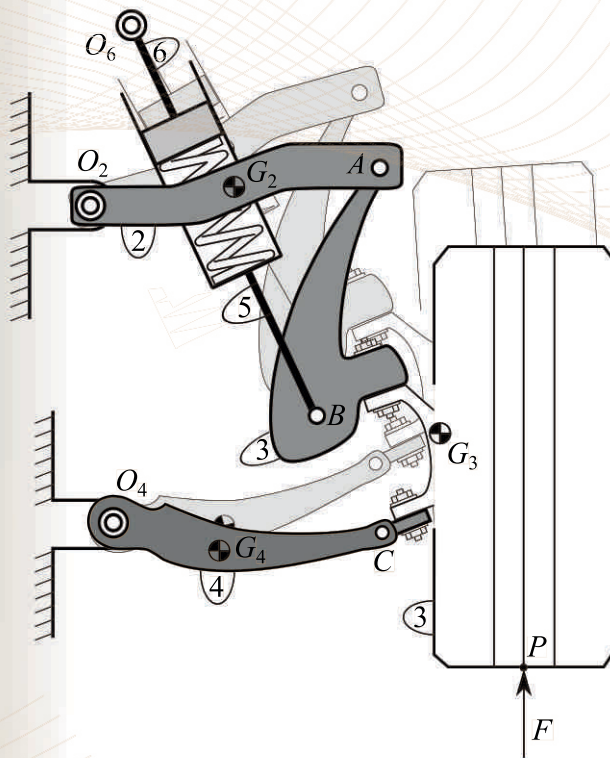


3ª edición

Jaime Domínguez Abascal
(coordinador)

TEORÍA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS



Editorial Universidad de Sevilla

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Listado de autores:

Jaime Domínguez Abascal (coordinador), Manuel Acosta Muñoz, Rosario Chamorro Moreno, Víctor Chaves Repiso, Enrique del Pozo Polidoro, José Luis Escalona Franco, Daniel García Vallejo, Carmen Madrigal Sánchez, Francisco Javier Martínez Reina, Carlos Navarro Pintado, Joaquín Ojeda Granja, Esther Reina Romo, Jesús Vázquez Valeo

Los autores del libro son o han sido profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Universidad de Sevilla. Pertenecen al grupo de investigación TEP-111, "Ingeniería Mecánica", perteneciente a los Grupos de Investigación de la Junta de Andalucía. El grupo tiene actualmente alrededor de 40 miembros (ver la base de datos SISIUS) que orientan sus esfuerzos de investigación a la fractura y la fatiga, a la biomecánica, la dinámica de sistemas multicuerpo rígidos y flexibles, las vibraciones mecánicas, al diseño óptimo, la calibración de equipos de fabricación y a la simulación de procesos de conformado plástico.

TEORÍA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS

Jaime Domínguez Abascal
(coordinador)

TEORÍA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS

3ª edición



SEVILLA 2020

Serie: Ingeniería

Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
de la Universidad de Sevilla

Número: 11

COMITÉ EDITORIAL:

José Beltrán Fortes
(Director de la Editorial Universidad de Sevilla)

Araceli López Serena
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez

Rafael Fernández Chacón

María Gracia García Martín

Ana Ilundáin Larrañeta

María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado

Manuel Padilla Cruz

Marta Palenque Sánchez

María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda

José-Leonardo Ruiz Sánchez

Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

1ª Edición: 2016

2ª Edición: 2018

3ª Edición: 2020

Motivo de cubierta: “Dibujo esquemático de una suspensión de automóvil”

© EDITORIAL UNIVERSIDAD DE SEVILLA 2020

Porvenir, 27 - 41013 Sevilla

Tlfs.: 954 487 447; 954 487 452; Fax: 954 487 443

Correo electrónico: eus4@us.es

Web: <<http://www.editorial.us.es>>

© JAIME DOMÍNGUEZ ABASCAL
(COORDINADOR) 2020

© Por los textos, los autores 2020

Impreso en papel ecológico

Impreso en España-Printed in Spain

ISBNe: 978-84-472-2998-7

DOI: <http://dx.doi.org/10.12795/9788447229987>

Diseño de cubierta: Santi García | santi@elmaquetador.es

Maquetación: F. Javier Payán Somet

Impresión: Tórculo Comunicación Gráfica, S. A.

Prólogo

La Teoría de Máquinas y Mecanismos se ocupa del estudio de las máquinas, los elementos que las forman y su funcionamiento. En general, estudia la estructura de los mecanismos que la componen, la coordinación de sus movimientos, la cinemática y dinámica de los mismos y los procesos para sintetizar mecanismos que realicen las funciones deseadas. Este ámbito del análisis de las máquinas y los mecanismos que las componen es fundamental para el diseño y dimensionado de las mismas, que deberá hacerse conjuntamente con el análisis resistente de sus componentes, para lo que será necesario conocer previamente las fuerzas, y movimientos involucrados.

El presente libro es el resultado de más de 20 años impartiendo las materias asociadas a la asignatura Teoría de Máquinas en varias titulaciones de ingeniería en la Universidad de Sevilla y surge de la colaboración de los profesores que de una u otra forma participan en la docencia de las mismas. A él se ha llegado a partir de las notas y apuntes de clase empleados por los autores durante esos años, transformándolos y ampliándolos tanto en el contenido como con ejemplos resueltos, ilustrativos de las materias tratadas y con otros problemas propuestos, para que los alumnos puedan comprobar la asimilación de las diferentes materias tratadas. El libro surge con dos objetivos. Por un lado, se pretende dotar a los alumnos de un manual que puedan seguir durante el desarrollo del curso y en el que puedan no solo encontrar las explicaciones y ejemplos tratados durante el desarrollo del curso, sino también encontrar información adicional con la que puedan ampliar los conocimientos si fuera de su interés. Por otro lado, servir de guía al profesorado para establecer un programa que, con pequeñas variaciones según el caso, se imparta en las distintas titulaciones de ingeniería en las que se cursa esta asignatura.

En la obra se ha intentado mantener un equilibrio entre diferentes aspectos. Por un lado, se ha hecho más extenso de lo que se puede impartir en una asignatura de 6 créditos, con el objetivo de que el alumno pueda extender sus conocimientos si lo desea, pero al mismo tiempo se ha limitado la extensión intentando no incluir más de lo que se considera de interés para un alumno en los primeros cursos del grado. Por otro lado, se ha intentado mantener un equilibrio entre los métodos tradicionales de análisis y los métodos modernos, analíticos o numéricos, de forma que el alumno pueda comprender mejor los movimientos y la dinámica del comportamiento de los mecanismos y máquinas, al mismo tiempo que

aprende los fundamentos de las técnicas actuales para el análisis del comportamiento de los sistemas mecánicos.

El libro se ha dividido en tres partes. En la primera se tratan los principales aspectos de la cinemática y dinámica de máquinas; en la segunda se introduce la síntesis de mecanismos, incluyendo también las levas como elementos que permiten coordinar los movimientos de diferentes componentes de un mecanismo; finalmente, la tercera hace una muy breve introducción a los elementos de máquinas, dedicando especial atención a los sistemas de transmisión. Comienza el libro con una introducción a las máquinas en el capítulo 1, en la que se hace una muy breve introducción a la historia de las máquinas, que permite al lector tomar conciencia de algunos problemas planteados durante la evolución de las máquinas y de la importancia de las mismas en el desarrollo del ser humano y en la mejora de la calidad de vida de la sociedad. En el capítulo 2 se introducen los conceptos básicos de la Teoría de Máquinas y Mecanismos y los principales aspectos que los caracterizan. El capítulo 3 está dedicado a la cinemática de mecanismos y máquinas, mientras el siguiente trata la dinámica de los mismos. El capítulo 5 se dedica a la síntesis de mecanismos, introduciendo la síntesis estructural y dedicando más atención a la síntesis dimensional. El capítulo 6 está dedicado a la síntesis de mecanismos de leva, sirviendo este tema como conexión entre la parte dedicada a síntesis y la que se ocupa de algunos elementos de máquinas. La parte dedicada a los elementos de máquinas se ocupa principalmente de los elementos de transmisión, comenzando por las transmisiones por engranajes en el capítulo 7. El siguiente capítulo trata las transmisiones por correas y, por último, el capítulo 9 se dedica a los tornillos como elementos de transmisión de movimientos. Al final del libro, el lector puede encontrar las soluciones a todos los problemas propuestos en cada capítulo.

Para terminar, quiero agradecer a todos los autores el esfuerzo realizado para poder generar este manual que esperamos sea de utilidad para los alumnos. Especialmente quiero agradecer a Daniel García Vallejo la preparación del documento en L^AT_EX y el trabajo realizado en el seguimiento de la edición del mismo.

*Jaime Domínguez
Sevilla, 2016*

Índice

<i>Prólogo</i>	I
<i>Índice</i>	III
<i>Notación</i>	IX
1. Introducción a las máquinas Enrique del Pozo Polidoro	1
1.1. Preliminares	1
1.2. Prehistoria y Antigüedad Clásica	2
1.3. Edad Media y Renacimiento	5
1.4. La época de los grandes avances científicos	7
1.5. Relojes y autómatas	8
1.6. La Teoría de la Mecánica	9
1.7. Desde la Revolución Industrial hasta nuestros días	12
1.8. Imagen y sonido	18
1.9. Presente y futuro del Diseño Mecánico	19
2. Conceptos básicos de la teoría de máquinas y mecanismos Víctor Chaves Repiso, Jesús Vázquez Valeo	23
2.1. Introducción	23
2.1.1. Definición de máquina y mecanismo	24
2.1.2. Mecanismos elementales	26
2.2. Definiciones y clasificaciones	31
2.2.1. Eslabón o barra	31
2.2.2. Par cinemático	33
2.3. Esquematización y normalización	36
2.4. Grados de libertad. Ecuación de Grübler	38
2.4.1. Consideraciones sobre la ecuación de Grübler	47
2.5. Equivalencia cinemática	54
2.6. Inversiones de un mecanismo	58
2.7. Ángulo de transmisión	60

Problemas Propuestos	63
3. Cinemática de Máquinas	69
Manuel Acosta Muñoz, Víctor Chaves Repiso	
3.1. Introducción	69
3.2. Método de las velocidades y aceleraciones relativas	71
3.2.1. Bases del método: cinemática del movimiento relativo	71
Movimiento de un triedro. Fórmulas de Poisson	71
Movimiento relativo. Definiciones	72
Movimiento relativo. Velocidades lineales	73
Movimiento relativo. Velocidades angulares	74
Movimiento relativo. Aceleraciones	74
3.2.2. Aplicación a mecanismos planos	76
Aplicación a dos puntos del mismo eslabón	76
Aplicación a puntos de eslabones conectados por diversos pares cinemáticos	77
Caso de pares de rotación	77
Caso de pares prismáticos	81
Caso de pares de rodadura sin deslizamiento	84
Caso de pares de rodadura con deslizamiento	91
Linealidad del problema de velocidades	95
3.3. Análisis de posición, velocidades y aceleraciones mediante las ecuaciones de lazo	96
3.4. Análisis de velocidades mediante los centros instantáneos de rotación	100
3.4.1. Introducción	100
3.4.2. Definiciones	101
3.4.3. Centros instantáneos de rotación en diversos pares cinemáticos	101
3.4.4. Análisis de velocidades usando centros instantáneos de rotación	104
Problemas Propuestos	109
4. Dinámica de Máquinas	117
Daniel García Vallejo	
4.1. Introducción	117
4.2. Tipos de acciones	118
4.2.1. Fuerzas externas	118
4.2.2. Fuerzas internas o de reacción	121
4.3. Métodos para el análisis dinámico	126
4.3.1. Método vectorial: principio de D'Alembert	126
4.3.2. Método analítico: principio de las potencias virtuales	130
4.4. Análisis dinámico inverso de mecanismos	137
4.4.1. Caso particular de restricciones redundantes	150
4.5. Análisis dinámico directo de mecanismos	154
4.5.1. Análisis directo en una configuración determinada	158
4.5.2. Caso particular de restricciones redundantes	165

4.5.3.	Análisis directo a lo largo del tiempo	168
	Aplicación del teorema de la energía	173
	Rendimiento en mecanismos	178
4.6.	Inclusión del rozamiento en el análisis dinámico	179
4.6.1.	El PPV en mecanismos con rozamiento	181
4.7.	Cálculo de volantes de inercia	188
4.7.1.	Irregularidad de la velocidad	192
4.7.2.	Método aproximado para el cálculo del volante	193
4.8.	Equilibrado de rotores	198
4.8.1.	Equilibrado estático de un rotor	201
4.8.2.	Equilibrado dinámico de un rotor	203
4.8.3.	Equilibrado con contrapesos	204
	Equilibrado con contrapesos en dos planos	205
Problemas Propuestos		209
5. Síntesis de mecanismos		219
Esther Reina Romo, Francisco Javier Martínez Reina, Joaquín Ojeda Granja		
5.1.	Introducción a la síntesis	219
5.1.1.	Introducción a la síntesis de mecanismos	219
5.1.2.	Síntesis estructural	221
	Síntesis de tipo	221
	Síntesis de número	222
5.1.3.	Síntesis dimensional	229
	Síntesis de generación de funciones	229
	Síntesis de generación de movimiento	231
	Síntesis de generación de trayectoria	232
5.1.4.	Obtención de mecanismos por adición de <i>díadas</i>	233
5.1.5.	Curvas del acoplador	236
5.2.	Síntesis de generación de funciones	237
5.2.1.	Introducción	237
5.2.2.	Ecuación de Freudenstein	239
	Cuadrilátero articulado	239
	Mecanismo de biela-manivela	240
5.2.3.	Propiedades de la ecuación de Freudenstein	241
5.2.4.	Otras expresiones de la ecuación de Freudenstein	243
	Coordinación del arco recorrido	243
	Elección del rango de variación de los ángulos	244
5.2.5.	Síntesis con <i>puntos de precisión</i>	245
	Síntesis con tres puntos de precisión	245
	Síntesis con más de tres puntos de precisión	249
5.2.6.	Síntesis con derivadas de precisión	250
5.2.7.	Síntesis aproximada para N puntos de precisión mediante mínimos cuadrados	253

5.2.8.	Movilidad del mecanismo resultante de la síntesis	256
5.3.	Síntesis de generación de movimiento	258
5.3.1.	Introducción	258
5.3.2.	Guiado de biela: método gráfico	260
	Dos posiciones: definición del polo	260
	Tres posiciones	263
	Especificación de un par fijo	264
5.3.3.	Guiado de biela: método analítico	266
	Bases del método: la forma de díada estándar	266
	Síntesis de mecanismos planos de un solo lazo	268
	Síntesis de mecanismos planos con múltiples lazos	271
5.3.4.	Síntesis de generación de trayectorias con tiempo especificado	272
Problemas Propuestos		277
6. Levas		283
Francisco Javier Martínez Reina, Carmen Madrigal Sánchez		
6.1.	Introducción	283
6.2.	Tipos de levas y seguidores	284
6.2.1.	Definiciones. Nomenclatura de levas	286
6.3.	Síntesis de leva	288
6.3.1.	Síntesis de tipo	289
6.3.2.	Síntesis dimensional del perfil de leva	289
6.3.3.	Análisis de la leva	290
6.4.	Diagramas de desplazamiento	290
6.4.1.	Velocidad constante	290
6.4.2.	Aceleración constante (perfil parabólico)	292
6.4.3.	Movimiento armónico simple	293
6.4.4.	Movimiento cicloidal	294
6.5.	Técnicas avanzadas para perfiles de leva	297
6.5.1.	Aplicaciones de alta velocidad	297
6.5.2.	Perfiles compuestos	299
6.6.	Síntesis gráfica del perfil de levas	306
6.6.1.	Leva de disco con seguidor de cara plana en traslación radial	306
6.6.2.	Leva de disco con seguidor de rodillo en traslación	307
6.6.3.	Leva de disco con seguidor oscilante de cara plana	308
6.7.	Dinámica de mecanismos de levas	309
Problemas Propuestos		317
7. Transmisiones por engranajes		321
José Luis Escalona Franco, Rosario Chamorro Moreno		
7.1.	Introducción a las transmisiones por engranaje	321
7.1.1.	Introducción	321
7.1.2.	Mecanismos de transmisión de movimiento	322

7.1.3.	Perfiles conjugados	325
7.1.4.	Línea de engrane, ángulo de empuje y velocidad de deslizamiento	326
7.1.5.	Dentaduras completas	328
7.1.6.	Perfil de evolvente	329
7.2.	Engranajes rectos con perfil de evolvente	332
7.2.1.	Engrane entre ruedas con perfil de evolvente	332
7.2.2.	Características de los engranajes con perfil de evolvente	334
7.2.3.	Datos geométricos de las ruedas dentadas	335
	Datos intrínsecos	335
	Datos de funcionamiento	336
	Datos geométricos de cremalleras	338
7.2.4.	Coefficiente de recubrimiento	339
7.2.5.	Límites geométricos del engranaje	341
	Engrane sin holgura	341
	Límite de interferencia	342
	Límite de apuntamiento	343
	Ángulo de empuje mínimo para recubrimiento	343
	Número mínimo de dientes	345
7.2.6.	Diseño geométrico de engranajes	345
7.2.7.	Engranajes normalizados	347
7.3.	Trenes de engranajes	351
7.3.1.	Introducción a los trenes de engranajes	351
7.3.2.	Trenes de ejes fijos	352
7.3.3.	Cajas de cambio	353
7.3.4.	Diseño de trenes de engranajes	354
7.3.5.	Trenes epicicloidales	361
7.3.6.	Fórmula de Willis	362
7.3.7.	Engranaje diferencial	372
	Problemas Propuestos	375
	8. Transmisiones por correas	381
	Carlos Navarro Pintado	
8.1.	Introducción	381
8.2.	Funcionamiento ideal	384
8.3.	Longitud de la correa	385
8.4.	Esfuerzos en la correas	387
8.4.1.	Correa plana	387
8.4.2.	Correa en V	389
8.4.3.	Par y potencia	390
8.4.4.	Pérdida de potencia	391
8.4.5.	Tensiones en la correa	392
8.5.	Selección de correas y consideraciones prácticas	392
8.5.1.	Velocidad óptima	392

8.5.2. Medida del tensado de la correa	394
8.5.3. Tensores	395
8.5.4. Selección de correas	395
Problemas Propuestos	399
9. Tornillos	401
Carlos Navarro Pintado	
9.1. Introducción	401
9.2. Tipos de roscas	402
9.3. Transmisión de movimiento	404
9.3.1. Subiendo la pieza	405
9.3.2. Bajando la pieza	406
9.4. Rosca métrica	407
9.5. Fricción en la cabeza	409
9.6. Eficiencia	410
9.7. Cálculo de tornillos	413
Problemas Propuestos	419
<i>Bibliografía</i>	421
Anexo A. Solución a los problemas propuestos	423
<i>Índice alfabético</i>	433

Notación

En este libro se asume que el movimiento es plano y que éste ocurre en el plano $x - y$. Por tanto, los vectores velocidad angular y los momentos actuantes sobre los sólidos tienen dirección paralela al eje z .

Las variables escalares se representan en cursiva, mientras las variables vectoriales se representan en negrilla. Los vectores pueden representarse matricialmente como una matriz columna.

Símbolo	Descripción
$\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}$	Producto vectorial de \mathbf{a} y \mathbf{b} .
$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$	Producto escalar de \mathbf{a} y \mathbf{b} .
$\mathbf{a}^T \mathbf{b}$	Producto escalar de \mathbf{a} y \mathbf{b} en notación matricial.
a	En tornillos, espesor del filete de un tornillo. En correas, distancia libre de correa entre poleas.
a_C	En engranajes, altura de cabeza de un diente.
a_F	Altura de fondo de un diente.
a_P	Altura de pie de un diente.
\mathbf{a}_{ij}^P	Vector aceleración del punto P del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
a_{ijx}^P	Componente x del vector aceleración del punto P del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
a_{ijy}^P	Componente y del vector aceleración del punto P del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
\mathbf{a}_{ij}^{tA}	Aceleración tangencial del punto A del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
\mathbf{a}_{ij}^{nA}	Aceleración normal del punto A del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
A	En correas, área de la sección de la misma.
$\mathbf{A}(\alpha)$	Matriz de giro que permite girar un vector un ángulo α .
b	Número de pares cinemáticos binarios de un mecanismo.

Nomenclatura – continuación

Símbolo	Descripción
B	Número de barras binarias de un mecanismo.
\mathbf{B}	Matriz de distribución que permite obtener la fuerza generalizada asociada al vector de fuerzas o pares externos desconocidos.
c	En correas, distancia entre los centros de las poleas.
C_B	Arco de conducción en la circunferencia base de una rueda dentada.
C_I	Número de pares de clase I de un mecanismo.
C_{II}	Número de pares de clase II de un mecanismo.
d	Diámetro exterior de la rosca de un tornillo.
d_1	Diámetro interior de la rosca de un tornillo.
d_2	Diámetro medio de la rosca de un tornillo.
D	Diámetro de una polea.
e	Espesor en axoide del diente de una rueda dentada.
e_B	Espesor de base del diente de una rueda dentada.
E	Error cuadrático medio.
	Módulo de Young.
f	Suplemento de cabeza de una rueda dentada.
F	Fuerza.
F_c	Fuerza centrífuga.
F_0	Fuerza inicial (pretensión) en una correa.
F_r	En correas, fuerza de rozamiento.
\mathbf{F}_i^P	Fuerza aplicada en el punto P del sólido i .
F_{ix}^P	Componente x del vector fuerza aplicada en el punto P del sólido i .
F_{iy}^P	Componente y del vector fuerza aplicada en el punto P del sólido i .
G	Número de grados de libertad de un mecanismo.
GDL	Acrónimo de grados de libertad de un mecanismo.
h	Altura de la sección de una correa.
	Altura de una tuerca.
H	Altura de la rosca de un tornillo.
\mathbf{i}	Vector unitario en la dirección del eje x del sistema de referencia inercial.
\mathbf{i}_k	Vector unitario en la dirección del eje x del sistema de referencia del sólido k .
I	Momento de inercia de área de una correa.
\mathbf{I}	Matriz identidad.
$\tilde{\mathbf{I}}$	Matriz antisimétrica de transformación. Realiza una rotación respecto a un eje.
I_{ij}	Centro instantáneo de rotación del movimiento relativo del sólido i respecto del sólido j .

Nomenclatura – continuación

Símbolo	Descripción
I_{Gj}	Momento de inercia másico del sólido j respecto a su centro de gravedad, G_j .
I_{Oj}	Momento de inercia másico del sólido j respecto al punto fijo O_j .
\mathbf{j}	Vector unitario en la dirección del eje y del sistema de referencia inercial.
\mathbf{j}_k	Vector unitario en la dirección del eje y del sistema de referencia del sólido k .
$\bar{\mathbf{J}}_{Tj}$	Matriz jacobiana de las traslaciones del centro de gravedad del sólido j .
$\bar{\mathbf{J}}_{Rj}$	Matriz jacobiana (escalar) de las rotaciones del sólido j .
$\bar{\mathbf{J}}$	Matriz jacobiana del mecanismo que realiza una transformación de velocidades independientes a velocidades dependientes.
l	Avance de una rosca.
L	Elevación total o carrera del seguidor en un mecanismo de levas.
	Longitud de una correa.
L_i	Elevación parcial del seguidor en el tramo i de un perfil de levas compuesto.
m	Masa de un sólido.
	Módulo en axoide de una rueda dentada.
	Número de filetes en contacto en un tornillo.
m_B	Módulo de base de una rueda dentada.
M	En correas, par aplicado a una polea.
\mathbf{M}	Matriz de masa del mecanismo en coordenadas independientes.
$\bar{\mathbf{M}}$	Matriz de masa del mecanismo en coordenadas dependientes.
M_{ij}	Momento de reacción entre el sólido i y el sólido j .
n	Relación de transmisión en correas.
	Número de filetes en la rosca de un tornillo.
n_f^j	Número de fuerzas externas que actúan sobre el sólido j .
n_m^j	Número de momentos externos que actúan sobre el sólido j .
N	Número de barras de un mecanismo.
	Componente normal de la fuerza de contacto.
\mathbf{N}_{ij}	Fuerza de reacción normal entre el sólido i y el j .
N_{ij}	Valor de la fuerza de reacción normal entre el sólido i y el j .
p	Número de pares cinemáticos pentarios de un mecanismo.
	Paso en axoide de un engranaje.
	Paso de la rosca de un tornillo.
p_B	Paso de base de una rueda dentada.
p_0	Presión admisible en la superficie de la rosca de un tornillo.

Nomenclatura – continuación

Símbolo	Descripción
P	Número de barras pentagonales de un mecanismo. Potencia. En tornillos, fuerza que aplicada a una distancia $d_2/2$ produciría el par de apriete.
P^*	Potencia virtual.
P_{ij}	En síntesis, polo del movimiento entre las posiciones i y j .
PQ	En cinemática, vector con origen en el punto P y final en el punto Q .
q	Número de pares cinemáticos cuaternarios de un mecanismo.
\mathbf{q}_{ext}	Vector de fuerzas generalizas debido a fuerzas o pares externos.
\mathbf{q}_e	Vector de fuerzas generalizas debido solo a fuerzas o pares externos conocidos.
\mathbf{q}_g	Vector de fuerzas generalizas debido a fuerzas gravitatorias.
\bar{Q}	Número de barras cuaternarias de un mecanismo.
\bar{Q}	Matriz de distribución de fuerzas de reacción.
r	En un tornillo, distancia al eje del mismo.
\mathbf{r}_{ij}^P	Vector de posición del punto P del sólido i respecto al origen del sistema de referencia del sólido j .
r_{ijx}^P	Componente x del vector de posición del punto P del sólido i respecto al origen del sistema de referencia del sólido j .
r_{ijy}^P	Componente y del vector de posición del punto P del sólido i respecto al origen del sistema de referencia del sólido j .
R	Radio de axoide de una rueda dentada. En correas, radio de la polea.
R_{apun}	Radio de apuntamiento de una rueda dentada.
R_B	Radio de la circunferencia base de una rueda dentada.
R_C	Radio de cabeza de una rueda dentada.
R_C^{Int}	En engranajes, radio de cabeza máximo para que no se produzca interferencia.
R_F	Radio de fondo de una rueda dentada.
\mathbf{R}_{ij}	Fuerza de reacción que realiza el sólido i sobre el sólido j .
R_{ijx}	Componente x del vector fuerza de reacción del sólido i sobre el sólido j .
R_{ijy}	Componente y del vector fuerza de reacción del sólido i sobre el sólido j .
R_P	Radio de pie de una rueda dentada.
t	Instante de tiempo. Número de pares cinemáticos ternarios de un mecanismo.
T	Número de barras ternarias de un mecanismo. Par de apriete aplicado a un tornillo.
\mathbf{T}_{ij}	Fuerza de reacción tangencial que realiza el sólido i sobre el sólido j .

Nomenclatura – continuación

Símbolo	Descripción
T_{ij}	Módulo de la fuerza de reacción tangencial que realiza el sólido i sobre el sólido j .
v	Velocidad lineal.
\mathbf{v}_{ij}^P	Vector velocidad del punto P del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
v_{ijx}^P	Componente x del vector velocidad del punto P del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
v_{ijy}^P	Componente y del vector velocidad del punto P del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
\mathbf{v}_{ij}^{P*}	Vector velocidad virtual del punto P del sólido i respecto al sistema de referencia del sólido j .
W_{nc}	Trabajo de las fuerzas no conservativas.
W_m	Trabajo motor.
W_u	Trabajo resistente útil.
W_r	Trabajo resistente debido a fuerzas disipativas.
\mathbf{X}	Vector de coordenadas dependientes que contiene las coordenadas del centro de masas y el ángulo de orientación de todos los sólidos móviles del mecanismo.
$\dot{\mathbf{X}}$	Vector de velocidades dependientes que contiene las componentes de la velocidad del centro de masas y la velocidad angular de todos los sólidos móviles del mecanismo.
$\ddot{\mathbf{X}}$	Vector de aceleraciones dependientes que contiene las componentes de la aceleración del centro de masas y la aceleración angular de todos los sólidos móviles del mecanismo.
y	En mecanismos de levas, desplazamiento del seguidor hasta una determinada posición.
\dot{y}	Velocidad instantánea del seguidor.
\ddot{y}	Aceleración instantánea del seguidor.
$\ddot{\ddot{y}}$	Sobreaceleración instantánea del seguidor.
(\mathbf{W}, \mathbf{Z})	Par de vectores que representan una díada en un mecanismo, manivela (o balancín) y acoplador, respectivamente.
Z	Número de dientes de una rueda dentada.
α	ángulo de empuje en un par de engranaje. ángulo de la hélice de una rosca.
α_j	En síntesis, rotación del vector \mathbf{Z}_A de una díada, correspondiente a la biela, entre las posiciones 1 y j .
$\boldsymbol{\alpha}_{ij}$	Vector aceleración angular del sólido i respecto al sólido j .
α_{ij}	Componente z del vector velocidad angular del sólido i respecto al sólido j .
α^{rec}	ángulo de empuje mínimo de recubrimiento de un engranaje.
β	En correas, ángulo de la ranura de la polea.

Nomenclatura – continuación

Símbolo	Descripción
	En tornillos, semiángulo formado por las caras de un filete rosca.
β_i	En levas, ángulo total girado por la leva en el tramo i de un perfil de levas compuesto.
β_j, γ_j, \dots	En síntesis, rotación del vector \mathbf{W} de una dñada, correspondiente a la manivela o balancín, entre las posiciones 1 y j .
δ	Flecha o deflexión en una correa. ángulo de presión en levas.
δ_j	En síntesis, vector que mide el desplazamiento de un punto arbitrario del acoplador, P , entre las posiciones 1 y j .
ΔE_c	Variación de la energía cinética.
ΔE_p	Variación de la energía potencial.
ΔE_m	Variación de la energía mecánica.
ε	Coefficiente de recubrimiento en un par de engranaje.
ε_e	En síntesis, error estructural.
η	Rendimiento de un mecanismo. Relación de transmisión. Eficiencia de una transmisión por tornillo.
θ	ángulo de deslizamiento en el contacto correa-polea.
κ	Relación de aspecto entre la base de un filete de rosca y el paso.
λ	Vector de fuerzas de reacción.
μ	Coefficiente de rozamiento.
μ_c	Coefficiente de rozamiento en la cabeza del tornillo.
μ_d	Coefficiente de rozamiento dinámico.
μ_{ij}	Coefficiente de rozamiento entre el sólido i y el j .
μ_s	Coefficiente de rozamiento estático.
ρ	Densidad
σ	Tensión normal. Tensión axial en una correa.
τ	Tensión tangencial.
τ_{ext}	Vector de fuerzas o pares externos desconocidos.
ϕ	ángulo girado por la leva hasta una determinada posición. ángulo de contacto correa-polea.
ψ	Pérdida de potencia en una transmisión por correas.
ω	Velocidad angular.
ω_{ij}	Vector velocidad angular del sólido i respecto al sólido j .
ω_{ij}	Componente z del vector velocidad angular del sólido i respecto al sólido j .
ω_{ij}^*	Componente z del vector velocidad angular virtual del sólido i respecto al sólido j .

1 Introducción a las máquinas

ENRIQUE DEL POZO POLIDORO

1.1 Preliminares

El presente capítulo solamente pretende excitar la curiosidad y la imaginación de los alumnos de Teoría de Máquinas mediante la narración de la aparición y evolución de las máquinas a lo largo de la Historia. Algunas referencias que se citan resultarán familiares, pero otras no lo serán tanto, por lo que deben servir de ventanas a través de las cuales pueda llegarse a personajes y hechos todavía desconocidos, pudiendo utilizar cada uno para explorar los temas de su preferencia bien la bibliografía aportada al final del capítulo, o bien cualquier otro medio para la búsqueda de información.

Hoy día estamos rodeados de mecanismos, y se encuentran tan asumidos los principios de la Mecánica, que no se entiende cómo hubo un tiempo en el que no se conocían el tornillo, la rueda o la polea. El proceso seguido hasta llegar al estado actual de la tecnología no ha sido fácil ni rápido, y la Humanidad debe mucho a una serie de personajes que mediante contribuciones individuales hicieron posible el progreso del conocimiento.

En la época actual del conocimiento globalizado cada vez son más extraños los descubrimientos debidos a un sólo hombre. Basta considerar el progreso del automóvil desde el primitivo y entrañable triciclo de Benz hasta los vehículos que conducimos hoy, y la cantidad de intelectos que se han aplicado y se siguen aplicando a su mejora y perfeccionamiento.

La tecnología ha transformado profundamente nuestras vidas y es de esperar que siga haciéndolo, si no nos destruimos antes mutuamente, o destruimos al planeta que nos sustenta. Múltiples invenciones maravillosas están esperando únicamente a que alguien retire el manto que las cubre, revelándolas a la Humanidad. ¿Dónde están ahora esos futuros inventores? Pueden no haber nacido todavía, pueden estar en cualquier parte, y puede también, amigo lector, que seas tú uno de ellos.

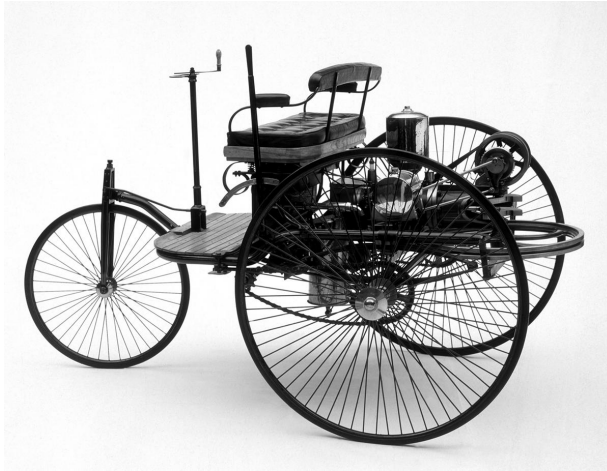


Figura 1.1 El triciclo de Benz (1885).

1.2 Prehistoria y Antigüedad Clásica

El hombre, desde la más remota antigüedad, se ha servido de diversos artefactos con la finalidad de facilitar su existencia y, en último extremo, garantizar su supervivencia. Desde los trozos de piedra burdamente tallados del Paleolítico hasta cualquier refinado producto electrónico del siglo XXI se ha recorrido un largo camino que es preciso conocer para entender la historia del progreso humano y, en definitiva, evitar repetir experiencias ya realizadas o errores cometidos.

Los primitivos cazadores-recolectores disponían de herramientas sencillas y primarias, como hachas, anzuelos, cuchillos, arpones y raspadores para la preparación de las pieles, pero también manejaban instrumentos dotados de cierta sofisticación.

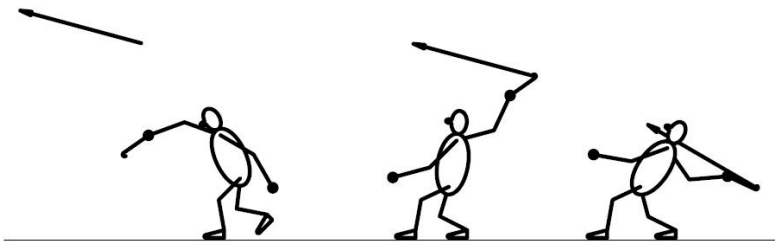


Figura 1.2 Lanzador de venablos en acción.

Los lanzadores de venablos se fabricaban generalmente de madera o con huesos largos de animales convenientemente tallados, con una muesca en un extremo para alojar la punta roma del venablo. Al blandirse con la mano por el extremo opuesto permitían prolongar la

TEORÍA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS

El presente libro es el resultado de más de 20 años impartiendo las materias asociadas a la asignatura Teoría de Máquinas en varias titulaciones de ingeniería en la Universidad de Sevilla y surge de la colaboración de los profesores que de una u otra forma participan en la docencia de las mismas.

El libro se ha dividido en tres partes. En la primera se tratan los principales aspectos de la cinemática y dinámica de máquinas; en la segunda se introduce la síntesis de mecanismos, incluyendo también las levas como elementos que permiten coordinar los movimientos de diferentes componentes de un mecanismo; finalmente, la tercera hace una muy breve introducción a los elementos de máquinas, dedicando especial atención a los sistemas de transmisión. La obra se ha hecho más extensa de lo que se puede impartir en una asignatura como esta, con el objetivo de que el alumno pueda extender sus conocimientos si lo desea, pero al mismo tiempo se ha limitado la extensión intentando no incluir más de lo que se considera de interés para un alumno en los primeros cursos del grado. Se ha intentado también mantener un equilibrio entre los métodos tradicionales de análisis y los métodos modernos, analíticos o numéricos, de forma que el alumno pueda comprender mejor los movimientos y la dinámica del comportamiento de los mecanismos y máquinas.