

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO	13
1 INTRODUCCIÓN	15
1.1 DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA	16
1.2 PRINCIPIOS SOBRE MODELIZACIÓN	17
1.3 COMPLEJIDAD DE LOS ALGORITMOS	20
1.4 OPTIMIZACIÓN E INCERTIDUMBRE	21
1.5 DISCUSIÓN	22

Parte I MODELOS DETERMINÍSTICOS

2 PROGRAMACIÓN LINEAL	27
2.1 FORMULACIÓN DE MODELOS	28
2.1.1 Un ejemplo introductorio de asignación de recursos . . .	28
2.1.2 Pasos en la formulación de un modelo lineal	31
2.1.3 Solución gráfica de problemas lineales	32
2.2 EL MÉTODO DEL SÍMPLEX	40
2.2.1 Conceptos previos	40
2.2.2 Formulación algebraica general	43
2.2.3 Definiciones y resultados básicos	47
2.2.4 Variables artificiales	52
2.2.5 Los indicadores en el método del simplex	55
2.2.6 Método del simplex primal	63
2.2.7 Método de las penalizaciones	69
2.2.8 Método de las dos fases	73
2.3 DUALIDAD	78

2.3.1	Formulación del problema dual	79
2.3.2	Relaciones en dualidad	81
2.3.3	Interpretación económica del problema dual	87
2.3.4	Método del <i>símplex</i> dual	88
2.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	92
2.4.1	Cambios discretos	92
2.4.2	Incorporación de nuevas restricciones y variables	98
2.4.3	Programación paramétrica	101
2.5	ASPECTOS COMPUTACIONALES Y OTROS MÉTODOS	109
2.5.1	Método del <i>símplex</i> revisado	110
2.5.2	Métodos del punto interior	112
2.6	DISCUSIÓN	113
2.7	EJERCICIOS	115
3	ANÁLISIS EN REDES	121
3.1	EL PROBLEMA DE TRANSPORTE	122
3.1.1	Formulación	122
3.1.2	Métodos de solución	129
3.2	EL PROBLEMA DE TRANSBORDO	141
3.3	EL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN	142
3.4	SECUENCIACIÓN Y CONTROL EN REDES	146
3.4.1	Análisis CPM	148
3.4.2	Análisis PERT	152
3.5	CAMINOS DE LONGITUD MÍNIMA Y MÁXIMA	154
3.6	FLUJO MÁXIMO EN REDES	159
3.7	ÁRBOL DE MÁXIMO ALCANCE	163
3.8	DISCUSIÓN	165
3.9	EJERCICIOS	167
4	PROGRAMACIÓN ENTERA	171
4.1	ALGUNAS APLICACIONES DE PROGRAMACIÓN ENTERA	172
4.1.1	El problema de la mochila	172
4.1.2	El problema del viajante	173
4.2	ENUMERACIÓN EXHAUSTIVA E IMPLÍCITA	174
4.3	RAMIFICACIÓN Y ACOTACIÓN	179
4.4	PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA	185
4.5	PROGRAMACIÓN 0-1	186
4.6	MÉTODO DE LOS PLANOS DE CORTE	192
4.7	DISCUSIÓN	197
4.8	EJERCICIOS	198

5	PROGRAMACIÓN LINEAL MULTIOBJETIVO	201
5.1	INTRODUCCIÓN	201
5.2	EL PROGRAMA LINEAL MULTIOBJETIVO	204
5.3	MÉTODOS DE SOLUCIÓN	206
5.3.1	Método de las ponderaciones	206
5.3.2	Método de las ε -restricciones	210
5.3.3	Método del $\text{s\'implex}$ multiobjetivo	213
5.3.4	Programación por metas	221
5.3.5	Solución gráfica en programación por metas	225
5.3.6	Algoritmo lineal secuencial	228
5.4	DISCUSIÓN	230
5.5	EJERCICIOS	232
6	PROGRAMACIÓN NO LINEAL	235
6.1	CONCEPTOS PREVIOS	236
6.2	OPTIMIZACIÓN NO RESTRINGIDA	239
6.2.1	Algoritmos de búsqueda unidimensionales	239
6.2.2	Algoritmos de búsqueda multidimensionales	242
6.3	OPTIMIZACIÓN RESTRINGIDA	245
6.3.1	Restricciones de igualdad (Multiplicadores de Lagrange)	246
6.3.2	Restricciones de desigualdad (Condiciones de Karush-Kuhn-Tucker)	248
6.4	PROGRAMACIÓN CUADRÁTICA	251
6.5	PROGRAMACIÓN SEPARABLE	255
6.6	PROGRAMACIÓN CONVEXA	257
6.7	DISCUSIÓN	258
6.8	EJERCICIOS	260

Parte II MODELOS ESTOCÁSTICOS

7	CADENAS DE MARKOV EN TIEMPO DISCRETO	265
7.1	PROCESOS ESTOCÁSTICOS Y DE MARKOV	266
7.2	CADENAS DE MARKOV EN TIEMPO DISCRETO	269
7.3	COMPORTAMIENTO DE TRANSICIÓN	273
7.4	COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO	278
7.4.1	Clasificación de estados	279
7.4.2	Teoremas Límite	286
7.5	CADENAS DE MARKOV ABSORBENTES	296
7.6	CADENAS DE MARKOV REVERSIBLES	300

7.7	APLICACIONES	301
7.7.1	Complejidad del algoritmo del símplex	301
7.7.2	Diseño de un buffer de capacidad finita para un sistema de comunicaciones con múltiples canales de transmisión	304
7.8	DISCUSIÓN	306
7.9	EJERCICIOS	308
8	PROCESOS DE POISSON	313
8.1	PROPIEDADES DE LA DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL	314
8.2	PROCESOS DE POISSON	316
8.2.1	Procesos de conteo	316
8.2.2	Procesos de Poisson	318
8.2.3	Distribución de tiempos de espera y tiempos entre llegadas	322
8.2.4	Partición de un proceso de Poisson	324
8.2.5	Mezcla de procesos de Poisson	326
8.2.6	Distribución condicionada de tiempos de llegadas	328
8.3	PROCESOS DE POISSON NO HOMOGÉNEOS	332
8.4	PROCESOS DE POISSON COMPUESTOS	334
8.5	APLICACIÓN	335
8.5.1	Estimación de la fiabilidad del software	335
8.6	DISCUSIÓN	337
8.7	EJERCICIOS	337
9	CADENAS DE MARKOV EN TIEMPO CONTINUO	341
9.1	DEFINICIONES	341
9.2	COMPORTAMIENTO DE TRANSICIÓN	344
9.3	COMPORTAMIENTO ESTACIONARIO	350
9.4	CADENAS DE MARKOV REVERSIBLES	355
9.5	PROCESOS DE NACIMIENTO Y MUERTE	356
9.6	DISCUSION	362
9.7	EJERCICIOS	363
10	MODELOS DE COLAS BÁSICOS	367
10.1	DESCRIPCIÓN DE UN MODELO DE COLAS	368
10.1.1	Elementos básicos	369
10.1.2	Notación de Kendall	374
10.2	VARIABLES ALEATORIAS Y MEDIDAS DE INTERÉS	375
10.3	INTRODUCCIÓN A LAS COLAS EXPONENCIALES	381
10.4	MODELO $M/M/1$: UN SERVIDOR	382
10.4.1	Solución de equilibrio	382

10.4.2	Medidas de rendimiento	384
10.4.3	Tiempos de espera	387
10.5	MODELO $M/M/1/K$: CAPACIDAD K FINITA DEL SISTEMA	391
10.5.1	Solución de equilibrio	391
10.5.2	Medidas de rendimiento	393
10.5.3	Tiempos de espera	394
10.6	MODELO $M/M/c$: c SERVIDORES PARALELOS	397
10.6.1	Solución de equilibrio	397
10.6.2	Medidas de rendimiento y tiempos de espera	399
10.7	MODELO $M/M/\infty$: INFINITOS SERVIDORES	402
10.8	MODELO $M/M/c/K$	403
10.8.1	Solución de equilibrio	403
10.8.2	Medidas de rendimiento y tiempos de espera	405
10.9	MODELO $M/M/c/c$: PÉRDIDAS CON c SERVIDORES . . .	407
10.10	MODELO $M/M/1/K/K$: POBLACIÓN FINITA	409
10.10.1	Descripción del modelo	409
10.10.2	Solución de equilibrio	410
10.10.3	Medidas de rendimiento y tiempos de espera	411
10.10.4	Aplicaciones en Informática	414
10.11	MODELO $M/M/c/K/K$	416
10.11.1	Solución de equilibrio	416
10.11.2	Medidas de rendimiento y tiempos de espera	416
10.12	MODELO $M/M/c/K/m$ ($K \leq m$)	418
10.13	DISCUSIÓN	418
10.14	EJERCICIOS	421
11	MODELOS DE COLAS AVANZADOS	427
11.1	MODELOS CON LLEGADAS O SERVICIO EN MASA	428
11.1.1	Modelo $M^{[X]}/M/1$: llegadas en masa	428
11.1.2	Modelo $M/E_r/1$: servicio en etapas exponenciales . . .	430
11.1.3	Modelo $M/M^{[Y]}/1$: servicio en masa	434
11.1.4	Modelo $E_r/M/1$: llegadas en etapas exponenciales . .	437
11.1.5	Otras posibilidades del método de las fases	440
11.2	PATRÓN GENERAL DE LLEGADAS O SERVICIO	441
11.2.1	Modelo $M/G/1$: servicio con distribución arbitraria . .	441
11.2.2	Modelo $G/M/1$: llegadas con distribución arbitraria . .	449
11.2.3	Aproximaciones para modelos G/G	454
11.3	DISCIPLINAS DE GESTIÓN DE LA COLA	456
11.3.1	LIFO, SIRO y colas con prioridades	456
11.3.2	Compartición de procesadores	462

11.4 REDES DE COLAS	466
11.4.1 Redes abiertas	467
11.4.2 Redes cerradas	474
11.4.3 Redes más generales	480
11.5 SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE COLAS	481
11.5.1 Objetivos y fases de la simulación	481
11.5.2 Simulación de sucesos discretos	483
11.5.3 Recogida y análisis de resultados	487
11.5.4 Software de simulación	491
11.6 DISCUSIÓN	494
11.7 EJERCICIOS	496
 SOLUCIONES DE EJERCICIOS SELECCIONADOS	 501
 BIBLIOGRAFÍA	 535
 ÍNDICE DE MATERIAS	 547