

# CONTENIDO

Prefacio a la segunda edición .....	xxi
Prefacio a la primera edición .....	xxiii

## PARTE I CINEMÁTICA DE MECANISMOS ..... 1

### Capítulo 1 Introducción ..... 3

1.0 Objetivo .....	3
1.1 Cinemática y cinética .....	3
1.2 Mecanismos y máquinas .....	4
1.3 Breve historia de la cinemática .....	5
1.4 Aplicaciones de la cinemática .....	6
1.5 El proceso de diseño .....	8
<i>Diseño, invención, creatividad</i> .....	8
<i>Identificación de la necesidad</i> .....	9
<i>Investigación preliminar</i> .....	9
<i>Planteamiento de la meta</i> .....	9
<i>Especificaciones de funcionamiento</i> .....	10
<i>Ideación e invención</i> .....	10
<i>Análisis</i> .....	12
<i>Selección</i> .....	12
<i>Diseño detallado</i> .....	13
<i>Prototipos y pruebas</i> .....	13
<i>Producción</i> .....	14
1.6 Otros enfoques del diseño .....	15
<i>Diseño axiomático</i> .....	15
1.7 Soluciones múltiples .....	16
1.8 Factores humanos en la ingeniería .....	16
1.9 El reporte en ingeniería .....	17
1.10 Unidades .....	17
1.11 Lo que viene .....	19
1.12 Referencias .....	20
1.13 Bibliografía .....	21

### Capítulo 2 Fundamentos de cinemática ..... 24

2.0 Introducción .....	24
2.1 Grados de libertad (GDL) .....	24
2.2 Tipos de movimiento .....	25
2.3 Eslabones, juntas y cadenas cinemáticas .....	26
2.4 Determinación del grado de libertad .....	30
<i>Grados de libertad en mecanismos en un plano</i> .....	31
<i>Grados de libertad en mecanismos espaciales</i> .....	33
2.5 Mecanismos y estructuras .....	33
2.6 Síntesis numérica .....	36
2.7 Paradojas .....	39
2.8 Isómeros .....	40

2.9	Transformación de eslabonamientos .....	43
2.10	Movimiento intermitente .....	46
2.11	Inversión .....	48
2.12	La condición de Grashof .....	49
	<i>Clasificación del eslabonamiento de cuatro barras</i> .....	<b>54</b>
2.13	Eslabonamientos de más de cuatro barras .....	56
	<i>Eslabonamientos con engranaje de cinco barras</i> .....	56
	<i>Eslabonamientos de seis barras</i> .....	57
	<i>Criterio de rotabilidad de tipo Grashof para</i> <i>eslabonamientos de orden superior</i> .....	<b>58</b>
2.14	Los resortes como eslabones .....	59
2.15	Consideraciones prácticas .....	60
	<i>Juntas de pasador versus correderas y semijuntas</i> .....	<b>60</b>
	¿ <i>Viga en voladizo o viga en doble voladizo?</i> .....	63
	<i>Eslabones cortos</i> .....	<b>63</b>
	<i>Relación de apoyo</i> .....	<b>63</b>
	<i>Eslabonamientos versus levas</i> .....	65
2.16	Motores e impulsores .....	65
	<i>Motores eléctricos</i> .....	<b>65</b>
	<i>Motores neumáticos e hidráulicos</i> .....	71
	<i>Cilindros neumáticos e hidráulicos</i> .....	71
	<i>Solenoides</i> .....	71
2.17	Referencias .....	72
2.18	Problemas .....	73
<b>Capítulo 3 Síntesis gráfica de eslabonamientos</b> .....		<b>83</b>
3.0	Introducción .....	83
3.1	Síntesis .....	83
3.2	Generación de función, trayectoria y movimiento .....	86
3.3	Condiciones límite .....	87
3.4	Síntesis dimensional .....	90
	<i>Síntesis de dos posiciones</i> .....	91
	<i>Síntesis de tres posiciones con pivotes móviles especificados</i> .....	<b>97</b>
	<i>Síntesis de tres posiciones con pivotes móviles alternos</i> .....	<b>98</b>
	<i>Síntesis de tres posiciones con pivotes fijos especificados</i> .....	<b>101</b>
	<i>Síntesis posicional para más de tres posiciones</i> .....	<b>105</b>
3.5	Mecanismos de retorno rápido .....	106
	<i>Mecanismo de retorno rápido de cuatro barras</i> .....	<b>106</b>
	<i>Mecanismo de retorno rápido de seis barras</i> .....	<b>108</b>
3.6	Curvas de acoplador .....	112
3.7	Cognados .....	122
	<i>Movimiento paralelo</i> .....	<b>127</b>
	<i>Cognados de cinco barras con engranaje de un</i> <i>eslabonamiento de cuatro barras</i> .....	<b>129</b>
3.8	Mecanismos para movimiento rectilíneo .....	130
	<i>Diseño óptimo para eslabonamientos de</i> <i>cuatro barras en línea recta</i> .....	<b>132</b>
3.9	Mecanismos con detenimiento .....	137
	<i>Eslabonamientos con un solo detenimiento</i> .....	<b>137</b>
	<i>Eslabonamientos con doble detenimiento</i> .....	<b>140</b>

3.10	Referencias .....	142
3.11	Bibliografía .....	143
3.12	Problemas .....	144
3.13	Proyectos .....	153

## Capítulo 4 Análisis de posición ..... 158

4.0	Introducción .....	
4.1	Sistemas de coordenadas .....	160
4.2	Posición y desplazamiento .....	160
	<i>Posición</i> .....	160
	<i>Desplazamiento</i> .....	161
4.3	Traslación, rotación y movimiento complejo .....	163
	<i>Traslación</i> .....	163
	<i>Rotación</i> .....	163
	<i>Movimiento complejo</i> .....	164
	Teoremas .....	165
4.4	Análisis gráfico de posición de eslabonamientos .....	165
4.5	Análisis algebraico de posición de eslabonamientos .....	167
	<i>Representación del lazo vectorial de eslabonamientos</i> .....	168
	<i>Los números complejos como vectores</i> .....	169
	<i>La ecuación de lazo vectorial para</i> <i>un eslabonamiento de cuatro barras</i> .....	170
4.6	La solución de posición en el eslabonamiento de la manivela-corredera de cuatro barras .....	174
4.7	Solución de posición con manivela-corredera invertida .....	176
4.8	Eslabonamientos con más de cuatro barras .....	179
	<i>El eslabonamiento de cinco barras con engranaje</i> .....	179
	<i>Eslabonamientos de seis barras</i> .....	182
4.9	Posición de un punto cualquiera en un eslabonamiento .....	183
4.10	Ángulos de transmisión .....	184
	<i>Valores extremos del ángulo de transmisión</i> .....	185
4.11	Posiciones de agarrotamiento .....	187
4.12	Circuitos y ramas en eslabonamientos .....	188
4.13	Método de solución de Newton-Raphson .....	189
	<i>Determinación unidimensional de raíces (método</i> <i>de Newton)</i> .....	190
	<i>Determinación multidimensional de raíces</i> <i>(método de Newton-Raphson)</i> .....	192
	<i>Solución de Newton-Raphson para</i> <i>un eslabonamiento de cuatro barras</i> .....	193
	<i>Resolvedores de ecuaciones</i> .....	194
4.14	Referencias .....	194
4.15	Problemas .....	194

## Capítulo 5 Síntesis analítica de eslabonamientos ..... 205

5.0	Introducción .....	205
5.1	Tipos de síntesis cinemática .....	205

5.2	Puntos de precisión . . . . .	206
5.3	Generación de movimiento de dos posiciones por síntesis analítica . . . . .	206
5.4	Comparación de síntesis de dos posiciones analítica y gráfica . . . . .	213
5.5	Solución por ecuaciones simultáneas . . . . .	216
5.6	Generación de movimiento de tres posiciones por síntesis analítica . . . . .	218
5.7	<b>Comparación</b> de síntesis analítica y gráfica para tres posiciones . . . . .	224
5.8	Síntesis para una localización específica de pivote fijo . . . . .	228
5.9	Círculos de punto central y de punto circunferencia1 . . . . .	235
5.10	Síntesis analítica de cuatro y cinco posiciones . . . . .	237
5.11	Síntesis analítica de un generador de trayectoria con temporización prescrita . . . . .	238
5.12	Síntesis analítica de un generador de función para un eslabonamiento de cuatro barras . . . . .	239
5.13	Otros métodos de síntesis de eslabonamientos . . . . .	242
	<i>Métodos de punto de precisión</i> . . . . .	244
	<i>Métodos de ecuaciones de curva de acoplador</i> . . . . .	246
	<i>Métodos de optimización</i> . . . . .	246
5.14	Referencias . . . . .	249
5.15	Problemas . . . . .	252
<b>Capítulo 6 Análisis de velocidad</b> . . . . .		<b>260</b>
6.0	Introducción . . . . .	260
6.1	Definición de <b>velocidad</b> . . . . .	260
6.2	Análisis gráfico de velocidad . . . . .	263
6.3	Centros instantáneos de velocidad . . . . .	268
6.4	Análisis de velocidad con centros instantáneos . . . . .	276
	<i>Relación de velocidad angular</i> . . . . .	278
	<i>Ventaja mecánica</i> . . . . .	279
	<i>Uso de los centros instantáneos en el diseño de eslabonamientos</i> . . . . .	282
6.5	Céntrodos . . . . .	284
	<i>Un eslabonamiento "sin eslabones"</i> . . . . .	287
	<i>Cúspides</i> . . . . .	288
6.6	Velocidad de deslizamiento . . . . .	288
6.7	Soluciones analíticas para análisis de velocidad . . . . .	293
	<i>Eslabonamiento de cuatro barras con juntas de pasador</i> . . . . .	293
	<i>Eslabonamiento de cuatro barras de manivela-corredera</i> . . . . .	296
	<i>Eslabonamiento de cuatro barras de manivela-corredera invertido</i> . . . . .	298
6.8	Análisis de velocidad del eslabonamiento de cinco barras con engranaje . . . . .	300
6.9	Velocidad de un punto cualquiera en un eslabonamiento . . . . .	301
6.10	Referencias . . . . .	303
6.11	Problemas . . . . .	303
<b>Capítulo 7 Análisis de aceleración</b> . . . . .		<b>324</b>
7.0	Introducción . . . . .	324
7.1	Definición de aceleración . . . . .	324
7.2	Análisis gráfico de aceleración . . . . .	327

7.3	Soluciones analíticas para el análisis de aceleración .....	333
	<i>El eslabonamiento de cuatro barras con juntas de pasador</i> . . . . .	333
	<i>Eslabonamiento de cuatro barras de manivela-corredera</i> , . . . . .	336
	<i>Aceleración de Coriolis</i> .....	338
	<i>Eslabonamiento de cuatro barras de manivela-corredera invertido</i> .....	340
7.4	Análisis de la aceleración del eslabonamiento de cinco barras con engranaje .....	343
7.5	Aceleración de un punto cualquiera en un eslabonamiento .....	345
7.6	Tolerancia humana a la aceleración .....	347
7.7	Rapidez de aceleración .....	349
7.8	Eslabonamientos de $n$ barras .....	352
7.9	Referencias .....	352
7.10	Problemas .....	352

## Capítulo 8 Diseño de levas .....

372

8.0	Introducción .....	372
8.1	Terminología de los mecanismos de leva .....	373
	<i>Tipo de movimiento del seguidor</i> .....	374
	<i>Tipo de cierre de junta</i> .....	375
	<i>Tipo de seguidor</i> .....	375
	<i>Tipo de leva</i> .....	376
	<i>Tipos de restricciones de movimiento</i> .....	378
	<i>Tipo de programa de movimiento</i> .....	379
8.2	Diagramas $s$ v $a$ j .....	379
8.3	Diseño de levas con doble detenimiento. Selección de las funciones $s$ v $a$ j .....	381
	<i>Ley fundamental del diseño de levas</i> .....	384
	<i>Movimiento armónico simple (MAS)</i> .....	384
	<i>Desplazamiento cicloidal</i> .....	387
	<i>Funciones combinadas</i> .....	390
8.4	Diseño de una leva con detenimiento simple. Selección de las funciones $s$ v $a$ j .....	403
8.5	Funciones polinomiales .....	406
	<i>Aplicaciones de polinomios con doble detenimiento</i> .....	407
	<i>Aplicaciones de polinomios con un solo detenimiento</i> .....	411
8.6	Movimiento de trayectoria crítica (MTC) .....	414
	<i>Polinomios utilizados en el movimiento de trayectoria crítica</i> .....	415
	<i>Funciones de la familia de armónicas de semiperiodo</i> .....	423
8.7	Dimensionado de la leva: ángulo de presión y radio de curvatura .....	426
	<i>Ángulo de presión: seguidores de rodillo</i> .....	428
	<i>Elección de un radio de círculo primitivo</i> .....	431
	<i>Momento de volteo: seguidor de cara plana</i> .....	433
	<i>Radio de curvatura: seguidor de rodillo</i> .....	434
	<i>Radio de curvatura: seguidor de cara plana</i> .....	438
8.8	Consideraciones en la fabricación de levas .....	443
	<i>Generación geométrica</i> .....	443
	<i>Mecanizado manual o NC según coordenadas de levas (corte por empuje)</i> .....	444

	<i>Control numérico continuo con interpolación lineal</i> .....	445
	<i>Control numérico continuo con interpolación circular</i> .....	447
	<i>Duplicación analógica</i> .....	448
	<i>Funcionamiento real de una leva comparado con el funcionamiento teórico</i> .....	450
8.9	Consideraciones prácticas de diseño .....	453
	¿ <i>Un seguidor traslatorio u oscilatorio?</i> .....	453
	¿ <i>Cierre de fuerza o de forma?</i> .....	454
	¿ <i>Leva radial o axial?</i> .....	455
	¿ <i>Seguidor de rodillo o de cara plana?</i> .....	455
	¿ <i>Usar detenciones o no?</i> .....	456
	¿ <i>Rectificar o no?</i> .....	456
	¿ <i>Lubricar o no?</i> .....	456
8.10	Referencias .....	457
8.11	Problemas .....	457
8.12	Proyectos .....	462
	<b>Capítulo 9 Trenes de engranes</b> .....	<b>466</b>
9.0	Introducción .....	466
9.1	Cilindros rodantes .....	467
9.2	Ley fundamental del engranaje .....	468
	<i>Forma de involuta para dientes de engrane</i> .....	469
	<i>Ángulo de presión</i> .....	472
	<i>Cambio de la distancia entre centros</i> .....	472
	<i>Juego</i> .....	473
9.3	Nomenclatura de los engranes .....	474
9.4	Interferencia y rebaje entre dientes .....	477
	<i>Formas de dientes de adendo desigual</i> .....	478
9.5	Relación de contacto .....	479
9.6	Tipos de engranes .....	482
	<i>Engranes rectos, helicoidales y espirales</i> .....	482
	<i>Engranes de tornillos sin fin</i> .....	483
	<i>Mecanismos de piñón y cremallera</i> .....	484
	<i>Engranes cónicos e hipoidales</i> .....	485
	<i>Engranes no circulares</i> .....	486
	<i>Transmisiones de banda y de cadena</i> .....	487
9.7	Trenes de engranes de tipo simple .....	488
9.8	Trenes de engranes de tipo compuesto .....	489
	<i>Diseño de trenes compuestos</i> .....	490
	<i>Diseño de trenes de tipo compuesto con reversión</i> .....	491
	<i>Un algoritmo para el diseño de trenes de engranes de tipo compuesto</i> .....	494
9.9	Trenes de engranes planetarios o epicíclicos .....	499
	<i>El método tabular</i> .....	501
	<i>El método de la fórmula</i> .....	506
9.10	Eficiencia de los trenes de engranes .....	508
9.11	Transmisiones .....	512
9.12	Diferenciales .....	515

9.13 Referencias ..... 518  
 9.14 Problemas ..... 518

**PARTE II DINÁMICA DE MÁQUINARIA ..... 529**

**Capítulo 10 Principios de dinámica ..... 531**

10.0 Introducción ..... 531  
 10.1 Leyes del movimiento de Newton ..... 531  
 10.2 Modelos dinámicos ..... 532  
 10.3 Masa ..... 532  
 10.4 Momento de masa y centro de gravedad ..... 534  
 10.5 Momento de inercia de masa (segundo momento de masa) ..... 535  
 10.6 Teorema de los ejes paralelos (o de transferencia) ..... 537  
 10.7 Radio de giro ..... 538  
 10.8 Centro de percusión ..... 539  
 10.9 Parámetros concentrados de modelos dinámicos ..... 541  
     *Constante de resorte* ..... 541  
     *Amortiguamiento* ..... 542  
 10.10 Sistemas equivalentes ..... 544  
     *Amortiguadores combinados* ..... 545  
     *Combinación de resortes* ..... 546  
     *Combinación de masas* ..... 547  
     *Relaciones de la palanca y el engrane* ..... 547  
 10.11 Métodos de resolución ..... 554  
 10.12 El principio de d'Alembert ..... 554  
 10.13 Métodos de energía: trabajo virtual ..... 557  
 10.14 Referencias ..... 559  
 10.15 Problemas ..... 559

**Capítulo 11 Análisis de fuerzas dinámicas ..... \***

11.0 Introducción ..... 564  
 11.1 Método de solución de Newton ..... 564  
 11.2 Un solo eslabón en rotación pura ..... 565  
 11.3 Análisis de fuerzas de un eslabonamiento de tres barras  
     de manivela-corredera ..... 568  
 11.4 Análisis de fuerzas de un eslabonamiento de cuatro barras ..... 575  
 11.5 Análisis de fuerza de un eslabonamiento de cuatro barras  
     de manivela-corredera ..... 582  
 11.6 Análisis de fuerza de la manivela-corredera invertida ..... 584  
 11.7 Análisis de fuerzas: eslabonamientos con más de cuatro barras ..... 588  
 11.8 Fuerzas de sacudimiento y par de torsión de sacudimiento ..... 589  
 11.9 Programa FOURBAR ..... 590  
 11.10 Análisis de fuerza de eslabonamiento por métodos de energía ..... 590  
 11.11 Control del par de torsión de entrada: volantes ..... 593  
 11.12 Índice de transmisión de fuerza en un eslabonamiento ..... 600  
 11.13 Consideraciones prácticas ..... 602  
 11.14 Referencias ..... 603

11.15	Problemas .....	603
11.16	Proyectos .....	610
<b>Capítulo 12</b>	<b>Equilibrio .....</b>	<b>617</b>
12.0	Introducción .....	617
12.1	Equilibrio estático .....	618
12.2	Equilibrio dinámico .....	621
12.3	Equilibrio de eslabonamientos .....	626
	<i>Equilibrio total de fuerzas de eslabonamientos</i> .....	627
12.4	Efecto del equilibrio en fuerzas de sacudimiento y pasador .....	631
12.5	Efecto del equilibrio sobre el par de torsión de entrada .....	632
12.6	Equilibrio de los momentos de sacudimiento en los eslabonamientos ...	634
12.7	Medición y corrección del desequilibrio .....	638
12.8	Referencias .....	640
12.9	Problemas .....	641
<b>Capítulo 13</b>	<b>Dinámica de motores .....</b>	<b>648</b>
13.0	Introducción .....	648
13.1	Diseño del motor .....	650
13.2	Cinemática del mecanismo de manivela-corredera .....	655
13.3	Fuerza del gas y par de torsión del gas .....	660
13.4	Masas equivalentes .....	664
13.5	Fuerzas de inercia y de sacudimiento .....	668
13.6	Pares de torsión de inercia y de sacudimiento .....	671
13.7	Par de torsión total del motor .....	673
13.8	Volantes .....	673
13.9	Fuerzas de pasador en un motor de un cilindro .....	674
13.10	Equilibrio del motor de un cilindro .....	681
13.11	Transacciones y relaciones de diseño .....	686
	<i>Relación biela/manivela</i> .....	686
	<i>Relación diámetro/carrera</i> .....	686
	<i>Materiales</i> .....	687
13.12	Bibliografía .....	687
13.13	Problemas .....	687
13.14	Proyectos .....	690
<b>Capítulo 14</b>	<b>Motores multicilíndricos .....</b>	<b>* 692</b>
14.0	Introducción .....	692
14.1	Diseños de motores multicilíndricos .....	693
14.2	Diagrama de fase de la manivela .....	696
14.3	Fuerzas de sacudimiento en motores con cilindros en línea .....	698
14.4	Par de torsión de inercia en motores con cilindros en línea .....	702
14.5	Momento de sacudimiento en motores con cilindros en línea .....	703
14.6	Encendido uniforme .....	705
	<i>Motor con un ciclo de dos tiempos</i> .....	706
	<i>Motor con ciclo de cuatro tiempos</i> .....	708
14.7	Configuraciones de motores en V .....	714
14.8	Configuraciones de motores con cilindros opuestos II .....	728



14.9	Equilibrio de motores multicilíndricos .....	729
	<i>Balance secundario en un motor de cuatro cilindros en línea</i> ....	733
14.10	Referencias .....	737
14.11	Bibliografía .....	737
14.12	Problemas .....	737
14.13	Proyectos .....	738
<b>Capítulo 15 Dinámica de levas .....</b>		<b>741</b>
15.0	Introducción .....	741
15.1	Análisis dinámico de fuerza del mecanismo de leva y seguidor con cierre de fuerza .....	742
	<i>Respuesta no amortiguada</i> .....	742
	<i>Respuesta amortiguada</i> .....	745
15.2	Resonancia .....	752
15.3	Análisis de fuerza cinetostática de una leva y seguidor con cierre de fuerza .....	755
15.4	Análisis de fuerza cinetostática de la forma cerrada de una leva-seguidor con cierre de forma .....	759
15.5	Par de torsión del árbol de levas .....	763
15.6	Medición de fuerzas dinámicas y aceleraciones .....	766
15.7	Consideraciones prácticas .....	769
15.8	Referencias .....	771
15.9	Bibliografía .....	771
15.10	Problemas .....	772
<b>Capítulo 16 Diseño de ingeniería .....</b>		<b>776</b>
16.0	Introducción .....	776
16.1	Un caso de estudio de diseño .....	777
	<i>Educación para la creatividad en ingeniería</i> .....	777
16.2	Conclusión .....	782
16.3	Referencias .....	783
<b>Apéndice A Programas de computadora .....</b>		<b>785</b>
A.0	Introducción .....	785
A.1	Información general .....	787
A.2	Operación general de los programas .....	787
A.3	Programa FOURBAR .....	796
A.4	Programa FIVEBAR .....	805
A.5	Programa SIXBAR .....	807
A.6	Programa SLIDER .....	811
A.7	Programa DYNACAM .....	813
A.8	Programa ENGINE .....	820
A.9	Programa MATRIX .....	828
<b>Apéndice B Propiedades de materiales .....</b>		<b>829</b>
<b>Apéndice C Propiedades geométricas .....</b>		<b>835</b>

Apéndice D Datos de resortes .....	837
Apéndice E Atlas de curvas del acoplador de eslabonamientos de cinco barras con engranaje .....	841
Apéndice F Respuestas a los problemas seleccionados .....	847
Indice .....	861
Indice del CD-ROM ..	877