
Contenido

98

Capítulo 1	Toma de decisiones en la investigación de operaciones (IO)	1
1.1	Arte y ciencia de la investigación de operaciones	1
1.2	Elementos de un modelo de decisión	2
1.3	Arte de la representación por medio de modelos	4
1.4	Tipos de modelos de investigación de operaciones (IO)	6
1.5	Efecto de la disponibilidad de datos en la representación por medio de modelos	7
1.6	Cálculos en investigación de operaciones	8
1.7	Fases de un estudio de investigación de operaciones	10
1.8	Acerca de este libro	12
	Bibliografía	13

PRIMERA PARTE PROGRAMACION MATEMATICA

Capítulo 2	Programación lineal: formulaciones y solución gráfica	17
2.1	Modelo de dos variables y su solución gráfica	18
2.1.1	Solución gráfica de modelos de PL	22
2.1.2	Análisis de sensibilidad: presentación elemental	26

xii Contenido

- 2.2 Formulaciones de PL 33
- 2.3 Otras formulaciones de PL 42
- 2.4 Resumen 55
- Bibliografía 55
- Problemas 56

Capítulo 3

Programación lineal: método simplex

69

- 3.1 Conceptos generales del método simplex 70
- 3.2 Creación del método simplex 71
 - 3.2.1 Forma estándar del modelo de PL 71
 - 3.2.2 Soluciones básicas 74
- 3.3 Método simplex primal 75
 - 3.3.1 Solución inicial artificial para el método simplex primal 84
- 3.4 Método simplex dual 92
- 3.5 Casos especiales en la aplicación del método simplex 98
 - 3.5.1 Degeneración 98
 - 3.5.2 Opciones óptimas 101
 - 3.5.3 Solución no acotada 103
 - 3.5.4 Solución infactible 105
- 3.6 Interpretación de la tabla simplex:
análisis de sensibilidad 107
 - 3.6.1 Solución óptima 108
 - 3.6.2 Estado de los recursos 108
 - 3.6.3 Precio dual (valor unitario de un recurso) 109
 - 3.6.4 Cambio máximo en la disponibilidad de recursos 111
 - 3.6.5 Cambio máximo en la relación utilidad/costo marginales 113
- 3.7 Resumen 116
- Bibliografía 116
- Problemas 117

Capítulo 4

Programación lineal: método simplex revisado

133

- 4.1 Fundamentos matemáticos 133
 - 4.1.1 Modelo PL estándar en forma matricial 134
 - 4.1.2 Soluciones básicas y bases 135
 - 4.1.3 La tabla simplex en forma matricial 139
- 4.2 Método simplex (primal) revisado 142
 - 4.2.1 Forma de producto para la matriz inversa 143
 - 4.2.2 Pasos del método simplex primal revisado 145
- 4.3 Resumen 151
- Bibliografía 152
- Problemas 152

Capítulo 5 **Programación lineal:
análisis de dualidad,
de sensibilidad y paramétrico 161**

- 5.1 Definición del problema dual 162
- 5.2 Solución del problema dual 169
 - 5.2.1 Relación entre los valores objetivo primal y dual 169
 - 5.2.2 Solución dual óptima 171
- 5.3 Interpretación económica del problema dual 174
 - 5.3.1 Precios duales 175
 - 5.3.2 Costos reducidos 177
- 5.4 Holgura complementaria 181
- 5.5 Análisis de sensibilidad o posóptimo 182
 - 5.5.1 Cambios que afectan la optimalidad 185
 - 5.5.2 Cambios que afectan la factibilidad 191
 - 5.5.3 Cambios que afectan la optimalidad y la factibilidad 195
- 5.6 Programación lineal paramétrica 196
 - 5.6.1 Cambios en C 198
 - 5.6.2 Cambios en b 202
 - 5.6.3 Cambios en P 205
 - 5.6.4 Cambios en C y b 206
- 5.7 Resumen 210
 - Bibliografía 210
 - Problemas 210

Capítulo 6 **Programación lineal:
modelo de transporte 226**

- 6.1 Definición y aplicación del modelo de transporte 227
- 6.2 Solución del problema de transporte 237
 - 6.2.1 Técnica de transporte 237
 - 6.2.2 Solución inicial mejorada 248
- 6.3 Modelo de asignación 252
- 6.4 Modelo de transbordo 257
- 6.5 Resumen 264
 - Bibliografía 265
 - Problemas 265

Capítulo 7 **Programación lineal:
temas adicionales 280**

- 7.1 Método simplex primal con variables acotadas 280
- 7.2 Algoritmo de descomposición 287

- 7.3 Algoritmo de punto interior de Karmarkar 299
 - 7.3.1 Idea básica del algoritmo de punto interior 300
 - 7.3.2 Algoritmo de punto interior 301
- 7.4 Resumen 309
 - Bibliografía 309
 - Problemas 310

Capítulo 8 Modelos de redes 315

- 8.1 Definiciones de redes 316
- 8.2 Problema del árbol de extensión mínima 317
- 8.3 Problema de la ruta más corta 321
 - 8.3.1 Ejemplos de las aplicaciones de la ruta más corta 321
 - 8.3.2 Algoritmos de la ruta más corta 325
 - 8.3.3 El problema de la ruta más corta visto como modelo de trasbordo 329
- 8.4 Problema del flujo máximo 331
- 8.5 Problema del flujo capacitado de costo mínimo 337
 - 8.5.1 Casos especiales del modelo de red capacitada 339
 - 8.5.2 Formulación de programación lineal 340
 - 8.5.3 Método simplex de la red capacitada 341
- 8.6 Resumen 347
 - Bibliografía 348
 - Problemas 348

Capítulo 9 Programación lineal entera 355

- 9.1 Aplicaciones ilustrativas de la programación entera 356
 - 9.1.1 Problema del presupuesto de capital 356
 - 9.1.2 Problema del costo fijo 357
 - 9.1.3 Problema de programación de trabajo en un taller 359
 - 9.1.4 Dicotomías 360
- 9.2 Métodos de solución de programación entera 361
- 9.3 Algoritmo de ramificar y acotar 362
- 9.4 Algoritmos de planos de corte 369
 - 9.4.1 El algoritmo fraccional (entero puro) 370
 - 9.4.2 El algoritmo mixto 378
- 9.5 Problema entero cero-uno 381
 - 9.5.1 Algoritmo aditivo 382
 - 9.5.2 Programación polinomial cero-uno 390
- 9.6 Resumen 393
 - Bibliografía 393
 - Problemas 394

Capítulo 10 **Programación dinámica (de etapas múltiples) 404**

- 10.1 Elementos del modelo de PD, ejemplo del presupuesto de capital 405
 - 10.1.1 Modelo de PD 406
 - 10.1.2 Ecuación recursiva de retroceso 413
- 10.2 Más acerca de la definición del estado 416
- 10.3 Ejemplos de modelos de PD y cálculos 418
- 10.4 Problema de dimensionalidad en programación dinámica 433
- 10.5 Solución de problemas lineales por programación dinámica 435
- 10.6 Resumen 437
 - Bibliografía 438
 - Problemas 438

SEGUNDA PARTE MODELOS PROBABILISTICOS

Capítulo 11 **Representación de datos en la investigación de operaciones 447**

- 11.1 Naturaleza de los datos en la investigación de operaciones 448
 - 11.1.1 Media y variancia de un conjunto de datos 448
 - 11.1.2 Distribuciones de probabilidad empírica 452
 - 11.1.3 Pruebas de bondad de ajuste 455
 - 11.1.4 Resumen de distribuciones comunes 458
 - 11.1.5 Datos no estacionarios 466
- 11.2 Técnicas de pronóstico 468
 - 11.2.1 Modelo de regresión 468
 - 11.2.2 Modelo de promedio móvil 471
 - 11.2.3 Alisamiento exponencial 472
- 11.3 Resumen 475
 - Bibliografía 475
 - Problemas 475

Capítulo 12 **Teoría de decisiones y juegos 480**

- 12.1 Decisiones con riesgo 482
 - 12.1.1 Criterio del valor esperado 482
 - 12.1.2 Criterio del valor esperado-variancia 485
 - 12.1.3 Criterio del nivel de aceptación 487
 - 12.1.4 Criterio del futuro más probable 490
 - 12.1.5 Datos experimentales en decisiones con riesgo 490

xvi Contenido

- 12.2 Árboles de decisión 494
- 12.3 Decisiones bajo incertidumbre 497
 - 12.3.1 Criterio de Laplace 498
 - 12.3.2 Criterio minimax (maximin) 500
 - 12.3.3 Criterio de deploración minimax de Savage 500
 - 12.3.4 Criterio de Hurwicz 502
- 12.4 Teoría de juegos 503
 - 12.4.1 Solución óptima de juegos de dos personas y suma cero 503
 - 12.4.2 Estrategias mixtas 505
 - 12.4.3 Solución gráfica de juegos de $(2 \times n)$ y $(n \times 2)$ 507
 - 12.4.4 Solución de juegos $(m \times n)$ por programación lineal 511
- 12.5 Resumen 515
 - Bibliografía 515
 - Problemas 516

Capítulo 13 Programación de proyectos con PERT-CPM 525

- 13.1 Representación con diagrama de flechas (RED) 527
- 13.2 Cálculos de ruta crítica 530
 - 13.2.1 Determinación de la ruta crítica 530
 - 13.2.2 Determinación de las holguras 533
- 13.3 Construcción del diagrama de tiempo y nivelación de recursos 535
- 13.4 Consideraciones de probabilidad y costo en la programación de proyectos 540
 - 13.4.1 Consideraciones de probabilidad en la programación de proyectos 540
 - 13.4.2 Consideraciones de costo en la programación de proyectos 543
- 13.5 Control del proyecto 551
- 13.6 Resumen 552
 - Bibliografía 552
 - Problemas 552

Capítulo 14 Modelos de inventarios 560

- 14.1 Sistema de inventario ABC 561
- 14.2 Modelo de inventario generalizado 562
- 14.3 Modelos deterministas 566
 - 14.3.1 Modelo estático de un solo artículo (CPE) 566
 - 14.3.2 Modelo estático de un solo artículo con diferentes precios 572
 - 14.3.3 Modelo estático de múltiples artículos con limitaciones en el almacén 575

14.3.4	Modelo de programación de la producción en N periodos	577
14.3.5	Modelo dinámico CPE de un solo artículo y N periodos	584
14.4	Modelos probabilísticos	601
14.4.1	Modelo de revisión continua	601
14.4.2	Modelos de un solo periodo	606
14.4.3	Modelos de múltiples periodos	615
14.5	Sistema de fabricación justo a tiempo (JAT)	62
14.6	Resumen	624
	Bibliografía	624
	Problemas	624

Capítulo 15 **Modelos de líneas de espera** **636**

15.1	Elementos básicos del modelo de líneas de espera	637
15.2	Funciones de las distribuciones de Poisson y exponencial	640
15.3	Procesos de nacimiento puro y muerte pura	643
15.3.1	Modelo de nacimiento puro	643
15.3.2	Modelo de muerte pura	645
15.4	Líneas de espera con llegadas y salidas combinadas	647
15.4.1	Modelo generalizado de Poisson	649
15.4.2	Medidas de desempeño de estado estable	652
15.5	Líneas de espera especializadas de Poisson	655
15.5.1	$(M/M/1):(DG/\infty/\infty)$	655
15.5.2	$(M/M/1):(DG/N/\infty)$	660
15.5.3	$(M/M/c):(DG/\infty/\infty)$	663
15.5.4	$(M/M/c):(DG/N/\infty)$, $c \leq N$	666
15.5.5	$(M/M/\infty):(DG/\infty/\infty)$ -Modelo de autoservicio	669
15.5.6	$(M/M/R):(DG/K/K)$, $R < K$ -modelo de servicio de máquinas	670
15.6	Líneas de espera que no obedecen la distribución de Poisson	673
15.7	Líneas de espera con prioridades de servicio	675
15.7.1	$(M_i/G_i/1):(NPRP/\infty/\infty)$	676
15.7.2	$(M_i/M_i/c):(NPRP/\infty/\infty)$	678
15.8	Líneas de espera sucesivas o en serie	679
15.8.1	Modelo en serie de dos estaciones con capacidad de líneas de espera cero	679
15.8.2	Modelo en serie de k estaciones con capacidad de líneas de espera infinita	682
15.9	Resumen	684
	Bibliografía	685
	Problemas numéricos	685
	Problemas teóricos	695

Capítulo 16 **Teoría de las líneas de espera en la práctica** 699

- 16.1 Selección del modelo apropiado de líneas de espera 699
- 16.2 Modelos de decisión en líneas de espera 701
 - 16.2.1 Modelos de costo 703
 - 16.2.2 Modelo del nivel de aceptación 707
- 16.3 Resumen 709
 - Bibliografía 710
 - Problemas 710
 - Proyectos 715

Capítulo 17 **Modelos de simulación con SIMNET II** 716

- 17.1 Introducción 718
- 17.2 Marco de referencia de la modelación con SIMNET 719
- 17.3 Representación de los enunciados de los nodos de SIMNET II 719
 - 17.3.1 Nodo fuente 720
 - 17.3.2 Nodo L. de E. 722
 - 17.3.3 Nodo instalación 725
 - 17.3.4 Nodo auxiliar 727
 - 17.3.5 Reglas básicas para la operación de nodos 728
- 17.4 Expresiones matemáticas de SIMNET II 729
- 17.5 Estructura del modelo SIMNET II 733
- 17.6 Depuración del modelo en SIMNET II 738
- 17.7 Rutas de las transacciones en SIMNET II 739
 - 17.7.1 Envío al nodo siguiente 739
 - 17.7.2 Rutas selectas 739
 - 17.7.3 Rutas de transferencia directa (campo *T o campo GOTO) 742
- 17.8 Ramas en SIMNET II 745
 - 17.8.1 Tipos de ramas (SUBF1) 746
 - 17.8.2 Condiciones de ramas (F2) 749
 - 17.8.3 Asignaciones de ramas (F3) 750
 - 17.8.4 Variables estadísticas (F4) 753
- 17.9 Interruptores lógicos 757
- 17.10 Recursos en SIMNET II 759
 - 17.10.1 Prioridad y derecho a los recursos 764
- 17.11 Ensamble y equiparación de transacciones 766
 - 17.11.1 Operación de ensamble 767
 - 17.11.2 Operación de equiparar 770
- 17.12 Asignaciones especiales 771
 - 17.12.1 Activación y desactivación del nodo fuente 772
 - 17.12.2 Control de los parámetros de L. de E. 773

	17.12.3	Asignaciones de manejo de archivos	774
	17.12.4	Localización de entradas en archivos	777
	17.12.5	Control de la duración de corrida	781
	17.12.6	Otras asignaciones especiales	781
17.13		Datos iniciales	781
	17.13.1	Entradas iniciales de archivo	782
	17.13.2	Funciones de densidad continua, discretas y discretizadas	783
	17.13.3	Funciones de dependencia	783
	17.13.4	Inicialización de elementos de un arreglo	784
	17.13.5	Inicialización de variables sin subíndices	785
	17.13.6	Funciones matemáticas	789
17.14		Inicialización de nodos y recursos con datos que dependen de la corrida	787
17.15		Recolección de observaciones estadísticas	788
17.16		Otras capacidades de SIMNET II	790
17.17		Resumen	790
		Bibliografía	791
		Problemas	791

Capítulo 18 **Proceso de decisión de Markov** **798**

18.1		Campo de acción del problema de decisión de Markov: el ejemplo del jardinero	799
18.2		Modelo de programación dinámica de etapa finita	801
18.3		Modelo de etapa infinita	807
	18.3.1	Método de enumeración exhaustiva	808
	18.3.2	Método de iteración de política sin descuento	811
	18.3.3	Método de iteración de política con descuento	815
18.4		Solución con programación lineal del problema de decisión de Markov	818
18.5		Resumen	822
18.6		Apéndice: repaso de las cadenas de Markov	822
	18.6.1	Procesos de Markov	823
	18.6.2	Cadenas de Markov	823
		Bibliografía	830
		Problemas	831

TERCERA PARTE PROGRAMACION NO LINEAL

Capítulo 19 **Teoría de optimización clásica** **837**

- 19.1 Problemas de extremos no restringidos 837
 - 19.1.1 Condiciones necesarias y suficientes para extremos 839
 - 19.1.2 El método de Newton-Raphson 843
- 19.2 Problemas de extremos restringidos 845
 - 19.2.1 Restricciones de igualdad 845
 - 19.2.2 Restricciones de desigualdad 863
- 19.3 Resumen 871
 - Bibliografía 871
 - Problemas 871

Capítulo 20 **Algoritmos de programación no lineal** **876**

- 20.1 Algoritmos no lineales irrestrictos 876
 - 20.1.1 Método de búsqueda directa 877
 - 20.1.2 Método del gradiente 879
- 20.2 Algoritmos no lineales restringidos 882
 - 20.2.1 Programación separable 883
 - 20.2.2 Programación cuadrática 891
 - 20.2.3 Programación geométrica 895
 - 20.2.4 Programación estocástica 900
 - 20.2.5 Método de combinaciones lineales 905
 - 20.2.6 Algoritmo SUMT 907
- 20.3 Resumen 908
 - Bibliografía 909
 - Problemas 909

APENDICES

APENDICE A Repaso de vectores y matrices **914**

- A.1 Vectores 914
 - A.1.1 Definición de vector 914
 - A.1.2 Adición sustracción de vectores 914
 - A.1.3 Multiplicación de vectores por escalares 915
 - A.1.4 Vectores linealmente independientes 915
- A.2 Matrices 915
 - A.2.1 Definición de matriz 915
 - A.2.2 Tipos de matrices 916

A.2.3	Operaciones aritméticas matriciales	917
A.2.4	Determinante de una matriz cuadrada	918
A.2.5	Matriz no singular	920
A.2.6	Inversa de una matriz	921
A.2.7	Métodos para calcular la inversa de una matriz	922
A.3	Formas cuadráticas	925
A.4	Funciones convexas y cóncavas	926
	Bibliografía	927
	Problemas	927

Apéndice B **Instalación y ejecución de TORA Y SIMNET II** **929**

B.1	Programa TORA	929
B.2	Programa SIMNET II	930

Respuestas a problemas seleccionados **931**

Índice **949**