2 y/o. Eslabones 4 y 5

A continuación se presentan los datos de referencia para llevar acabo el diseño del cojinete:

Diámetro nominal de la flecha	10 mm
Diámetro exterior del cojinete	22 mm
Diámetro interior nominal del cojinete	10 mm

### Ajustes

Para que exista un deslizamiento entre la flecha y el cojinete para lo cual se hace uso de las tablas B.1. y B.2. mostradas en el anexo B.

El ajuste seleccionando para permitir la condición de deslizamiento es un ajuste H11 para la flecha y h11 para el agujero, obteniéndose los siguientes valores:

- Diámetro del agujero  $10_{0.000}^{+0.110}$  mm
- Diámetro de la flecha  $10_{-0.090}^{0.000}$  mm

Inicialmente es necesario determinar las revoluciones por segundo de la flecha con respecto del cojinete. Usando la ecuación (6.16) se tiene:

$$N = \frac{\omega}{2\pi} \tag{6.16}$$

de donde:

$N$	Revoluciones por segundo [r.p.m.]
$\omega$	Velocidad angular [rad/seg]
$\pi$	3.14159265

El valor de la velocidad angular máxima se obtiene de la graficas 4.3 y 4.4 en las que se muestra que la velocidad angular del eslabones es 4.041 rad/seg, pero estas son velocidades angulares absolutas, con lo que la velocidad relativa de la flecha con respecto del cojinete es la suma de velocidades angulares, con lo que la velocidad angular es 8.082 red/seg. Sustituyendo el valor de la velocidad angular  $\omega$  en la ecuación 6.16 se obtiene:

$$N = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{8.0802}{2(3.14159265)} = 1.286131095 \text{ [r.p.s]}$$



Para el cálculo de la longitud del cojinete ( $l$ ), de la ecuación 6.11 se despeja la carga  $W$  y se substituye este valor en la ecuación 6.15 obteniendo:

$$f = \frac{\mu \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot N}{\frac{W}{2 \cdot r \cdot l} \cdot c} \quad (6.17)$$

simplificando:

$$f = \frac{\mu \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot N \cdot l}{W \cdot c} \quad (6.18)$$

despejando  $l$  de la ecuación (6.18) se obtiene:

$$l = \frac{f \cdot W \cdot c}{\mu \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot N} \quad (6.19)$$

de donde:

$l$	Longitud del cojinete. [m]
$f$	Coefficiente de fricción del cojinete. [-]
$W$	Carga soportada por el cojinete. [N]
$c$	Espacio entre flecha y cojinete. [m]
$\mu$	Viscosidad absoluta o viscosidad dinámica. [N s/m <sup>2</sup> ]
$\pi$	3.14159265 [-]
$r$	Radio de la flecha. [m]
$N$	Revoluciones por segundo. [r.p.s.]

Considerando los siguientes datos:

$$\begin{aligned} f &= 0.06 \\ W &= 0.528 \\ c &= 0.0001 \\ \mu &= 1 \\ r &= 0.005 \\ N &= 1.286131095 \end{aligned}$$

**Consideración.** “Cuando se proyecta un cojinete para lubricación limite la viscosidad del lubricante no tiene importancia”. [FEM-CTUN]

Por lo que para que el valor de la viscosidad no altere el resultado de la ecuación se hace a esta igual a 1 N s/ m<sup>2</sup>.

sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación (6.19) se obtiene:

$$l = \frac{(0.06)(0.528)(0.0001)}{(1)(4)(3.14159265)^2(0.005)^2(1.286131095)} = .00249574 \text{ [m]}$$

$$l = 2.49574 \text{ [mm]}$$

Esta es la longitud mínima que debe tener el cojinete.

### 6.4. Dimensionamiento

Realizados los cálculos anteriores se procede a dimensionar el cojinete. En la figura 6.4. se muestra el primer esquema del dimensionamiento del cojinete, (no se presentan los retenes de labio).

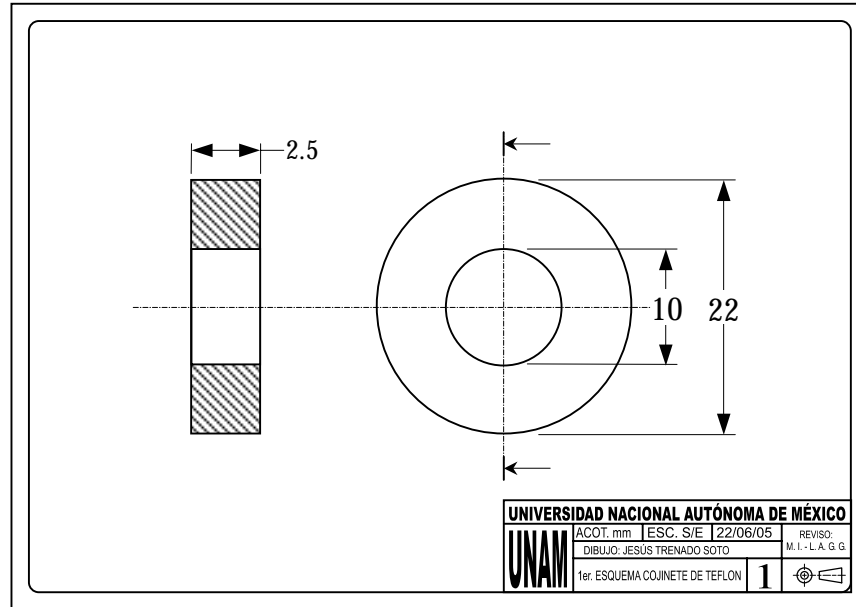


Figura 6.4. Primer esquema del cojinete

Después del diseño conceptual se determinó que el cojinete contara con retenes de labio, lo que se muestra en el siguiente esquema de la figura 6.5.

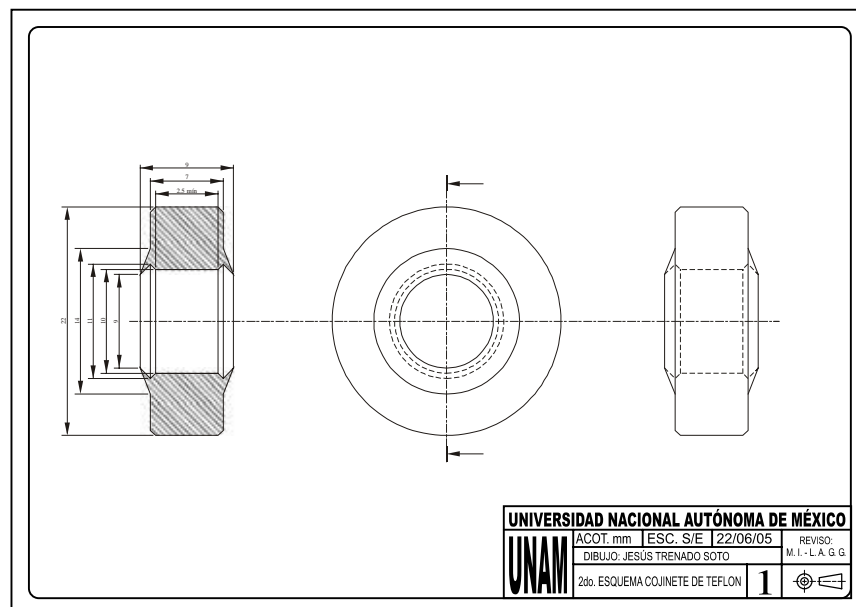


Figura 6.5. Segundo esquema del cojinete

Teniendo en cuenta las dimensiones donde se montara el cojinete en el módulo de prueba se determinan las dimensiones finales quedando el cojinete como se muestra en la figura 6.6.

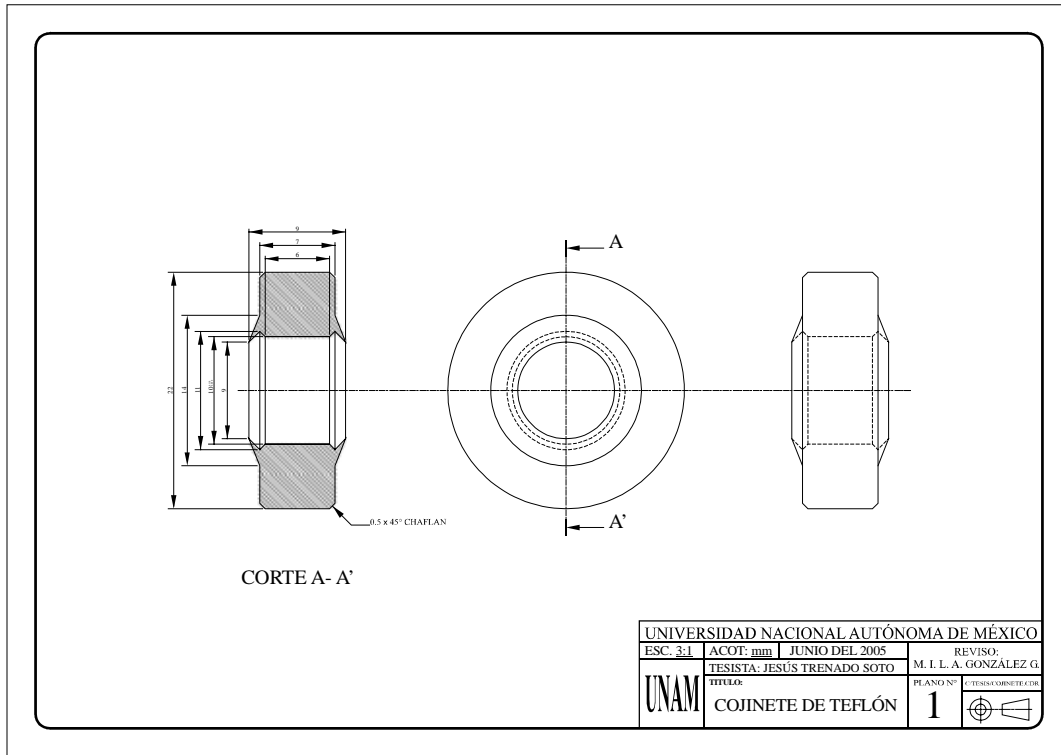


Figura 6.6. Plano del cojinete de teflón.

Una vez determinadas todas las dimensiones, se procedió a la fabricación del cojinete, en la fotografía 6.1. se muestra el cojinete fabricado.



Fotografía 6.1. Cojinete de teflón.

# CAPITULO 7.

# PRUEBAS Y RESULTADOS

## CAPITULO 7. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 7.1. Introducción

Una vez realizado el diseño y la fabricación del cojinete, el siguiente paso radicó en realizar pruebas de emisión de partículas al cojinete, para lo cual se monto en un módulo de prueba el cual se muestra en la figura 7.1.,

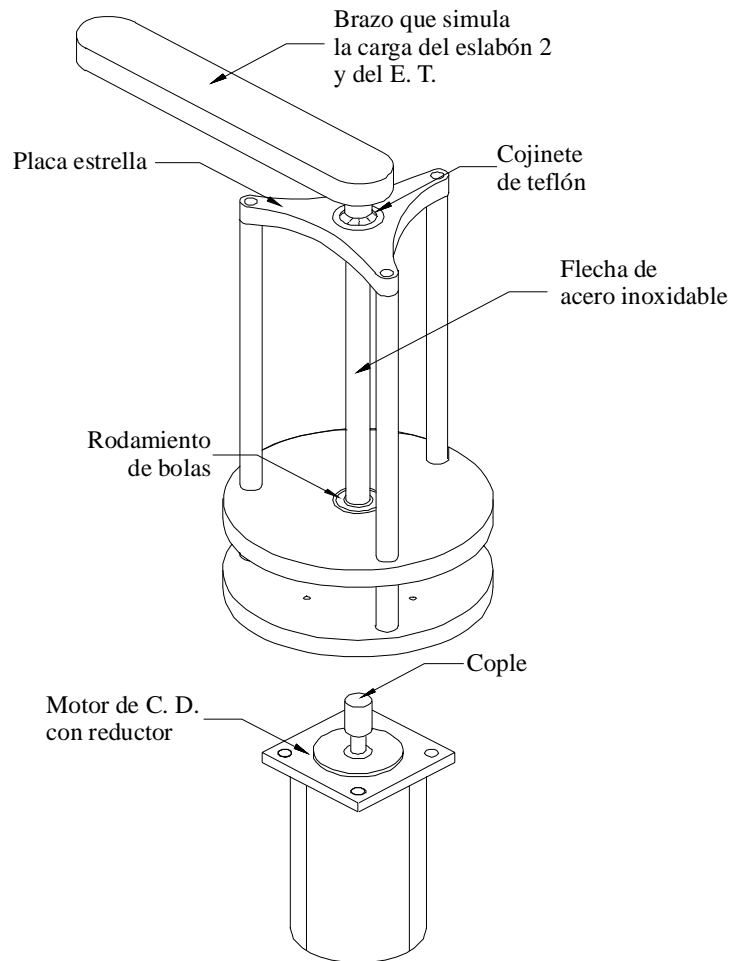


Figura 7.1. Módulo de prueba.

Etapas del trabajo experimental

- Montaje
- Pruebas
- Resultados

## 7.2. Montaje.

El montaje del cojinete se realizó dentro de un cuarto limpio que se encuentra en las instalaciones de Centro de Diseño y Manufactura de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Antes del ensamble, los componentes del módulo de prueba y el cojinete se sometieron a un proceso de limpieza, con el fin de asegurar que ninguna partícula que no fuera las que se generaran por el funcionamiento del cojinete fueran medidas por el contador.

El módulo de prueba asegura que la carga a la que se somete el cojinete solo es la que se le aplica por el brazo que simula la carga y no por ninguna otra causa.

En la fotografía 7.1., se muestra el ensamble del cojinete en la placa estrella del módulo de prueba.

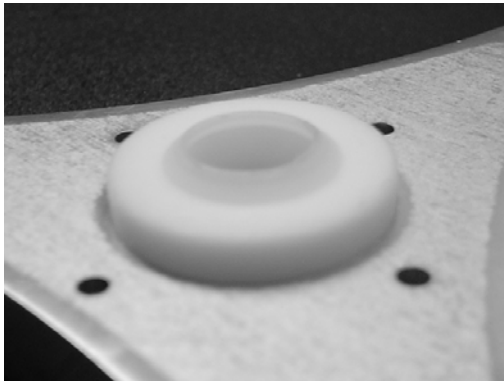


Fotografía 7.1. Colocación del cojinete en la placa estrella

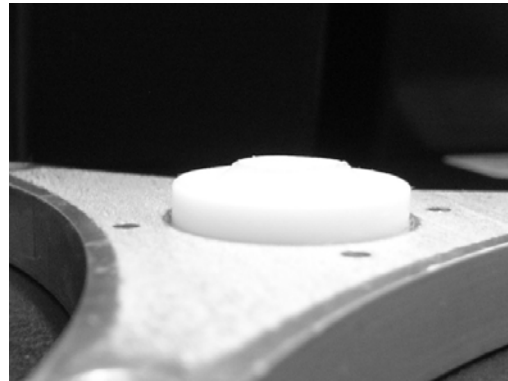
En las fotografías 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5 se muestra el montado del cojinete en la placa estrella



Fotografía 7.2 Placa estrella

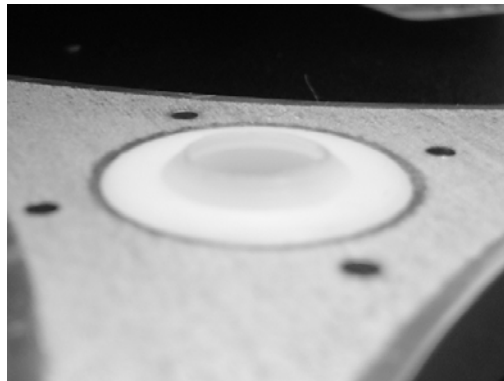


Fotografía 3  
Fotografías 7.3 y 7.4



Fotografía 4

Inserción del cojinete en la placa estrella

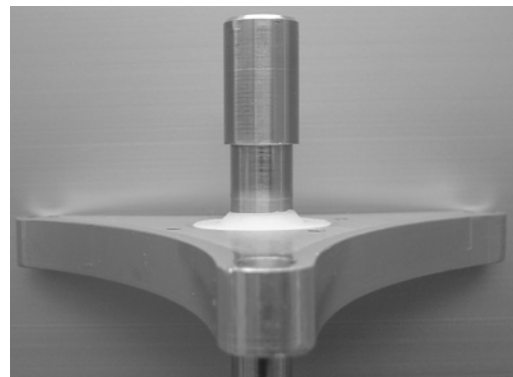


Fotografía 7.5 Cojinete colocado en la placa estrella

Después de colocar del cojinete en el alojamiento de la placa estrella se procede a insertar la flecha en el cojinete en las fotografías 7.6 y 7.7 se muestra a la flecha montada en el cojinete.



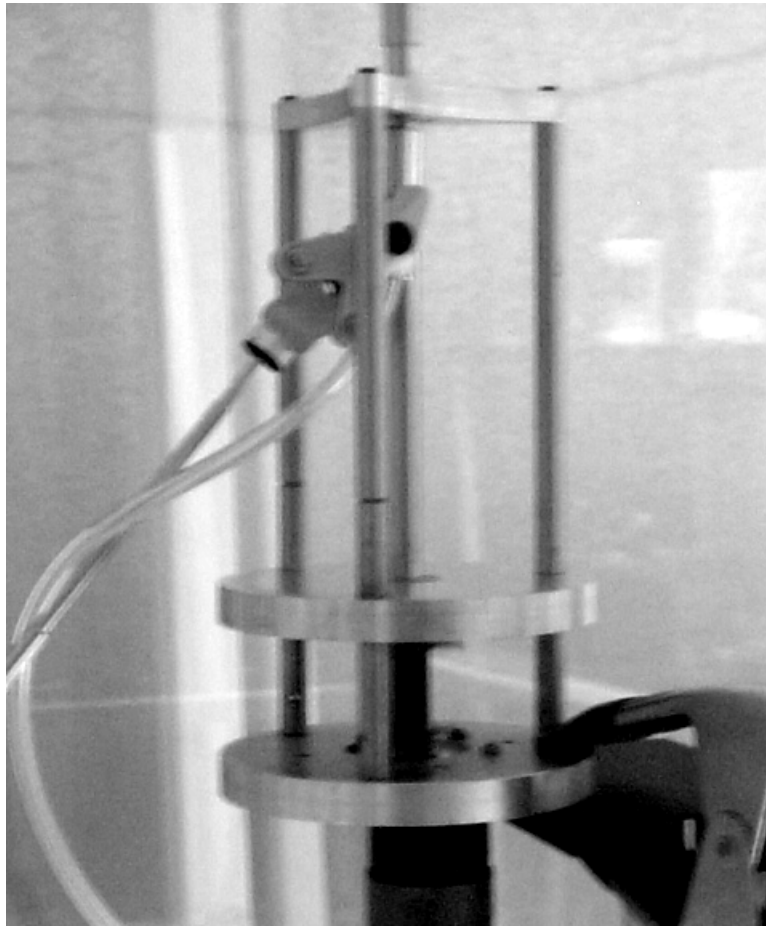
Fotografía 7.6  
Fotografías 7.6 y 7.7



Fotografía 7.7

Flecha insertada en el cojinete

En la fotografía 7.8 se muestra al módulo de prueba en la cámara de control.



Fotografía 7.8 Colocación del módulo de prueba en la cámara de control



### 7.3. Pruebas

Las pruebas consisten en realizar el monitoreo de partículas emitidas por dos diferentes cojinetes de PTFE montados en un módulo de prueba que simula la articulación rotacional entre los eslabones 1 y 2 de la extremidad del robot tipo frog leg.

El monitoreo de partículas se realiza en una cámara de control, (figura 7.2.) con un nivel de limpieza Clase 1, con lo que se asegura que el contador de partículas láser solo mide las partículas generadas por el funcionamiento del cojinete.

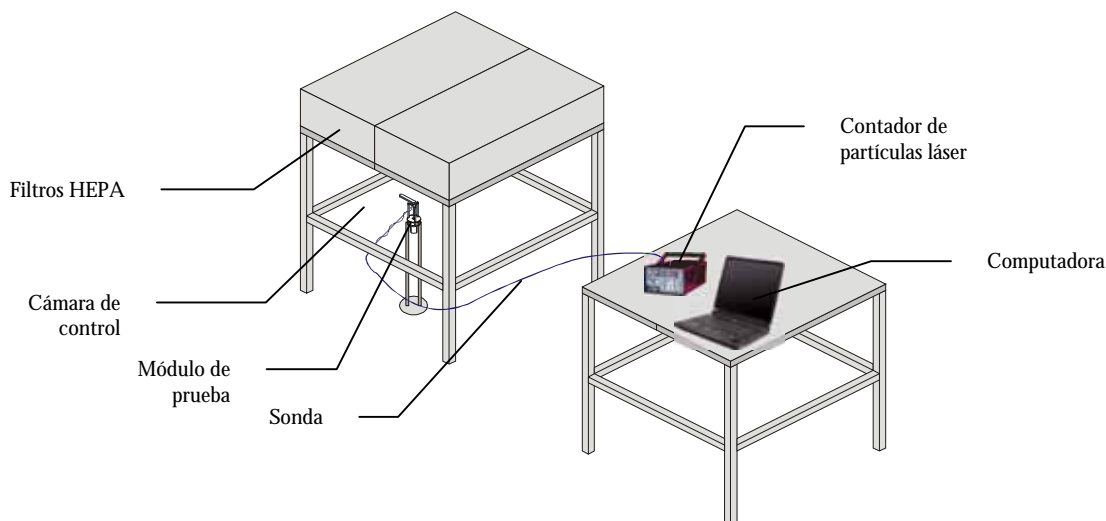


Figura 7.2. Cámara de control

#### Pruebas (Medición de Partículas)

- Variables de prueba
  - Carga= 1[N]
  - Velocidad de rotación del eje = 100 rpm
  - Tiempo por cada muestra de aire monitoreada = 1 min.
- Equipo de monitoreo
  - Contador de partículas láser de dos canales para detectar partículas de 0.3 y 0.5 micras
  - Sonda de acero inoxidable
  - Software de adquisición de datos
- Cámara de control
  - Dimensiones = 1.2 x 1.2 [m]
  - Altura = 0.6 [m]
  - Nivel de limpieza (Clase) = < Clase 1
  - Tipo de filtro = HEPA
  - Velocidad del flujo de aire = 750 ft<sub>min</sub>

El monitoreo de las partículas emitidas por los cojinetes, se realiza colocando la sonda por debajo del cojinete a probar, como se muestra en la figura 7.3., se programa el contador de partículas para que haga mediciones durante un tiempo determinado, repitiéndose  $n$  veces. Se programa el motor para que gire el elemento de rotación (eje) a ciertas rpm. Los datos obtenidos se almacenan para posteriormente ser graficados.

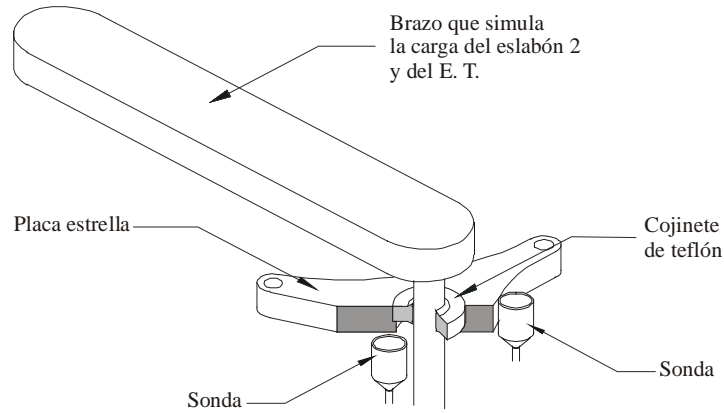


Figura 7.3. Puntos de muestreo de las partículas emitidas por el cojinete.

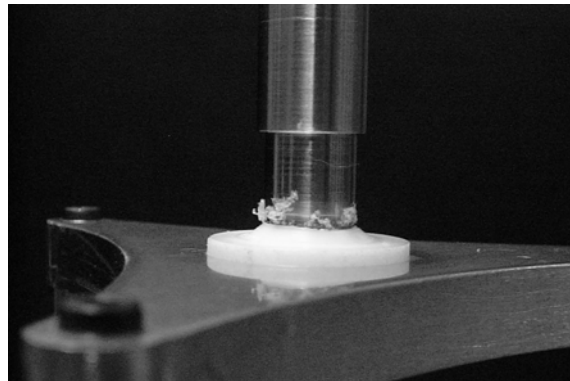
Una vez montado el cojinete en el módulo de prueba, se procede a realizar las pruebas las cuales consistieron en someter el cojinete a una carga mientras la flecha gira a 100 r.p.m. y medir la cantidad de partículas emitidas por el funcionamiento de este.

## 7.4. Resultados.

De las pruebas hechas a los cojinetes se obtuvo como resultado lo siguiente:

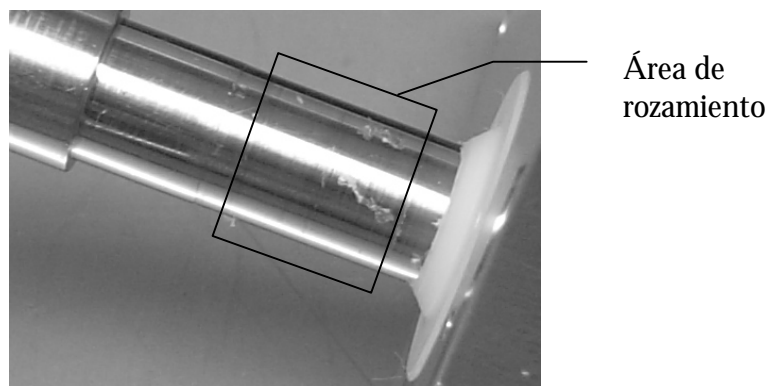
1. Los cojinetes desprenden partículas en forma de hojuelas a los nueve minutos aproximadamente de haber iniciado la prueba. Ejemplos de estas hojuelas se muestran en las fotografías 7.9., 7.10.
2. Acumulación de partículas en los retenes de labio. Ejemplos de esta acumulación de partículas se muestran fotografías 7.9., y 7.10.

En la fotografía 7.9. se muestra el desprendimiento de las partículas generadas por 6 horas de funcionamiento.

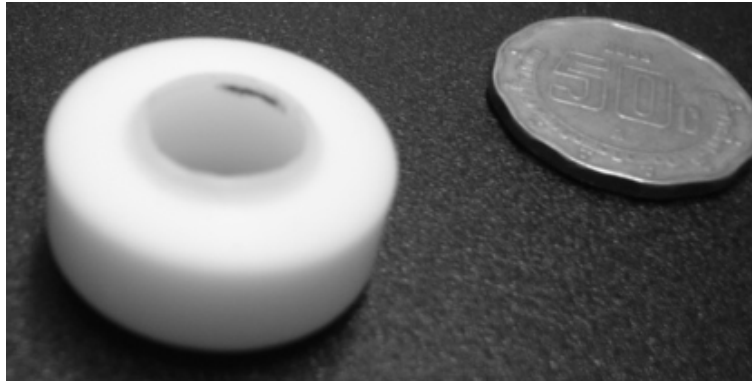


Fotografía 7.9. Partículas desprendidas por el cojinete

En la fotografía 7.10. se observa que el área delimitada por el rectángulo muestra en que parte estuvo trabajando el cojinete, se pueden advertir algunas de las partículas en forma de hojuelas desprendidas por el cojinete.

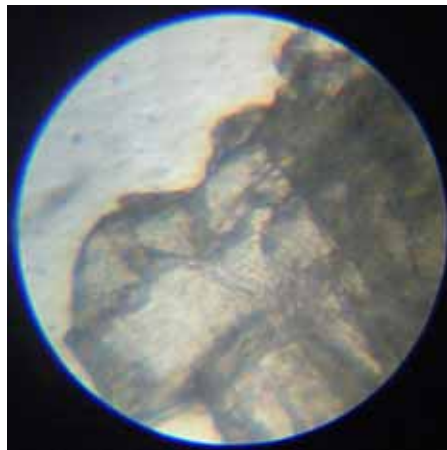


Fotografía 7.10 Área de rozamiento del cojinete



**Fotografía 7.11** Partículas acumuladas en el reten del cojinete

En la fotografía 7.11 se muestra la acumulación de las partículas de teflón en la cavidad del reten de labio



**Fotografía 7.12** Partícula de teflón vista al microscopio

En la fotografía 7.12 se muestra una de las partículas vista en un microscopio a 10 aumentos



**Fotografía 7.13** Partículas acumuladas en el reten del cojinete

En la fotografía 7.13 se muestran algunas de las partículas acumuladas en los retenes de labio del cojinete. Las partículas fueron colocadas sobre un papel cuadrículado de 5 mm lo que nos permite comprender el tamaño de estas.

# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES.

De las pruebas realizadas a los cojinetes se puede concluir lo siguiente:

- Las hipótesis planteadas al inicio de este trabajo resultaron falsas.
  - Es falso que, Un robot para cuartos limpios utiliza cojinetes de teflón en sus articulaciones rotacionales.
  - Es falso que, Un cojinete de teflón cumple con el mismo desempeño (vida útil) que un rodamiento ultra-limpio.
  - Es falso que, Un cojinete de teflón tiene un nivel de limpieza clase 10.
  - Es falso que, Un cojinete de teflón compite con un rodamiento ultra-limpio.

Y por último

- Un cojinete de teflón a pesar de ser más barato que un cojinete ultra-limpio no cumple con el mismo nivel de limpieza lo que lo vuelve no apto para utilizarse dentro de un cuarto limpio

finalmente de las pruebas realizadas se puede concluir que un cojinete de teflón virgen no puede competir con un rodamiento ultra-limpio

# ANEXOS

# ANEXO A

Programa utilizado para realizar el análisis de la cinemática y dinámica de la extremidad del robot tipo Frog Leg.

## FrogLeg

### Ecuaciones Cinemáticas

#### Funciones

```
(*Matriz de Rotacion, Velocidad y Aceleracion*)
R[θ_] := {{Cos[θ], -Sin[θ]}, {Sin[θ], Cos[θ]}};
W[ω_] := {{0, -ω}, {ω, 0}};
A[ω_, α_] := {{-ω^2, -α}, {α, -ω^2}};
```

(\*Dibuja barra\*)

```
Barra[espesor_, rojo_, verde_, azul_, nombre_] :=
Graphics[{AbsoluteThickness[espesor],
RGBColor[rojo, verde, azul], nombre}];
```

(\*Graficas\*)

```
Grafical[nombre_] := ListPlot[
nombre,
GridLines → Automatic,
PlotJoined → True,
AspectRatio → 1 / 1.7,
Prolog → AbsoluteThickness[4],
DisplayFunction → Identity];
```

```
Grafica2[nombre_] := ListPlot[
nombre,
GridLines → Automatic,
PlotStyle → AbsoluteDashing[{10, 5}],
PlotJoined → True,
AspectRatio → 1 / 1.7,
Prolog → AbsoluteThickness[4],
DisplayFunction → Identity];
```

```
Grafica3[nombre_] := ListPlot[
nombre,
GridLines → Automatic,
PlotStyle → AbsoluteDashing[{8, 5, 1}],
PlotJoined → True,
AspectRatio → 1 / 1.7,
Prolog → AbsoluteThickness[4],
DisplayFunction → Identity];
```

```
GraficaColor[nombre_, Rojo_, Verde_, Azul_] :=
ListPlot[ nombre,
GridLines → Automatic,
PlotStyle → RGBColor[Rojo, Verde, Azul],
PlotJoined → True,
AspectRatio → 1 / 1.7,
Prolog → AbsoluteThickness[4],
DisplayFunction → Identity
]; cu
```

CU

### Datos de la Configuración Inicial

```
d1 = 16 / 100;
d2 = 16 / 100;
d4 = 16 / 100;
d5 = 16 / 100;
x3 = (14.35) / 1000;
y3 = 15 / 100; cu
```

### Ecuaciones Cinematicas

```
Off[General::"spell", General::"spell1"];
Clear[θ1, θ2, yp, ω1, ω2, vp, α1, α2, ap];
(*Posicion*)
```

```
r1 = {d1, 0};
r2 = {d2, 0};
r4 = {d4, 0};
r5 = {d5, 0};
R1 = R[θ1].r1;
R2 = R[θ2].r2;
R3 = {-x3, y3};
R4 = R[θ1].r4;
R5 = R[θ2].r5;
RT = {-xp, yp};
Rp1 = {-x3, 0};
Rp2 = {-x3, 0};
Rp3 = {x3, 0};
Rp4 = {x3, 0};
```

(\*Velocidad\*)

```
V1 = W[ω1].R1;
V2 = W[ω2].R2;
V3 = {0, 0};
VT = {0, vp};
```

(\*Aceleracion\*)

```
A1 = A[ω1, α1].R1;
A2 = A[ω2, α2].R2;
A5 = A[ω2, α2].R5;
A3 = {0, 0};
AT = {0, ap};
```

```
Pos = R1 + R2 + R3 - RT;
Vel = V1 + V2 + V3 - VT;
Acel = A1 + A2 + A3 - AT; cu
```

CU

```
Pos // N // MatrixForm
( 0. + 0.16 Cos[θ1] + 0.16 Cos[θ2]
0.15 - 1. yp + 0.16 Sin[θ1] + 0.16 Sin[θ2] )
```



## □ Solución de Posición

### ▪ Solución inicial

```

xp = (14.35) / 1000;
yp = 0;
sol = FindRoot[{
    Pos[[1]] == 0,
    Pos[[2]] == 0},
  {θ1, -30 * (Pi / 180)},
  {θ2, 200 * (Pi / 180)},
  MaxIterations → 15]
(θ1 /. sol) / Degree // N
(θ2 /. sol) / Degree // N
{θ1 → -0.487875 , θ2 → 3.62947 }
-27.9532
207.953

```

### ▪ Solución final

```

Off[General::"spell1"]
Clear[θ1, θ2, yp, SolPos]
θ1i = θ1 /. sol;
θ2i = θ2 /. sol;
xp = (14.35) / 1000;

For[i = 0, i ≤ 46, i += 1,
  yp = i / 100;

  SolPos[i] = FindRoot[{
    Pos[[1]] == 0,
    Pos[[2]] == 0},
  {θ1, θ1i},
  {θ2, θ2i},
  MaxIterations → 15];

  θ1i = θ1 /. SolPos[i];
  θ2i = θ2 /. SolPos[i];
]; cu

```

CU

## □ Solución de Velocidad

```

Off[General::"spell1"]
Clear[θ1, θ2, yp, ω1, ω2, vp, SolVel];
vp = 0.45;

For[i = 0, i ≤ 46, i += 1,
  yp = i / 100;

  SolVel[i] = Solve[{
    Vel[[1]] == 0,
    Vel[[2]] == 0} /.
  SolPos[i],
  {ω1, ω2}] // Flatten]; cu

```

CU

## □ Solución de Aceleración

```

Off[General::"spell1"]
Clear[θ1, θ2, yp, ω1,
  ω2, vp, α1, α2, ap, SolAcel];

ap = 0;
For[i = 0, i ≤ 46, i += 1,
  yp = i / 100;

  SolAcel[i] = Solve[{
    Acel[[1]] == 0,
    Acel[[2]] == 0} /.
  SolPos[i] /. SolVel[i],
  {α1, α2}] // Flatten]; cu

```

cu

## □ Graficación

```

tabla1 = Table[{i, (θ1 /. SolPos[i]) / Degree}, {i, 0, 45, 2}];
tabla2 = Table[{i, (θ2 /. SolPos[i]) / Degree}, {i, 0, 45, 2}];
fig1 = Grafical[tabla1];
fig2 = Grafical[tabla2];

Show[fig1,
  Frame → True,
  PlotRange → All,
  FrameLabel → {"yp(m)", "θ1(grad)"},
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];

Show[fig2,
  Frame → True,
  PlotRange → All,
  FrameLabel → {"yp(m)", "θ2(grad)"},
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];

vtabla1 = Table[{i, ω1 /. SolVel[i]}, {i, 0, 45, 2}];
vtabla2 = Table[{i, ω2 /. SolVel[i]}, {i, 0, 45, 2}];
vfig1 = Grafical[vtabla1];
vfig2 = Grafical[vtabla2];

Show[vfig1,
  Frame → True,
  PlotRange → All,
  FrameLabel → {"θ1(grad)", "ω2(grad)"},
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];

Show[vfig2,
  Frame → True,
  PlotRange → All,
  FrameLabel → {"θ1(grad)", "vx3(m)"},
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];

```

```

atabla1 = Table[{i,  $\alpha 1$  /. SolAcel[i]}, {i, 0, 40, 2}];
atabla2 = Table[{i,  $\alpha 2$  /. SolAcel[i]}, {i, 0, 40, 2}];
afig1 = Grafical[atabla1];
afig2 = Grafical[atabla2];

```

```

Show[afig1,
  Frame → True,
  PlotRange → All,
  FrameLabel → {"yp(m)", " $\alpha 2$ (rad/s2)"},
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];

```

```

Show[afig2,
  Frame → True,
  PlotRange → All,
  FrameLabel → {"yp(m)", " $\alpha 2$ (m)"},
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];

```

□ Simulación

```

Clear[ $\theta 1$ ,  $\theta 2$ , yp];

For[i = 0, i ≤ 46, i += 1,
  yp = i / 100;

  linea1 = Line[{{0, 0}, R1}] /. SolPos[i];
  linea2 = Line[{R1, R1 + R2}] /. SolPos[i];
  linea4 =
  Line[{2 * Rp1 + R2, 2 * Rp1 + R2 + R1}] /. SolPos[i];
  linea5 = Line[{2 * Rp1, 2 * Rp1 + R2}] /. SolPos[i];
  linea6 = Line[{{-0.25, 0.45}, {0.25, 0.45}}];
  p1 = R1 + R2 + {3, -3} / 100;
  p2 = R1 + R2 + {-6, 17} / 100;
  rectangulo = Rectangle[p1, p2] /. SolPos[i];
  punto = Point[R1 + R2 + R3] /. SolPos[i];

  barra1 = Barra[24, 1, 0, 0, linea1];
  barra2 = Barra[24, 0, 0, 0.7, linea2];
  barra3 = Graphics[{Hue[0.1], rectangulo}];
  barra4 = Barra[24, 1, 0, 0, linea4];
  barra5 = Barra[24, 0, 0, 0.7, linea5];
  barra6 = Barra[6, 0, 0, 0, linea6];
  puntoP = Graphics[{PointSize[0.03], punto}];
  (*titulo=FontForm["Mec. manivela-corredera",
  {"Courier", 24}];*)

Show[barra3, barra1, barra2,
  barra4, barra5, puntoP, barra6,

  AspectRatio → Automatic,
  Axes → True,
  Frame → True,
  FrameLabel → {titulo, ""},
  AxesLabel → {"x", "y"},
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  FrameTicks → Automatic,
  PlotRange → {{-0.25, 0.20}, {-0.20, 0.5}}
  ](*cierra Show*)
](*cierra For*)

```

Ecuaciones Dinámicas

□ Funciones

```

Cruz[R_, F_] := R[[1]] * F[[2]] - R[[2]] * F[[1]];

```

□ Ecuaciones Dinámicas

```

cu
g = {g1, g2, g3, g4, g5} // Flatten;
Mddq = {M1ddq1, M2ddq2,
  M3ddq3, M4ddq4, M5ddq5} // Flatten;

```

□ Solución algebraica

```

Clear[ $\theta 1$ ,  $\theta 2$ , yp,  $\omega 1$ ,  $\omega 2$ , vp,  $\alpha 1$ ,  $\alpha 2$ ];
Clear[Fe1x, Fe2x, F01x, F01y, F12x, F12y,
  F23x, F23y, F43x, F43y,
  F54x, F54y, F05x, F05y, T01];
ap = 0;
SolAlgebraica = Solve[
  Mddq == g,
  {Fe1x, Fe2x, F01x, F01y, F12x, F12y,
  F23x, F23y, F43x, F43y, F54x, F54y,
  F05x, F05y, T01}] // Flatten // Chop;

SolAlgebraica /. SolPos[0] /. SolVel[0] /.
  SolAcel[0] // MatrixForm

```

```

{
  T01 → -0.00478076
  F01x → -0.0909144
  F01y → 0.0523349
  F05x → 0.0676894
  F05y → 0.0374728
  F12x → -0.0455304
  F12y → 0.00743103
  F54x → 0.0455304
  F54y → -0.00743103
  Fe1x → 0.0463812
  Fe2x → 0.021458
  F23x → -0.00241896
  F43x → 0.00241896
  F23y → -0.0133435
  F43y → 0.0133435
}

```

## □ Solución de la Dinámica

```
Clear[θ1, θ2, yp, ω1, ω2, vp, α1, α2, ap];
Clear[Felx, Fe2x, F01x, F01y, F12x, F12y,
  F23x, F23y, F43x, F43y, F54x, F54y, F05x, F05y, T01];
```

```
(*Suma de fuerzas*)
```

```
m1 = 190.86 / 1000; (*kg*)
m2 = 168.61 / 1000;
m3 = 60.71 / 1000;
m4 = 168.61 / 1000;
m5 = 189.88 / 1000;
```

```
fe1 = {Felx, 0};
fe2 = {Fe2x, 0};
Fe1 = R[(90 + 14.5) * Degree].fe1;
Fe2 = R[(90 + 14.5) * Degree].fe2;
F01 = {F01x, F01y};
F12 = {F12x, F12y};
F23 = {F23x, F23y};
F43 = {F43x, F43y};
F54 = {F54x, F54y};
F05 = {F05x, F05y};
F1 = F01 - Fe1 - F12;
F2 = F12 - F23 - Fe2;
F3 = F23 + F43;
F4 = F54 - F43 + Fe2;
F5 = F05 - Fe1 - F54;
```

```
(*Suma de momentos*)
```

```
xG1 = 61.67 / 1000; yG1 = 0 / 1000;
xG2 = 81.99 / 1000; yG2 = 0 / 1000;
xG3 = -14.35 / 1000; yG3 = 52.76 / 1000;
xG4 = 81.99 / 1000; yG4 = 0 / 1000;
xG5 = 61.99 / 1000; yG5 = 0 / 1000;
rG1 = {xG1, yG1};
rG2 = {xG2, yG2};
rG4 = {xG4, yG4};
rG5 = {xG5, yG5};
RG3 = {xG3, yG3};
R43 = {-xG3, -yG3};

RG1 = R[θ1].rG1;
RG2 = R[θ2].rG2;
RG4 = R[θ1].rG4;
RG5 = R[θ2].rG5;
R01 = -RG1;
Re1 = -RG1 + Rp1;
R21 = -RG1 + R1;
R12 = -RG2;
R32 = -RG2 + R3;
Re2 = R32 + Rp2;
R23 = -RG3;
R43 = -RG2 + R3;
R54 = -RG4;
R34 = -RG4 + R4;
Re4 = R34 + Rp3;
R05 = -RG5;
Re5 = R05 + Rp4;
R45 = -RG5 + R5;
```

```
n1 = Cruz[R01, F01] + Cruz[Re1, -Fe1] + Cruz[R21, -F12] + T01;
n2 = Cruz[R12, F12] + Cruz[R32, -F23] + Cruz[Re2, -Fe2];
n3 = Cruz[R23, F23] + Cruz[R43, F43];
n4 = Cruz[R54, F54] + Cruz[R34, -F43] + Cruz[Re4, Fe2];
n5 = Cruz[R05, F05] + Cruz[Re5, Fe1] + Cruz[R45, -F54];
```

```
(*Vectores de fuerza*)
```

```
g1 = {F1, n1};
g2 = {F2, n2};
g3 = {F3, n3};
g4 = {F4, n4};
g5 = {F5, n5};
```

```
(*Inercias*)
```

```
IG1 = 591566.55 * (1 / 1000) ^ 2 * (1 / 1000);
IG2 = 510377.82 * (1 / 1000) ^ 2 * (1 / 1000);
IG3 = 188056.45 * (1 / 1000) ^ 2 * (1 / 1000);
IG4 = 510377.82 * (1 / 1000) ^ 2 * (1 / 1000);
IG5 = 587810.23 * (1 / 1000) ^ 2 * (1 / 1000);
```

```
(*ecuaciones cuerpo 1*)
```

```
AG1 = A[ω1, α1].RG1;
M1 = IdentityMatrix[3] {m1, m1, IG1};
ddq1 = {AG1[[1], AG1[[2]], α1};
M1ddq1 = M1.ddq1;
```

```
(*ecuaciones cuerpo 2*)
```

```
AG2 = A1 + A[ω2, α2].RG2;
M2 = IdentityMatrix[3] {m2, m2, IG2};
ddq2 = {AG2[[1], AG2[[2]], α2};
M2ddq2 = M2.ddq2;
```

```
(*ecuaciones cuerpo 3*)
```

```
AG3 = AT;
M3 = IdentityMatrix[3] {m3, m3, IG3};
ddq3 = {AG3[[1], AG3[[2]], 0};
M3ddq3 = M3.ddq3;
```

```
(*ecuaciones cuerpo 4*)
```

```
AG4 = A5 + A[ω1, α1].RG4;
M4 = IdentityMatrix[3] {m4, m4, IG4};
ddq4 = {AG4[[1], AG4[[2]], α1};
M4ddq4 = M4.ddq4;
```

```
(*ecuaciones cuerpo 5*)
```

```
AG5 = A[ω2, α2].RG5;
M5 = IdentityMatrix[3] {m5, m5, IG5};
ddq5 = {AG5[[1], AG5[[2]], α2};
M5ddq5 = M5.ddq5; cu
```

```
Clear[θ1, θ2, yp, ω1, ω2, vp, α1, α2];
Clear[Felx, Fe2x, F01x, F01y, F12x, F12y,
  F23x, F23y, F43x, F43y,
  F54x, F54y, F05x, F05y, T01];
ap = 0;
For[i = 0, i ≤ 46, i += 1,
  yp = i / 100;
```

```
SolDinamica[i] = Solve[
  Mddq == g /. SolPos[i] /. SolVel[i] /.
  SolAcel[i],
  {Felx, Fe2x, F01x, F01y, F12x, F12y,
  F23x, F23y, F43x, F43y, F54x,
  F54y, F05x, F05y, T01}] // Flatten;
```

cu

## □ Torque

### cu

```
torque = Table[
  {i, T01 /. SolDinamica[i]}, {i, 0, 46, 1}]
fig1 = GraficaColor[torque, 0, 0, 1];

Show[fig1,
  Frame → True,
  FrameLabel → {"yp(m)", "T01 (N.m)"},
  (*PlotRange→All,*),
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];
```

## □ Reacción F01

```
MagF01 =
  Table[{i, (Sqrt[F01.F01]) /. SolDinamica[i]},
  {i, 0, 46, 1}]
fig2 = GraficaColor[MagF01, 1, 0, 0];
```

```
Show[fig2,

  (*Graphics[
  Text["F01x Rojo __",{25,1.35}]],
  Graphics[Text["F01y Verde --",
  {25,1.2}]]],*)
  Frame → True,
  FrameLabel →
  {"θ1(Grados)", "|F41| (N)"},
  (*PlotRange→All,*),
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];
```

## □ Reacción F12

```
MagF12 =
  Table[{i, (Sqrt[F12.F12]) /. SolDinamica[i]},
  {i, 0, 46, 1}]
fig3 = GraficaColor[MagF12, 1, 0, 0];
```

```
Show[fig3,

  (*Graphics[
  Text["F01x Rojo __",{25,1.35}]],
  Graphics[Text["F01y Verde --",
  {25,1.2}]]],*)
  Frame → True,
  FrameLabel →
  {"θ1(Grados)", "|F12| (N)"},
  (*PlotRange→All,*),
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];
```

## □ Reacción F23

```
MagF23 =
  Table[{i, (Sqrt[F23.F23]) /. SolDinamica[i]},
  {i, 0, 46, 1}]
fig4 = GraficaColor[MagF23, 1, 0, 0];
```

```
Show[fig4,

  (*Graphics[
  Text["F01x Rojo __",{25,1.35}]],
  Graphics[Text["F01y Verde --",
  {25,1.2}]]],*)
  Frame → True,
  FrameLabel →
  {"θ1(Grados)", "|F41| (N)"},
  (*PlotRange→All,*),
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];
```

## □ Reacción F43

```
MagF43 =
  Table[{i, (Sqrt[F43.F43]) /. SolDinamica[i]},
  {i, 0, 46, 1}]
fig5 = GraficaColor[MagF43, 1, 0, 0];
```

```
Show[fig5,

  (*Graphics[
  Text["F01x Rojo __",{25,1.35}]],
  Graphics[Text["F01y Verde --",
  {25,1.2}]]],*)
  Frame → True,
  FrameLabel →
  {"θ1(Grados)", "|F41| (N)"},
  (*PlotRange→All,*),
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];
```

## □ Reacción F54

```
MagF54 =
  Table[{i, (Sqrt[F54.F54]) /. SolDinamica[i]},
  {i, 0, 46, 1}]
fig6 = GraficaColor[MagF54, 1, 0, 0];
```

```
Show[fig6,

  (*Graphics[
  Text["F01x Rojo __",{25,1.35}]],
  Graphics[Text["F01y Verde --",
  {25,1.2}]]],*)
  Frame → True,
  FrameLabel →
  {"θ1(Grados)", "|F41| (N)"},
  (*PlotRange→All,*),
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];
```

## □ Reacción F05

```
MagF05 =
  Table[{i, (Sqrt[F05.F05]) /. SolDinamica[i]},
  {i, 0, 46, 1}]
fig7 = GraficaColor[MagF05, 1, 0, 0];
```

```
Show[fig7,

  (*Graphics[
  Text["F01x Rojo __",{25,1.35}]],
  Graphics[Text["F01y Verde --",
  {25,1.2}]]],*)
  Frame → True,
  FrameLabel →
  {"θ1(Grados)", "|F41| (N)"},
  (*PlotRange→All,*),
  DefaultFont → {"Courier", 24},
  DisplayFunction → $DisplayFunction];
```



## ANEXO B

## TABLA B.1.

Tolerancias de  
medida

ZONAS DE TOLERANCIA RECOMENDADAS AGUJERO ÚNICO

## DESVIACIONES DEL AGUJERO EN MICRAS

Tolerancia		Diámetros nominales en mm									
Serie	Consignación	De 1 a 3	Más de 3 a 6	Más de 6 a 10	Más de 10 a 18	Más de 18 a 30	Más de 30 a 50	Más de 50 a 80	Más de 80 a 120	Más de 120 a 180	Más de 180 a 250
IT - 8	d 8	- 20 - 34	- 30 - 48	- 40 - 62	- 50 - 77	- 65 - 98	- 80 - 119	- 100 - 146	- 120 - 174	- 145 - 208	- 170 - 242
	e 8	- 14 - 28	- 20 - 38	- 25 - 47	- 32 - 59	- 40 - 73	- 50 - 89	- 60 - 106	- 72 - 126	- 85 - 148	- 100 - 172
	f 8	- 7 - 21	- 10 - 28	- 13 - 35	- 16 - 43	- 20 - 53	- 25 - 54	- 30 - 76	- 36 - 90	- 43 - 106	- 50 - 122
	h 8	0 - 14	0 - 18	0 - 22	0 - 27	0 - 33	0 - 39	0 - 48	0 - 54	0 - 63	0 - 72
	j 8	+ 7 - 7	+ 9 - 9	+ 11 - 11	+ 14 - 13	+ 17 - 16	+ 20 - 19	+ 23 - 23	+ 27 - 27	+ 32 - 31	+ 36 - 36
	k 8	+ 14 0	+ 18 0	+ 22 0	+ 27 0	+ 33 0	+ 39 0	+ 46 0	+ 54 0	+ 63 0	+ 72 0
	d 9	- 20 - 45	- 30 - 60	- 40 - 75	- 50 - 93	- 65 - 117	- 80 - 142	- 100 - 174	- 120 - 207	- 145 - 243	- 170 - 285
IT - 9	e 9	- 14 - 39	- 20 - 50	- 25 - 61	- 32 - 75	- 40 - 92	- 50 - 112	- 60 - 134	- 72 - 159	- 85 - 185	- 100 - 215
	h 9	0 - 25	0 - 30	0 - 36	0 - 43	0 - 52	0 - 62	0 - 74	0 - 87	0 - 100	0 - 115
	j 9	+ 13 - 12	+ 15 - 15	+ 18 - 18	+ 22 - 21	+ 26 - 26	+ 31 - 31	+ 37 - 37	+ 44 - 43	+ 50 - 50	+ 58 - 57
	k 9	+ 25 0	+ 30 0	+ 36 0	+ 43 0	+ 52 0	+ 62 0	+ 74 0	+ 87 0	+ 100 0	+ 115 0
IT - 10	d 10	- 20 - 60	- 30 - 78	- 40 - 98	- 50 - 120	- 65 - 149	- 80 - 180	- 100 - 220	- 120 - 260	- 145 - 305	- 170 - 355
	h 10	0 - 40	0 - 48	0 - 58	0 - 70	0 - 84	0 - 100	0 - 120	0 - 140	0 - 160	0 - 185
	j 10	+ 20 - 20	+ 24 - 24	+ 29 - 29	+ 35 - 35	+ 42 - 42	+ 50 - 50	+ 60 - 60	+ 70 - 70	+ 80 - 80	+ 93 - 92
	k 10	+ 40 0	+ 48 0	+ 58 0	+ 70 0	+ 84 0	+ 100 0	+ 120 0	+ 140 0	+ 160 0	+ 185 0
IT - 11	d 11	- 20 - 80	- 30 - 105	- 40 - 130	- 50 - 160	- 65 - 185	- 80 - 240	- 100 - 290	- 120 - 340	- 145 - 395	- 170 - 460
	h 11	0 - 60	0 - 75	0 - 90	0 - 110	0 - 130	0 - 160	0 - 190	0 - 220	0 - 250	0 - 290
	j 11	+ 30 - 30	+ 38 - 37	+ 45 - 45	+ 55 - 55	+ 65 - 65	+ 80 - 80	+ 95 - 95	+ 110 - 110	+ 125 - 125	+ 145 - 145
	k 11	+ 60 0	+ 75 0	+ 90 0	+ 110 0	+ 130 0	+ 160 0	+ 190 0	+ 220 0	+ 250 0	+ 290 0

TABLA B.2.

Tolerancias de  
medida

## ZONAS DE TOLERANCIA RECOMENDADAS AGUJERO UNICO

## DESVIACIONES DEL AGUJERO EN MICRAS

Tolerancia		Diámetros nominales en mm									
Serie	Consignación	De 1 a 3	Más de 3 a 6	Más de 6 a 10	Más de 10 a 18	Más de 18 a 30	Más de 30 a 50	Más de 50 a 80	Más de 80 a 120	Más de 120 a 180	Más de 180 a 250
IT - 8	D 8	+ 20 + 34	+ 30 + 48	+ 40 + 62	+ 50 + 77	+ 65 + 98	+ 80 + 119	+ 100 + 146	+ 120 + 174	+ 145 + 208	+ 170 + 242
	E 8	+ 14 + 28	+ 20 + 38	+ 25 + 47	+ 32 + 59	+ 40 + 73	+ 50 + 89	+ 60 + 106	+ 72 + 126	+ 85 + 148	+ 100 + 172
	F 8	+ 7 + 21	+ 10 + 28	+ 13 + 35	+ 16 + 43	+ 20 + 53	+ 25 + 64	+ 30 + 76	+ 36 + 90	+ 43 + 106	+ 50 + 122
	H 8	0 + 14	0 + 18	0 + 22	0 + 27	0 + 33	0 + 39	0 + 46	0 + 54	0 + 63	0 + 72
	J 8	- 7 + 7	- 9 + 9	- 10 + 12	- 12 + 15	- 13 + 20	- 15 + 24	- 18 + 28	- 20 + 34	- 22 + 41	- 25 + 47
	K 8			- 16 + 6	- 19 + 8	- 23 + 10	- 27 + 12	- 32 + 14	- 38 + 16	- 43 + 20	- 50 + 22
	M 8			- 21 + 1	- 25 + 2	- 29 + 4	- 34 + 5	- 41 + 5	- 48 + 6	- 55 + 8	- 63 + 9
	N 8	- 15 - 1	- 20 - 2	- 25 - 3	- 30 - 3	- 36 - 3	- 42 - 3	- 50 - 4	- 58 - 4	- 67 - 4	- 77 - 5
	D 9	+ 20 + 45	+ 30 + 60	+ 40 + 76	+ 50 + 93	+ 65 + 117	+ 80 + 142	+ 100 + 174	+ 120 + 207	+ 145 + 245	+ 170 + 285
	E 9	+ 14 + 39	+ 20 + 50	+ 25 + 61	+ 32 + 75	+ 40 + 92	+ 50 + 112	+ 60 + 134	+ 72 + 159	+ 85 + 185	+ 100 + 215
IT - 9	H 9	0 + 25	0 + 30	0 + 36	0 + 43	0 + 52	0 + 62	0 + 74	0 + 87	0 + 100	0 + 115
	J 9	- 13 + 12	- 15 + 15	- 18 + 18	- 21 + 22	- 26 + 26	- 31 + 31	- 37 + 37	- 44 + 43	- 50 + 50	- 58 + 57
	D 10	+ 20 + 60	+ 30 + 78	+ 40 + 98	+ 50 + 120	+ 65 + 149	+ 80 + 180	+ 100 + 220	+ 120 + 260	+ 145 + 305	+ 170 + 355
IT - 10	H 10	0 + 40	0 + 48	0 + 58	0 + 70	0 + 84	0 + 100	0 + 120	0 + 140	0 + 160	0 + 185
	J 10	- 20 + 20	- 24 + 24	- 29 + 29	- 35 + 35	- 42 + 42	- 50 + 50	- 60 + 60	- 70 + 70	- 80 + 80	- 93 + 92
IT - 11	D 11	+ 20 + 80	+ 30 + 100	+ 40 + 130	+ 50 + 160	+ 65 + 195	+ 80 + 240	+ 100 + 290	+ 120 + 340	+ 145 + 395	+ 170 + 460
	H 11	0 + 60	0 + 75	0 + 90	0 + 110	0 + 130	0 + 160	0 + 190	0 + 220	0 + 250	0 + 290
	J 11	- 30 + 30	- 38 + 37	- 45 + 45	- 55 + 55	- 65 + 65	- 80 + 80	- 95 + 95	- 110 + 110	- 125 + 125	- 145 + 145

[www-8]

# BIBLIOGRAFÍA



## BIBLIOGRAFÍA

### Artículos

- [Murphy, 2005]     ;Desarrollemos la microelectrónica en México!  
Roberto S. Murphy  
INAOE, Tonantzintla, Puebla, México, rmurphy@ieee.org  
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- [Drof, 1982]       Dorf, R., “Clean Room Application”, Encyclopedia of Robotics,  
pp. 177-182, 1982.
- [Papanek, 87]      Papanek, T.: Design and Test of a Robot Class 10 Clean Rooms, Adept Technology,  
San Jose Cal., pp 101 – 103.
- [Goldstein, 92]    Goldstein, K. Fernand, W.: An Evaluation of Proposed Federal Standard 209 E  
(Airborne Particulate Cleanliness Classes in Clean Rooms and Clean Zones), Digital  
Equipment Corporation, Vol. 35, No 4 Jul 1992, pp 72.
- [González, 2001]  González L., Evaluación del Nivel de Emisión de Partículas en Rodamientos  
Mecánicos. Congreso SOMIM 2001

### Tesis

- [Trenado, 1999]    Trenado, J.: Lic. Tesis.: **Diseño y Fabricación de un Robot para Transportar  
Discos de Silicio.** Instituto Politécnico Nacional. ESIME U. C. Septiembre 1999

### Libros

- [Warren, J]        Warren, J. Jon, M.: **Fundamentos de Dibujo en Ingeniería.**  
Prentice Hall Hispanoamérica S. A. 11ra. Ed. 1993 México
- [Spotts, M]        Spotts, M.: **Elementos de Máquinas.**  
Prentice Hall Hispanoamérica S. A 7ma. Ed. 1999 México
- [Bianco, 1982]    Bianco, E.: **Manual Práctico de Trabajos de Taller.**  
Compañía Editorial Continental S. A. De C. V., 5ta. Ed. Abril 1982
- [Cross, 1999]     Cross, N.: **Métodos de Diseño.**  
Limusa-Noriega, 1ra. Ed. México, 1999.
- [Beer, 2004]      Beer, F. Johnston, R.: **Mecánica Vectorial para Ingenieros. Dinámica**  
McGraw Hill, 7ma Ed. México, Agosto 2004

**Internet**

- |            |   |            |
|------------|---|------------|
| [www-1]    | <a href="http://www.uv.es/~jagUILar/curioso/teflon.html">www.uv.es/~ jagUILar/curioso/teflon.html</a>   | 2004-05-26 |
| [www-2]    | <a href="http://icarito.latercera.cl/enc_virtual/e_tecologica/materiales/teflon.htm">http://icarito.latercera.cl/enc_virtual/e_tecologica/materiales/teflon.htm</a>         | 2004-05-26 |
| [www-3]    | <a href="http://www.n-e-t.com/rodimex/recub.html">http://www.n-e-t.com/rodimex/recub.html</a>   | 2004-05-26 |
| [www-4]    | <a href="http://perso.wanadoo.es/chyryes/glosario/teflon.htm">http://perso.wanadoo.es/chyryes/glosario/teflon.htm</a>   | 2004-05-26 |
| [www-5]    | <a href="http://www.polimerosindustriales.cl/teflon.htm">http://www.polimerosindustriales.cl/teflon.htm</a>   | 2005-02-22 |
| [www-6]    | <a href="http://www.grupolbo.com/Caracteristicas_Teflon.htm">http://www.grupolbo.com/Caracteristicas_Teflon.htm</a>   | 2005-02-22 |
| [www-7]    | <a href="http://www.camatbar.com.ar/modules.php?name=Forums&amp;file=viewtopic&amp;t=55">http://www.camatbar.com.ar/modules.php?name=Forums&amp;file=viewtopic&amp;t=55</a> | 2005-05-12 |
| [www-8]    | <a href="http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/ajustes/tabla818.html">http://www2.ing.puc.cl/~ icm2312/apuntes/ajustes/tabla818.html</a>                                  | 2005-07-01 |
| [FEM-CTUN] | <a href="http://www1.ceit.es/assignaturas/elemaqui/cap1.pdf">www1.ceit.es/assignaturas/elemaqui/cap1.pdf</a>  | 2005`06-08 |