

# Òrbites i sistemes de referència

Antoni Parra i Silvestre

Programa d'Informàtica Educativa, 1988.

## 1 ESPECIFICACIONS GENERALS

- 1.1 Temàtica
- 1.2 Assignatures
- 1.3 Nivell escolar

## 2 INSTRUCCIONS DE FUNCIONAMENT

- 2.1 Unitats
- 2.2 Precisió
- 2.3 Colors
- 2.4 Modalitats de representació gràfica
- 2.5 Sistemes de projecció
- 2.6 Relleu (F4 S)
- 2.7 Escala i zoom
- 2.8 Diàlegs i edició
- 2.9 Controls interactius
- 2.10 Altres controls

## 3 ASPECTES PEDAGÒGICS

- 3.1 Objectius
- 3.2 Coneixements previs
- 3.3 Implementació didàctica
- 3.4 Exemples d'utilització
- 3.5 Exercicis
- 3.6 Recursos complementaris

## 1 ESPECIFICACIONS GENERALS

### 1.1 Temàtica

SISREF permet visualitzar els moviments d'un conjunt de fins a 9 cossos a l'espai tridimensional.

La projecció bidimensional, a la pantalla de l'ordinador, implica en principi una pèrdua d'informació espacial. Aquesta dificultat es supera canviant el punt de vista, que equival a fer girar el sistema, o bé amb un parell estereoscòpic, observant amb cada ull una imatge diferent. tot això és possible amb aquest programa.

Una altra dificultat relacionada amb els moviments de planetes o estels és la complexitat de les seves trajectòries observades desde un cos en moviment, la Terra, per exemple. La comprensió de les lleis de la mecànica celest ha anat lligada històricament al fet de triar un sistema de referència adient: el Sol. Com la major part de la massa del Sistema Solar pertany a aquest estel, el centre de masses mai queda massa lluny d'ell, i les òrbites del demás cossos són pràcticament el·lipses amb el Sol a un dels focus.

Desde el Sol és fàcil comprendre els moviments dels planetes, i desde els planetes és fàcil comprendre el moviment del Sol, però no els dels altres planetes, que presenten epicles i retrogradacions.

Aquest programa permet observar simultàniament els mateixos moviments respecte a dos sistemes de referència diferents. Es presenten dues finestres. La de la esquerra mostra el que veuria un observador que anés seguint els moviments del centre de masses, i la de la dreta, bé un dels cossos o bé un sistema fix de coordenades.

No es pretén fer una representació acurada de cap sistema concret, sinó proporcionar un model aproximat de qualsevol sistema de menys de 10 cossos, estels

en principi, que es pugui definir amb coordenades i masses. L'exemple SAT, de tres estels, és comparable al sistema Sol-Terra-Lluna, però a una escala que el fa adient per a ser representat a un PC. STL és un model real, a escala, del mateix: la Lluna queda tan a prop de la Terra que no es distingeixen sinó fent un 'zoom' molt fort. Les posicions es calculen i dibuixen cada dia: aixó fa que sigui més lent que SAT. SOLAR és un model del Sistema Solar, amb el Sol, la Terra, la Lluna i sis planetes més. És molt interessant, però lentíssim.

A més d'un simulador interactiu de petits sistemes gravitatoris, d'interès per a l'ensenyament de la Astronomia, és també una eina adient per a il·lustrar temes d'Història de la Ciència, car es poden representar a la vegada un sistema heliocèntric i un altre geocèntric, per exemple.

Constitueix, doncs, una eina de múltiples utilitats, un programa obert i adaptable, més que un típic programa d'EAO.

## 1.2 Assinatures

Les matèries del currículum en què pot inserir-se més directament són les següents:

- EATP d'Astronomia: mecànica celeste.
- Física de COU: forces centrals.
- Història de la Filosofia de COU: concepcions cosmològiques.

## 1.3 Nivell escolar

El nivell acadèmic dels alumnes als quals s'adreça la unitat didàctica és de tercer de BUP a COU.

# 2 INSTRUCCIONS DE FUNCIONAMENT

## 2.1 Unitats

Internament, el programa té les següents unitats:

- massa: solar
- temps: any
- distància: unitat astronòmica (UA)

que són les que es prenen per defecte. Si es vol, es poden especificar d'altres, amb les abreviatures:

- distància: parsec (pa)  
any llum (al)  
unitat astronòmica (UA)  
kilòmetre (Km)
- temps: segle (se)  
any (a)  
dia (d)

	segón	(s)
· massa:	solar	(so)
	terrestre	(te)
	tonelada	(Tm)
	kilogram	(Kg)
· velocitat:	parsec/segle	(pa/se)
	etc.	

que es poden consultar amb les tecles de funció F4-F9.

Les equivalències són

1 UA=1.58013E-5 al	1 UA=4.84407E-6 pa	1 UA=149.6E6 Km
1 a= 1E-2 se	1 a= 365.26 d	1 a= 315584641 se
1 so=332958 te	1 so=1.9815E27 Tm	1 so=1.98915E30 Kg

## 2.2 Precisió

La precisió de càlcul va lligada a l'interval de temps entre posicions successives d'un cos. Quant més curt sigui aquest interval, més gran sera la precisió.

Cada cop que es prem la tecla + es redueix a la meitat l'interval i amb - es multiplica per 2. Si es vol donar un interval determinat -1 dia, per exemple- caldra activar el diàleg corresponent amb la tecla T. Com la unitat de temps és l'any, podem escriure 0.00273785 o 2.73785e-3, que és 1 dia expressat en anys, però també podem escriure 1 d, on la d indica dies.

Sistemes molt massius necessiten més precisió que els sistemes de menys energia. El mateix passa amb cossos que s'aproximen molt -quan les òrbites són molt excèntriques, per exemple-. Grans aproximacions o grans masses equival a dir grans velocitats, i això implica una necessitat de major precisió.

## 2.3 Colors

Es poden emprar dos tipus de gràfics de color:

- baixa resol·lució (negre i 15 colors més)
- resol·lució mitja (negre i 3 colors més).

El color que es dona a un cos per a indentificar-lo es pot especificar pe'l seu nom o per el nombre. Les equivalències són les següentes:

	baixa	mitja
0	negre	negre
1	blau	vermell
2	verd	groc
3	blau cel	verd
4	vermell	vermell
5	rosa	groc

7	ocre	verd
8	gris clar	vermell
9	blau brillant	groc
10	verd brillant	verd
11	blau cel brillant	vermell
12	vermell brillant	groc
13	rosa brillant	verd
14	groc	vermell
15	blanc	groc
16	negre	verd
17	blau	vermell

...

i es poden consultar amb les tecles de funció F4-F8.

## 2.4 Modalitats de representació gràfica

(en parèntesi: forma d'accés després de demanar controls amb F4)

- amb resol·lució mitja (F2 M)
  - \* dues finestres gràfiques, la de la esquerra relativa al centre de masses (F5 2)
    - amb un menú de funcions (F3 A)
    - amb indicadors de posició i velocitat (F3 P)
  - \* una finestra, a pantalla completa: 320x200 pixels (F5 1)
- amb baixa resol·lució (F2 B)
  - \* una finestra, a pantalla completa: 160x100 pixels

## 2.5 Sistemes de projecció

- projecció 'plana', per eliminació d'una de les tres coordenades. Es suposa a l'observador alineat amb un dels eixos, a gran distància:

- \* segons eix x (F1 X): y és horitzontal i z vertical
- \* segons eix y (F1 Y): z és horitzontal i x vertical
- \* segons eix z (F1 Z): x és horitzontal i y vertical  
(aquest és el sistema normal)

- projecció cónica, segons una visual a determinar per rotació d'un triedre de referència:

- \* desde el menú de controls (F1 M)
- \* interactivament, desde la representació gràfica, amb les tecles x, y, z.

Un cop apareix el triedre (color 1= eix x, color 2= eix y, color 3= eix z) es fa girar a la dreta (cargolant) amb o amb i a la esquerra (descargolant) amb o . Per a triar l'eix de rotació es prem x, y o z. Per a fixar la rotació desitjada del sistema respecte a la visual es prem ↵. Llavors apareix un avís aconsellant què es sorti a gràfics

abans de tornar a canviar la visual.

## 2.6 Relleu (F4 S)

Permet determinar les distàncies de la pantalla i l'observador a l'origen de coordenades fixe, en unitats astronòmiques. Els valors inicials són 4000 i 4020.

Amb dues finestres activades i resolució mitja, aquesta modalitat de representació ofereix un parell estereoscòpic separat aproximadament la meitat de l'amplada de la pantalla. Amb poca llum ambient, ulleres de vista cansada (+1 diòptria) i un tabic vertical entre els ulls es més fàcil aconseguir que cada un d'ells miri a la imatge corresponent, a fi d'obtenir la visió en relleu. Amb 4 miralls es pot fer un aparell que faciliti aixó.

## 2.7 Escala i zoom

Si les òrbites fossin tan amples que es surtissin de la pantalla, o tan petites que no es veiessin bé, podriem allunyar-les o acostar-les amb el zoom de la següenta manera:

Es prem repetidament < o > fins que ens agradi el camp enmarcat per el visor. Aquest visor consta de dos quadrilàters concèntrics. El més extern indica el camp agafat per el telescopi. El més intern serveix de referència en el cas de que l'altre surti del camp visual quan es vol ampliar a fi de reduir el tamany aparent de les òrbites.

Per canvis d'escala grans és millor fer servir el menú de controls (F4 F6).

La escala medeix el nombre de pixels per unitat astronòmica. Una escala de 0.5, per exemple, equival a 2 UA per pixel.

## 2.8 Diàlegs i edició

Amb el teclat es controla l'estat del programa i els valors de les variables (diàlegs en finestres de fons verd). Si es vol realitzar qualsevol acció potencialment perillosa apareix una finestra d'avertiment (amb fons vermell). Els textos d'ajuda apareixen amb fons blau.

L'editor s'activa amb la funció F5, o bé quan es pretén carregar de disc un arxiu inexistent. Presenta el nom, la posició (x, y, z), velocitat (x, y, z), massa i color d'un cos. Per passar al següent o a l'anterior s'empren les tecles pàgina endavant (PgDn) o enrera (PgUp). F3 permet passar a qualsevol cos, pel seu nombre o per el nom. F1 fa apareixer unes finestres d'ajuda, amb una breu explicació de la utilitat de les demés funcions. F2 fa que es torni a la representació gràfica, però amb els valors de les variables modificats segons desitjem.

Amb el menú de controls (F4) es pot canviar la forma de presentació dels valors numerics (F7), bé en notació científica (exponencial) o en forma decimal. El nombre de decimals es determina amb una màscara (picture) que especifiqui quants dígets es volen i la posició del punt -o coma- decimal. Exemples de màscares:

abcdef    equival a ##### i indica 6 dígets sense decimals

xx,dddddd equival a ##.##### (7 digits, dels que 4 són dec.)

Cal advertir que un nombre reduït de digits pot fer que es perguin xifres significatives, car l'Editor actualitza els valors de les variables a partir del que hi ha escrit a la pantalla.

La edició es controla de la forma acostumada, amb les tecles de control del cursor, d'esborrat i canvi de línia. No hi ha cap diferència desde el punt de vista del programa entre majúscules i minúscules.

Els espais en blanc fan que s'ignori el que hi ha a la dreta dels mateixos, excepte quan es tracta d'unitats abreujades. Per exemple: 1,5720 Km 3200 equival a 1.572 Km.

Possar a 0 la massa d'un cos equival a eliminar-lo. F5 posar a 0 tots els valors del cos actual. F6 torna als valors inicials. F7 permet recuperar un arxiu de disc. F8 permet enregistrar els valors actuals a disc. F9 anulla les modificacions efectuades amb l'Editor i torna a la representació gràfica on es va deixar. F10 atura el programa (Control-Break i Esc fan el mateix).

No cal que els nombres dels cossos siguin consecutius, es a dir: si es vol representar un sistema de dos cossos, no cal que tinguin els nombres 1 i 2.

## 2.9 Controls interactius

Les tecles de funció permeten:

- F1: Presentar textos d'ajuda.
- F2: Aturar el cossos (fins que es torni a fer F2).
- F3: Representar dins de les finestres gràfiques tots els cossos replegant l'espai modularment (pantalla toroidal, com la del LOGO), o bé emprar finestres normals, que només mostren el que es veuria a través seu (clipping).
- F4: Presentar el menú de controls.
- F5: Editar.
- F6: Tornar al principi.
- F7: Recuperar de disc un arxiu.
- F8: Enregistrar el sistema actual a disc.
- F9: Esborrar les finestres gràfiques.
- F10: Sortir del programa.

## 2.10 Altres controls

El menú de controls presenta les opcions actuals i es controla principalment amb les tecles de funció, que permeten canviar:

- F1: Punt de vista.
  - F2: Resolució gràfica.
  - F3: Presentació dels indicadors de posició i velocitat.
  - F4: Representació tridimensional.
  - F5: Nombre de finestres gràfiques.
  - F6: Escala.
  - F7: Format d'escriptura.
- Les funcions F8 (colors) i F9 (unitats) tenen tan sols finalitat informativa.

T, +, - : Permeten ajustar la precisió de càlcul.  
Els dígit (0..9): Permeten triar el cos de referència.  
C : Pren com origen de coordenades el cos de referència.

### 3 ASPECTES PEDAGÒGICS

#### 3.1 Objectius

1. Motivar a l'alumne introduint-lo a temes astronòmics i gnoseològics.
2. Proporcionar una noció intuïtiva de les lleis de gravitació i de Kepler.
3. Visualitzar les trajectòries dels astres relatives a diferents sistemes de referència.
4. Il·lustrar els models heliocèntric i geocèntric.
5. Familiaritzar a l'usuari amb coordenades tridimensionals i amb la descomposició de la velocitat segons els tres eixos.

#### 3.2 Coneixements previs

Els coneixements previs que cal tenir per al seu ús són els següents:

- Concepte de coordenades tridimensionals.
- Llei de Newton.
- Descomposició de la velocitat segons els eixos.

I no cal tenir més habilitats prèvies que una certa familiaritat amb l'ordinador (funcions, cursor, etc.)

#### 3.3 Implementació didàctica

El programa SISREF pot ser utilitzat amb arxius previament elaborats a fi d'il·lustrar una explicació tècnica, teòrica o històrica, o bé d'una forma més creativa i interactiva.

Es poden plantejar jocs, per exemple: col·locar en òrbita lunar una nau. Fora més exacte dir: donat un sistema de dos cossos, afegir un tercer de més petit a les proximitats del més massiu, i amb l'impuls suficient. Un cop assolit aquest objectiu es repeteix el joc canviant la massa del cos gran. Queda clar que així n'estem fent una introducció altament motivant al concepte de velocitat d'escapament.

Però no és gens fàcil construir sistemes estables, i menys quan la tècnica emprada per fer-ho és d'assaig i error. Per aixó cal que abans d'abordar problemes massa difícils, com pot ser el d'una òrbita de transferència, o com el plantejat, es treballin tasques més senzilles, com la de obtenir un sistema de dos estels.

Al principi del programa, apareix com exemple un sistema binari. La finestra de la esquerra mostra les òrbites respecte al centre de masses i la de la dreta respecte al cos 1, que apareix centrat i estàtic. El professor pot aprofitar aquest exemple per a introduir als alumnes gradualment l'ús de les tecles de funció o per fer una explicació teòrica més o menys llarga, segons les seves intencions i el nivell de l'auditori. Pot explicar les lleis de Kepler, la llei de la gravitació universal o el que li sembli adient. Caldria que parlés una mica de que treballen amb un model, i un model no massa acurat, car no és gens fàcil trobar l'equilibri entre precisió de càlcul i rapidesa de simulació. Les òrbites del cossos haurien de ésser el·líptiques i estables, i si no ho són a la pantalla és degut a petits errors de càlcul que es van acumulant.

És possible obtenir més precisió (+), però aixó fa que es ralentitzin considerablement els moviments. També és possible accelerar-los (-), però aixó fa que els errors siguin més grans, fins al punt de trencar l'equilibri i llençar els cossos a velocitats i distàncies incontrolables.

Es pot passar com paràmetre el nom de un fitxer al activar el programa. Si introduïm, per exemple: sisref tres ↵ el sistema TRES apareixerà al principi en lloc de l'exemple habitual. Si passem com paràmetre el nom d'un fitxer inexistent, el crearem de nou.

### 3.4 Exemples d'utilització

Es proporcionen exemples senzills de sistemes de 2 a 4 estels i un model a escala del sistema solar, però és millor que els alumnes facin creacions pròpies, i no es limitin a contemplar el treball d'altres.

Comentem a continuació alguns dels exemples proporcionats:

EXAMPLE: un cop ja s'hagi fet la o les sessions introductòries, és el moment per a introduir l'ús del editor. L'arxiu EXAMPLE, que es carrega automàticament cada vegada que s'engega el programa, és idoni per aquest fi. Es tracta d'un sistema binari de masses iguals i velocitats simètriques.

DOBLE: aquest sistema és comparable al d'un planeta girant al voltant d'una binaria. Pot servir per a explicar epicicles i retrogradacions.

123: sistema de 2 estels que intercanvien un tercer cada cop que s'aproximen.

TRES: un dels casos m'és coneguts de sistemes ternaris estables. Un dels estels oscilla amb moviment rectilini, passant per el centre de masses dels altres dos.

SAT: és comparable a un sistema Sol-Terra-Lluna (no a escala!).

STL: model a escala del sistema Sol-Terra-Lluna.

PLANETES: comparable a un estel envoltat de planetes. Aixó pot constituir un model rudimentari de sistema planetari, força adient per a l'estudi de les idees precopernicanes.

SOLAR: model a escala del Sistema Solar. Inclou el Sol, la Lluna i de Mercuri fins a Urà.

JUPITER: model a escala de Júpiter i els 4 satèl·lits galileans.

QUADRAT: sistema quadrangular rotatori i pulsant.

CUB: sistema cúbic, de 8 cossos pràcticament estàtics. S'els pot donar moviment i/o augmentar les masses de forma que constitueixin un sistema pulsant estable, similar a QUADRAT?

APOLO: mostra una òrbita de transferència.

### 3.5 Exercicis

El més senzill, i força formatiu, podria consistir en modificar l'exemple inicial. Es pot fer un estudi experimental variant sistemàticament un dels paràmetres -una massa, o les dues, la distància, el mòdul de les velocitats- a fi d'aclarar com influeix



cada un d'ells. El mètode a seguir pot ser

- \* entrar a l'Editor (F5)
- \* tornar al principi (F6)
- \* modificar un paràmetre
- \* enregistrar (F8), amb un nom diferent cada vegada
- \* provar-ho (F2) i pendre notes dels resultats
- \* repetir el procés

S'ha de procurar que la precisió sigui tal que dongui òrbites el·liptiques que no precessin.

També es pot intentar variar dos paràmetres de forma que es compensin. Per exemple: minvar les masses i les velocitats, o bé les distàncies i les masses, o bé les distàncies augmentant les velocitats.

Un cop siguem capaços de crear un sistema binari estable donada una distància entre els dos cossos i les seves masses es pot plantejar l'introducció d'un tercer cos:

- a: que orbiti lluny dels altres dos (com a DOBLE)
- b: que orbiti a prop d'un d'ells (com a 123)

Més endavant es pot intentar crear un model a escala del sistema solar, com a l'exemple SOLAR, prenent les dades d'unes taules i fent les conversions d'unitats que calgui.

Altres exercicis interessants que es podrien proposar són els següents:

1. Afegir cossos d'un en un en òrbites de radis diferents, com a l'exemple PLANETES. Cal que el primer que es colloqui tingui la major part de la massa total del sistema.
2. Afegir un cos que tingui una òrbita excèntrica, com si fos un cometa.
3. Canviar a SOLAR la velocitat de la Lluna a fi de que entri en una òrbita de transferència cap a Mars (com a APOLO).
4. Trobar la distància (horitzó) a la que la velocitat d'escapada d'una massa gran (forat negre) hagi de superar 63285.69 UA/any (la de la llum).

### **3.6 Recursos complementaris**

Aquest programa no pretén substituir cap altra forma didàctica de les s'acostuma a emprar en relació als objectius didàctics plantejats. Planetari, pissarra, diapositives, problemes, etc., poden combinar-s'hi amb l'ús del programa per a millorar-ne l'aprofitament del mateix.

Per a moltes persones és pràcticament impossible captar el relleu sense un visor estereoscòpic de miralls. Un de molt rudimentari el podem construir nosaltres mateixos amb dos tubs de cartró i un parell de lupes de 1 diòptria.