

POLITEXT

Xavier Franch Gutiérrez

Estructuras de datos

Especificación, diseño e implementación

EDICIONS UPC

La presente obra fue galardonada en el segundo concurso
"Ajut a l'elaboració de material docent" convocado por al UPC.

Traducido al castellano de la obra original de
Xavier Franch Gutiérrez *Estructures de dades.*
Especificació, disseny i implementació, realizada
por Cristina Ana Ruiz Núñez

Primera edición: septiembre de 1994
Segunda edición: diciembre de 1996
Tercera edición: abril de 1999

Diseño de la cubierta: Manuel Andreu

Para la versión catalana original:

- © Xavier Franch, 1993
- © Edicions UPC, 1993
- Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL
- Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona
- Tel. 934 016 883 Fax. 934 015 885
- Edicions Virtuals: www.edicionsupc.es
- e-mail: edupc@sg.upc.es

Para la versión castellana:

- © Xavier Franch, 1993
- © Cristina Ana Ruiz Núñez, para la traducción, 1994
- © Edicions UPC, 1993

Producción: CBS – Impressió digital
Pintor Fortuny 151, 08224 Terrassa (Barcelona)

Depósito legal: B-18002-99
ISBN: 84-8301-300-2

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, así como la exportación e importación

A mis padres, por todo lo que me han dado
A Cristina, por lo que nos espera juntos
A Miguel Angel, presente en mis recuerdos

Índice

Presentación	11
Prólogo	13
 Capítulo 1 Especificación de tipos abstractos de datos	
Presentación.....	19
1.1 Introducción a los tipos abstractos de datos	19
1.2 Modelo de un tipo abstracto de datos.....	25
1.2.1 Signaturas y términos.....	26
1.2.2 Modelos asociados a una signatura.....	29
1.2.3 Evaluación de un término dentro de un álgebra	32
1.2.4 Ecuaciones y especificaciones algebraicas.....	34
1.2.5 Modelo inicial de una especificación.....	37
1.2.6 Otros modelos posibles	43
1.3 Construcción sistemática de especificaciones.....	45
1.3.1 Introducción al uso de especificaciones	45
1.3.2 Clasificación de las operaciones de una especificación.....	46
1.3.3 Método general de construcción de especificaciones.....	47
1.4 Ecuaciones condicionales, símbolos auxiliares y errores.....	48
1.4.1 Ecuaciones condicionales.....	48
1.4.2 Tipos y operaciones auxiliares	50
1.4.3 Tratamiento de errores	51
1.5 Estudio de casos	53
1.5.1 Especificación de algunos tipos de datos clásicos.....	54
1.5.2 Especificación de una tabla de símbolos	60
1.5.3 Especificación de un sistema de reservas de vuelos	63
1.6 Estructuración de especificaciones.....	66
1.6.1 Uso de especificaciones	66
1.6.2 Ocultación de símbolos.....	67
1.6.3 Renombramiento de símbolos.....	68
1.6.4 Parametrización e instanciación	69
1.6.5 Combinación de los mecanismos.....	75
1.7 Ejecución de especificaciones.....	76
1.7.1 La deducción ecuacional.....	77
1.7.2 La reescritura.....	78
Ejercicios	80

Capítulo 2 Implementación de tipos abstractos de datos

Presentación.....	89
2.1 El lenguaje de implementación	89
2.1.1 Representación de tipos.....	91
2.1.2 Sentencias.....	93
2.1.3 Funciones y acciones	95
2.1.4 Ejemplo: una implementación para los conjuntos.....	97
2.2 Corrección de una implementación	98
2.3 Estudio de la eficiencia de las implementaciones.....	108
2.3.1 Notaciones asintóticas	110
2.3.2 Órdenes de magnitud más habituales	114
2.3.3 Análisis asintótico de la eficiencia temporal	116
2.3.4 Análisis asintótico de la eficiencia espacial	119
2.3.5 Eficiencia y modularidad	122
Ejercicios	125

Capítulo 3 Secuencias

Presentación.....	129
3.1 Pilas.....	129
3.1.1 Especificación.....	131
3.1.2 Implementación	132
3.2 Colas.....	136
3.2.1 Especificación.....	136
3.2.2 Implementación	137
3.3 Listas	140
3.3.1 Especificación de las listas con punto de interés	140
3.3.2 Implementación de las listas con punto de interés	144
3.3.3 Implementación de estructuras de datos con punteros.....	149
3.3.4 Transparencia de la representación usando punteros	156
3.3.5 Algunas variantes en la implementación de listas.....	162
Ejercicios	166

Capítulo 4 Tablas

Presentación.....	171
4.1 Especificación	172
4.2 Implementación	174
4.2.1 Implementación por listas desordenadas.....	175
4.2.2 Implementación por listas ordenadas.....	175
4.2.3 Implementación por vectores de acceso directo.....	178
4.2.4 Implementación por tablas de dispersión.....	178

4.3	Funciones de dispersión.....	179
4.3.1	Funciones de traducción de cadenas a enteros.....	181
4.3.2	Funciones de restricción de un entero en un intervalo.....	182
4.3.3	Funciones de traducción de cadenas a enteros en un intervalo.....	184
4.3.4	Caracterización e implementación de las funciones de dispersión.....	185
4.4	Organizaciones de las tablas de dispersión.....	190
4.4.1	Tablas encadenadas.....	190
4.4.2	Tablas de direccionamiento abierto.....	197
4.4.3	Caracterización e implementación de los métodos de redispersión.....	205
4.4.4	Variantes de las tablas de direccionamiento abierto.....	207
4.4.5	Tablas coalescentes.....	208
4.4.6	Evaluación de las diferentes organizaciones.....	210
4.4.7	Elección de una organización de dispersión.....	212
4.5	Tablas recorribles.....	214
	Ejercicios.....	217

Capítulo 5 Árboles

Presentación.....	219	
5.1	Modelo y especificación	220
5.1.1	Modelo de árbol general.....	220
5.1.2	Modelo de árbol binario.....	225
5.1.3	Modelo de árbol con punto de interés.....	226
5.2	Implementación	228
5.2.1	Implementación de los árboles binarios	228
5.2.2	Implementación de los árboles generales	236
5.2.3	Variaciones en los otros modelos de árboles.....	239
5.2.4	Estudio de eficiencia espacial.....	239
5.3	Recorridos.....	242
5.3.1	Recorridos en profundidad de los árboles binarios.....	242
5.3.2	Árboles binarios enhebrados.....	247
5.3.3	Recorrido por niveles de los árboles binarios	251
5.4	Relaciones de equivalencia	253
5.4.1	Implementaciones lineales	257
5.4.2	Implementación arborescente	259
5.4.3	Compresión de caminos.....	265
5.5	Colas prioritarias.....	267
5.5.1	Implementación por árboles parcialmente ordenados y casi completos.....	269
5.5.2	Aplicación: un algoritmo de ordenación.....	273
5.6	Tablas ordenadas.....	277
5.6.1	Árboles binarios de búsqueda.....	278
5.6.2	Árboles AVL.....	284
Ejercicios		296

Capítulo 6 Relaciones binarias y grafos

Presentación.....	305
6.1 Relaciones binarias	306
6.2 Grafos	315
6.2.1 Modelo y especificación.....	317
6.2.2 Implementación.....	321
6.3 Recorridos de grafos.....	329
6.3.1 Recorrido en profundidad	330
6.3.2 Recorrido en anchura.....	332
6.3.3 Recorrido en ordenación topológica	333
6.4 Búsqueda de caminos mínimos	338
6.4.1 Camino más corto de un nodo al resto.....	339
6.4.2 Camino más corto entre todo par de nodos.....	345
6.5 Árboles de expansión minimales	348
6.5.1 Algoritmo de Prim	350
6.5.2 Algoritmo de Kruskal.....	353
Ejercicios	356

Capítulo 7 Uso y diseño de tipos abstractos de datos

Presentación.....	365
7.1 Uso de tipos abstractos de datos existentes	366
7.1.1 Un evaluador de expresiones.....	367
7.1.2 Un gestor de memoria dinámica	373
7.1.3 Un planificador de soluciones.....	380
7.2 Diseño de nuevos tipos abstractos de datos.....	388
7.2.1 Una tabla de símbolos.....	388
7.2.2 Una cola compartida.....	391
7.2.3 Una emisora de televisión.....	398
Ejercicios	407

Bibliografía.....	423
-------------------	-----

Índice temático.....	425
----------------------	-----

Índice de universos.....	429
--------------------------	-----

Presentación

Cuando me piden que escriba el prólogo de un libro, me da un poco de vergüenza, ya que se trata de una de mis asignaturas pendientes: he tenido hijos y he plantado árboles, y también he escrito muchas líneas, pero nunca un libro. Así que hacer de prologuista sin haber sido autor me provoca un cierto sentimiento de jubilación anticipada. En este caso, no obstante, este sentimiento se confunde con una fuerte sensación de orgullo y satisfacción, provocada por el excelente trabajo de alguien que, en parte, me permito considerar discípulo mío en el sentido ancestral de la palabra. Xavier Franch, autor de este libro, ha sido alumno mío durante sus estudios en la Facultat d'Informàtica de Barcelona, colaborador becario mientras era estudiante, después alumno de doctorado y compañero de departamento y, para terminar, siempre hemos trabajado juntos en proyectos de investigación y he dirigido su tesis doctoral. Tengo motivos, pues, para sentir esta satisfacción.

El texto en cuestión, además de actualizar el contenido de las materias ya clásicas de estructuras de datos, se adapta perfectamente al temario de una asignatura de los planes de estudio vigentes en la Facultat d'Informàtica de Barcelona, lo cual justificaría de por sí su existencia. Pero, además, por su actualización del tema puede servir, total o parcialmente, para otros estudios de informática o para cualquier asignatura sobre estructuras de datos de otros planes de estudios en la Universitat Politècnica de Catalunya o en otras universidades. Y, como valor añadido, es destacable la experiencia del autor en la docencia de la asignatura “Estructuras de Datos y Algoritmos”, de los nuevos planes estudio vigentes en la Facultat d'Informàtica de Barcelona.

La notación empleada tanto en las especificaciones como en las implementaciones de las estructuras de datos es Merlí, lenguaje emblemático del proyecto Excalibur y notación que, desde hace ya muchos años, ha caracterizado las diversas enseñanzas algorítmicas en nuestra facultad.

Por todo lo dicho es obvio que no soy nada imparcial a la hora de juzgar el trabajo del profesor Xavier Franch, pero también tengo claro que la parcialidad es una pequeña licencia que, en una presentación, nos podemos permitir.

Como ya he dicho, un excelente texto, que pone al día un tema clásico en informática. Mi enhorabuena al autor. Y también al lector, que encontrará una muestra de aquello que el profesor Turski decía hace muchos años: “no hay nada más práctico que una buena teoría”. Sobre todo si se explica desde un conocimiento sólido de la práctica.

Pere Botella i López

Catedrático del Departamento de Lenguajes y Sistemas Informáticos (U.P.C.)

Decano de la Facultat d'Informàtica de Barcelona (U.P.C.)

Bibliografía

- [ADJ78] J.A. Goguen, J.W. Thatcher, E.G. Wagner. "An Initial Algebra Approach to the Specification, Correctness and Implementation of Abstract Data Types". En Current Trends in Programming Methodology, Vol. IV, Prentice Hall, 1978.
- [AHU83] A.V. Aho, J.E. Hopcroft, J.D. Ullman. Data Structures and Algorithms. Addison-Wesley, 1983.
- [Bal93] J.L. Balcázar. Programación Metódica. McGraw-Hill, 1993.
- [BrB87] G. Brassard, P. Bratley. Algorithmique. Conception et Analyse. Ed. Masson, 1987. Existe una buena traducción al castellano (año 1990).
- [CLR90] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest. Introduction to Algorithms. The MIT Press, 1990.
- [EhM85] H. Ehrig, B. Mahr. Fundamentals of Algebraic Specification, Vol. 1. EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Springer-Verlag, 1985.
- [EhM90] H. Ehrig, B. Mahr. Fundamentals of Algebraic Specification, Vol. 2. EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, Springer-Verlag, 1990.
- [GoB91] G.H. Gonnet, R. Baeza-Yates. Handbook of Algorithms and Data Structures. Addison-Wesley, 2ª edición, 1991.
- [HoS94] E. Horowitz, S. Sahni. Fundamentals of Data Structures in Pascal. Computer Science Press, 4ª edición, 1994.
- [Knu68] D.E. Knuth. The Art of Computer Programming, Vol. 1. Addison-Wesley, 1968.
- [Knu73] D.E. Knuth. The Art of Computer Programming, Vol. 3. Addison-Wesley, 1973.
- [LiG86] B.H. Liskov, J.V. Guttag. Abstraction and Specification in Program Development. The MIT Press, 1986.
- [Mar86] J.J. Martin. Data Types and Data Structures. Prentice-Hall, 1986.
- [Meh84] K. Mehlhorn. Data Structures and Algorithms, vols. 1 y 2. Springer-Verlag, 1984.
- [Peñ93] R. Peña. Diseño de Programas. Prentice Hall, 1993.
- [Tar83] R.E. Tarjan. Data Structures and Network Algorithms. Regional Conference Series in Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, Pennsylvania, 1983.
- [TeA86] A.M. Tenenbaum, M.J. Augenstein. Data Structures using PASCAL. Prentice-Hall, 2ª edición, 1986.
- [vAP89] J.J. van Amstel, J.A.A.M. Poirters. The Design of Data Structures and Algorithms. Prentice Hall and Academic Service, 1989.
- [Wir86] N. Wirth. Algorithms and Data Structures. Prentice-Hall, 1986.

Índice temático

Abstracción	20, 23	Árbol (cont.)	
Acción	95	de expansión.....	348, 349
Adyacencia	319	general	220, 236
Álgebra		libre.....	349
cociente de términos.....	40	n-ario.....	220
inicial	40	ordenado	219
objeto matemático.....	25, 30	parcialmente ordenado.....	267
sobre una signatura.....	30	con punto de interés	220, 226
de términos	31	Arco	315
Algoritmo		Aridad	
de Brent.....	207	de un nodo o árbol.....	223
de Dijkstra.....	339	de una operación.....	28
de Floyd.....	345	Arista.....	v. arco
de Kruskal	353	Biblioteca de componentes	
de ordenación heapsort	273	24, 66, 108, 123, 186, 366, 388
de ordenación por inserción	121	Búsqueda	
de Prim.....	350	auto-organizativa.....	175
Altura de un árbol.....	222	de caminos mínimos.....	338
Apiñamiento.....	201, 202	dicotómica.....	176
Apuntador.....	98	por interpolación.....	177
Árbol		lineal.....	142, 176
2-3, B, B [*] , B ⁺	284	Cadena.....	v. secuencia
AVL.....	284	Camino	
binario.....	220, 225, 228	en un árbol	222
de búsqueda.....	278	de una clave (de dispersión)	198
completo, casi-completo.....	235	en un grafo	319
definición	219	mínimo	338, 345
enhebrado	247	Ciclo.....	320
equilibrado	284	Clave.....	171
etiquetado.....	220	invasora.....	197

Cola	
circular.....	139
compartida.....	391
prioritaria.....	267, 344
TAD.....	136
Colisión.....	179
Componente conexo.....	319
Compresión de caminos.....	265
Conexión en un grafo.....	319
Congruencia inducida.....	39, 50
Conjunto de base.....	31
Cubeta.....	178
Deducción ecuacional.....	77
Desbordamiento.....	193
Direccionamiento abierto.....	197
Diseño	
descendente.....	22
de estructuras de datos.....	388
modular (con TAD).....	22
Dispersión	
concepto.....	178
función.....	179
incremental.....	193
organizaciones.....	190
perfecta.....	180
valores de.....	178
Ecuación.....	34
condicional.....	48
impurificadora.....	46
Eficiencia.....	23, 108
Elemento	
distinguido.....	140
fantasma (centinela).....	148
Encadenamiento.....	144, 146
Enriquecimiento.....	66
Especificación	
algebraica (ecuacional).....	34
concepto.....	20
método de construcción.....	47
parametrizada.....	70
pre-post.....	97
Estructura de datos	
definición.....	25
funcional.....	171
lineal.....	129
Etiqueta.....	220, 315
Factor	
de carga.....	210
de equilibrio.....	285
Forma normal.....	78
Función	
de abstracción.....	100
de Ackerman.....	266
de acotamiento.....	93
de asignación.....	33
de dispersión.....	179
de evaluación.....	33
en Merlí.....	95
de redispersión.....	198, 202
TAD.....	171
universal.....	183
Género.....	27
Grafo	
dirigido.....	315
etiquetado.....	315
TAD.....	315
Hoja.....	222
Identificador.....	171
Implementación	
concepto.....	20
corrección.....	98
eficiencia.....	108
lenguaje de.....	89
universos de.....	89, 90
Índice.....	171
Instancia.....	70
parcial.....	73

Invariante de un bucle.....	93	símbolo de.....	28
Invariante de una representación.....	100	Parametrización.....	69
Invasor.....	v. clave invasora	Parámetro	
Isomorfía.....	32	de entrada y/o de salida.....	95
liberar_espacio.....	152	formal.....	69
Lista		real.....	70
de adyacencia.....	323	Pila	
auto-organizativa.....	175	de sitios libres.....	147
circular.....	163	TAD.....	129
doblemente encadenada.....	163	Postcondición.....	97
encadenada.....	146	Precondición.....	97
ordenada.....	164	Predecesores en un grafo.....	318
con punto de interés.....	140	Puntero.....	149
Matriz		Raíz.....	222
de adyacencia.....	321	Recorridos.....	242, 329
dispersa.....	309	en anchura (expansión).....	332
Memoria dinámica.....	149, 373	inorden.....	242, 245, 248
Método Robin Hood.....	208	por niveles.....	251
Modelo		ordenación topológica.....	333
de un TAD.....	25, 43	postorden.....	242, 245, 248
inicial.....	37	preorden.....	242, 244, 247
Modularidad.....	22, 122, 365	en profundidad.....	330
Módulo.....	23	Redispersión.....	198
Montículo.....	235, 273	Reescritura.....	78
Morfismo.....	32	Referencia colgada.....	155
Multilista.....	309	Relación	
de adyacencia.....	327	binaria (TAD).....	305
Nodo de un árbol.....	221	de equivalencia (TAD).....	253
Notaciones asintóticas		de igualdad.....	100
O grande.....	110	valorada.....	308
Ω grande.....	110	Renombramiento.....	68
Θ grande.....	112	Representación	
obtener_espacio.....	152	concepto.....	90, 91
Ocultación.....	67	encadenada.....	144, 146, 228
Operación		secuencial.....	144, 234
auxiliar.....	50	Representante canónico.....	41, 46
consultora.....	46	Reusabilidad.....	24
constructora generadora.....	46	Rotaciones.....	287
modificadora.....	46	Secuencia.....	56, 129
privada (oculta).....	47	Semántica de un TAD.....	43

Signatura	26	Tipo de datos	19, 25
Símbolo de operación.....	28	Tupla.....	91
Sinónimo	179	Universo	
Subárbol.....	223	de caracterización	70
Sucesores en un grafo.....	318	definición	26
Tabla		de especificación	26, 89
de dispersión.....	178	genérico (parametrizado).....	70
ordenada (TAD).....	216, 277	de implementación.....	89, 90
recorrible (TAD).....	214	Uso.....	45, 66
de símbolos.....	60, 388	Variable.....	29
TAD.....	171	Vector.....	91
Término	28	Vértice.....	315
Tipo Abstracto de Datos (TAD).....	19	Zona de excedentes	194

Índice de universos

ÁRBOL_BINARIO.....	227	ELEM_ESP.....	173
ÁRBOL_BINARIO_DE_BÚSQUEDA.....	282	ELEM_ESP_<_=_+.....	338
ÁRBOL_BINARIO_ENC_1_VECTOR.....	233	ELEM_ORDENADO.....	255
ÁRBOL_BINARIO_ENC_PUNTEROS.....	229	FUNCIONES_F.....	186
ÁRBOL_GENERAL.....	225	FUNCIONES_G.....	187
ÁRBOL_GENERAL_POR_BINARIO.....	240	LISTA_INTERÉS.....	143
BOOL.....	35	LISTA_INTERÉS_ENC.....	150, 160
CADENA.....	57	LISTA_INTERÉS_ENC_PUNT.....	154, 161
CJT_∈.....	71	LISTA_INTERÉS_SEC.....	144
CJT_∈_ACOTADO.....	73	MULTILISTA_TODO_CIRCULAR.....	311
CJT_RECORRIBLE.....	215	NAT.....	36
CLAVE_DISPERSIÓN.....	188	PAR.....	72
CLAVE_REDISPERSIÓN.....	200	PILA.....	131
CLAVE_REDISPERSIÓN_DOBLE.....	206	PILA_SEC.....	133
CLAVE_REDISPERSIÓN_LINEAL.....	205	REDISPERSIÓN_DOBLE.....	206
COLA.....	137	REDISPERSIÓN_LINEAL.....	205
COLA_CIRCULAR.....	139	REDISP_DOBLE_SUMA_POND_Y_DIV.....	206
COLA_PRIORITARIA.....	268	REDISP_LINEAL_SUMA_POND_Y_DIV.....	205
COLA_PRIORITARIA_POR_MONTICULO.....	272	RELACIÓN.....	307
COMPOSICIÓN_F_Y_G.....	188	RELACIÓN_DE_EQUIVALENCIA.....	256
CONJUNTO.....	174	RELACIÓN_DE_EQUIV_ARBORESCENTE.....	264
DIGRAFO_ETIQ.....	318	RELACIÓN_DE_EQUIVALENCIA_LINEAL.....	260
DIGRAFO_ETIQ_LISTAS.....	324	RELACIÓN_VALORADA.....	308
DIGRAFO_ETIQ_MATRIZ.....	322	SUMA_POND.....	187
DIGRAFO_ETIQ_MULTILISTAS.....	328	SUMA_POND_Y_DIV.....	189
DIVISIÓN.....	187	TABLA.....	173
ELEM.....	70	TABLA_ABIERTA.....	199
ELEM_=.....	71	TABLA_DIRECTA.....	195
ELEM_<.....	76	TABLA_IND_PUNTEROS.....	192
ELEM_<_=_.....	215	TABLA_ORDENADA.....	217
ELEM_2_ESP_=_.....	200	TABLA_ORDENADA_RECORRIBLE.....	215
ELEM_CJT.....	174	VAL_NAT.....	73
ELEM_DISP_CONV.....	186	VECTOR.....	134