

Índice

INTRODUCCIÓN	11
1. LA ESFERA CELESTE	15
1.1. Esfera celeste	15
1.1.1. Elementos a conocer	16
1.2. Trigonometría esférica	18
1.3. Fórmulas de Bessel	19
1.4. Ejercicios resueltos	20
2. SISTEMAS DE REFERENCIA ASTRONÓMICOS LOCALES	29
2.1. Sistema horizontal o altacimutal	29
2.1.1. Coordenadas horizontales o altacimutales	30
2.2. Sistema ecuatorial horario	32
2.2.1. Relación entre sistema de coordenadas altacimutal y ecuatorial horario	33
2.2.2. Coordenadas ecuatoriales horarias	34
2.3. Cambios de coordenadas	36
2.3.1. Por triángulos esféricos	36
2.3.2. Cambio de coordenadas horizontales a coordenadas horarias	40
2.3.3. Cambio de coordenadas horarias a coordenadas horizontales	48
2.3.4. Por matrices de rotación	65
3. SISTEMAS DE REFERENCIA ASTRONÓMICOS UNIVERSALES	67
3.1. Sistema de coordenadas ecuatoriales absolutas	67
3.2. Relación entre los sistemas de coordenadas horario y ecuatorial	68
3.3. Sistema de coordenadas eclípticas	72
3.3.1. Coordenadas eclípticas	73
3.4. Cambios de coordenadas entre ecuatoriales absolutas y eclípticas	74
3.4.1. Por triángulos esféricos	74
3.4.2. Por matrices de rotación	86
3.5. Cambio entre coordenadas	87
3.6. Variación de las coordenadas del Sol	90
3.6.1. Variación de coordenadas ecuatoriales	91
3.6.2. Variación de coordenadas eclípticas	91

4. MOVIMIENTO DIURNO	93
4.1. Culminaciones	93
4.2. Ortos y ocasos	95
4.3. Estrellas circumpolares	97
4.4. Pasos por el primer vertical	98
4.5. Máxima digresión	99
4.6. Movimiento diurno del Sol	100
4.7. Ejemplos	103
5. MOVIMIENTO PLANETARIO. UN POCO DE HISTORIA	115
5.1. Movimientos de los astros	115
5.2. ¿Por qué revisar teorías denostadas?	116
5.3. Primeros modelos geocéntricos: Grecia clásica	117
5.4. Heliocentrismo precopernicano	120
5.5. Periodo helenístico: modelos ptolemaicos	121
5.5.1. Epiciclos y deferentes	121
5.5.2. Epiciclos menores	123
5.5.3. Modelo de Ptolomeo	125
5.6. Orden de las esferas	127
5.7. Copérnico	128
5.7.1. Contexto y antecedentes	128
5.7.2. La obra de Copérnico	128
5.7.3. Ventajas del nuevo sistema	130
5.7.4. Problemas del sistema	132
5.8. Sistema tychónico. Un paso atrás ¿o hacia delante?	135
6. MOVIMIENTO PLANETARIO. LEYES DE KEPLER	141
6.1. ¿Y qué pasa en realidad? Leyes de Kepler	141
6.2. Primera ley de Kepler	141
6.2.1. Ecuación de la elipse en coordenadas polares	143
6.3. Segunda ley de Kepler o ley de las áreas	145
6.4. Tercera ley de Kepler	148
6.5. Anomalías	150
6.5.1. Anomalía verdadera	150
6.5.2. Anomalía excéntrica	150
6.5.3. Anomalía media	152
6.5.4. Relación entre anomalías: la ecuación de Kepler	152
6.5.5. Relación entre anomalías: la ecuación del centro	155
6.6. Ejemplos	157

7. SISTEMAS DE TIEMPO	161
7.1. Escalas astronómicas	161
7.2. Escalas rotacionales	161
7.2.1. Tiempo sidéreo	162
7.2.2. Tiempo sidéreo medio	164
7.2.3. Tiempo solar verdadero	165
7.2.4. Tiempo solar medio	167
7.3. Tiempo de efemérides	174
7.4. Tiempo atómico	175
7.5. Tiempo universal coordinado	176
7.6. Ejemplos	178
8. EJERCICIOS PROPUESTOS Y TEST DE AUTOEVALUACIÓN	189
8.1. Ejercicios propuestos sobre coordenadas astronómicas	189
8.2. Ejercicios propuestos sobre movimiento diurno	195
8.3. Ejercicios propuestos sobre movimiento planetario y leyes de Kepler	207
8.4. Ejercicios propuestos sobre sistemas de tiempo	211
8.5. Test de autoevaluación	219
APÉNDICE	225
BIBLIOGRAFÍA	227

Introducción

Esta obra está pensada como libro de consulta a nivel de Grado, principalmente enfocada a los primeros cursos, para los que pretende ser accesible, con un lenguaje y grado de dificultad adaptado a su nivel. Así, recoge la respuesta a las dudas y a los errores en que incurren más frecuentemente los estudiantes, según la experiencia en las aulas.

La implantación de los planes de estudio en el marco del Espacio Europeo de Educación Superior, exige un nuevo paradigma de enseñanza enfocada en “saber hacer”. Los estudiantes de Grado provienen de Bachillerato, donde, en la asignatura de Matemáticas, está pensado un mayor desarrollo de la abstracción, pero que, *de facto*, en la mayoría de los casos se utiliza un aprendizaje muchas veces algorítmico, y donde la Geometría ha ido perdiendo peso. Por ello, los estudiantes, al llegar al Grado, se enfrentan con dificultades en la interpretación de los textos teóricos de trigonometría esférica, que en ocasiones interpretan como una colección de fórmulas a las que recurrir en ejercicios más o menos rutinarios.

Por supuesto, los textos teóricos de astronomía clásica siguen estando vigentes, y, de hecho, constituyen buena parte de la bibliografía de esta obra. Sin embargo, si bien aportan una valiosa recopilación de fórmulas de aplicación, el estudiante corre el riesgo de, por inercia, asentar su conocimiento de nuevo de una forma algorítmica de aplicación de las mismas. Por eso, en este libro se presenta una colección muy sucinta de formulación con la que poder resolver todos los ejercicios propuestos, para facilitar la adquisición de soltura y destreza en el manejo de esos rudimentos de trigonometría esférica, incidiendo más en la resolución de problemas, e incluso, en el planteamiento de otros para obtener generalidad (como por ejemplo, el desarrollo de generalidad en el capítulo 2,...).

Cabe destacar que este método no incide negativamente en el conocimiento. Si el alumno consigue manejar de verdad lo aprendido, comprendiendo en profundidad cada uno de los pasos que sigue, podrá fácilmente incorporar por sí mismo formulación más amplia al respecto, y lo podrá hacer habiendo adquirido una serie de competencias que se han desarrollado con ayuda de la colección de ejemplos y ejercicios, todos ellos resueltos, frente a lo que se consigue con un libro que incide solo en la parte teórica.

Este es un punto que conviene destacar: no es un libro de problemas y ejercicios resueltos, sino un libro que desarrolla la teoría apoyándose en ejemplos y ejercicios, al considerar estos un mejor instrumento para la adquisición por parte de los estudiantes, de las competencias planteadas en los Grados a los que está dirigido.

Una novedad que aporta la obra frente a la bibliografía al respecto, es la inclusión de programas informáticos para la resolución de los problemas propuestos. Uno de los motivos es que los planes de estudio para los que está pensada, recogen en mayor o menor medida, la programación como una de sus competencias. El otro motivo tiene un carácter más didáctico, ya que programar un método permite al estudiante profundizar en la casuística de un problema para buscar la generalización de la solución del mismo, adaptándose a todos los casos posibles y de un modo muy eficaz.

Los códigos incluidos en la obra están escritos en MATLAB. La elección de este lenguaje se debe a su gran difusión en las facultades de Matemáticas y Física, así como en Escuelas de Ingeniería, por lo que los estudiantes están familiarizados con él. En cualquier caso, los programas incluidos se han escrito sin usar librerías específicas de MATLAB, por lo que el código es exportable sin ninguna modificación a un lenguaje abierto como el Octave, de uso gratuito. Además, incluyen un buen número de comentarios para que su estructura sea fácilmente comprensible para el lector.

La estructura de este libro se inicia siguiendo el patrón de las obras de su género. En el primer capítulo se presenta la esfera celeste, introducción a la figura que servirá de base para dotar de coordenadas en astronomía matemática. Se presenta en él una breve introducción a la trigonometría esférica. Los ejercicios que aparecen se han elegido de forma que sean útiles para el desarrollo de los dos capítulos posteriores.

Prosigue con dos capítulos dedicados a los sistemas de coordenadas y a movimiento diurno. Los cambios entre unos y otros tipos de coordenadas, se describen a partir de ejercicios resueltos, utilizando trigonometría esférica, con la intención de desarrollar habilidad en tal materia, necesaria para continuar estudios de astronomía. Por último, también se presenta la metodología de cambios entre sistemas con matrices de rotación.

A partir de aquí, los libros clásicos de astronomía matemática prosiguen con temas como la paralaje (que se describe en el capítulo 5 brevemente), la precesión y la nutación (en capítulo 7) o el movimiento propio. La presencia de estos temas en los actuales planes de estudio de matemáticas y de ingenierías se ha reducido drásticamente, cuando no desaparecido, por lo que la obra

continúa con dos temas: introducción al movimiento orbital y sistemas de tiempo, que sí se desarrollan en los actuales Grados, aunque de forma introductoria, de modo que se siga un mismo nivel de dificultad que de coherencia al texto.

En el capítulo 5, dedicado al movimiento planetario, se revisan los modelos cosmológicos occidentales desde la antigüedad hasta Thyco Brahe, presentados no solo de forma descriptiva sino matemáticamente, lo que constituye un ejercicio de abstracción geométrica para resolver un mismo problema desde distintos puntos de vista.

A continuación, en el capítulo 6, se exponen las leyes de Kepler y una introducción a los conceptos utilizados para posicionamientos en órbitas y dinámica espacial. Se desarrolla a partir de dichas leyes y de las distintas anomalías que se utilizan para situar un objeto en su órbita, la relación matemática entre ellas: ecuación de Kepler y ecuación del centro.

En el capítulo 7, “Sistemas de tiempo”, se presentan las escalas de tiempo astronómicas y de tiempo atómico, así como la relación entre ellas, para poder aplicar tanto en problemas del tipo posicionamiento en órbitas, iniciado en el capítulo previo, como en sistemas de posicionamiento global (GPS...).

Este libro concluye con un capítulo dedicado a ejemplos y autoevaluación. Pese a que en cada capítulo se incluyen varios ejercicios resueltos, se presenta este repaso general que incluye problemas de los temas abarcados y test de autoevaluación sobre los conceptos teóricos. La presencia de este recopilatorio final permite transgredir los límites de los conceptos enunciados en cada tema para interrelacionarlos, tal y como ocurre en los problemas reales.