

---

JORNADA DE PRESENTACIÓ DE RESULTATS DELS PROJECTES DE MILLORA DE LA DOCÈNCIA  
2008

## **EINES DIDÀCTIQUES MULTIMÈDIA PER A LA CAPACITACIÓ EN L'ÚS DE PROGRAMARIS DE SIMULACIÓ DE MECANISMES**

*Joan Puig, Lluïsa Jordi, Salvador Cardona, Daniel Clos*

**Departament d'Enginyeria Mecànica. ETSEIB. Diagonal, 647. Pavelló D  
08028 Barcelona**

joan.puig@upc.edu, lluisa.jordi@upc.edu, salvador.cardona@upc.edu,  
daniel.clos@upc.edu

Tipus d'ajut rebut: UPC\_2003\_2004

### **Resum**

La simulació i l'anàlisi de mecanismes és una eina molt important en el camp de l'enginyeria, especialment per al disseny mecànic. En el mercat, existeixen molts programes de simulació de mecanismes però generalment estan dirigits a la simulació a l'espai i presenten gran quantitat de possibilitats, amb la complexitat de funcionament que això comporta, la qual cosa fa que siguin de difícil aprenentatge amb la durada temporal d'una assignatura de grau.

Aquest ajut ha permès introduir millores a un programari didàctic de simulació de mecanismes elaborat per membres del Departament d'Enginyeria Mecànica (PAM-Programa d'Anàlisi de Mecanismes). La versió definitiva del programari ha permès disposar d'una eina de suport a la docència de diverses assignatures de l'ETSEIB relacionades amb les màquines. Conjuntament amb aquest programari s'ha desenvolupat un curs interactiu que serveix per introduir l'alumnat en la simulació de mecanismes.

El PAM ha estat emprat principalment en l'assignatura troncal Teoria de Màquines, però també en altres assignatures i projectes final de carrera. A més, es té constància del seu ús en d'altres universitats. Pel que fa al curs interactiu, s'ha emprat amb èxit en les pràctiques de Teoria de Màquines. El material és disponible via web a [http://www.em.upc.edu/docencia/estudis\\_grau/etseib/teoria\\_maquines](http://www.em.upc.edu/docencia/estudis_grau/etseib/teoria_maquines).

### **Paraules clau**

Autoaprenentatge, Simulació, Mecanismes

## EL PROJECTE

### 1. Introducció

La simulació de mecanismes és una eina molt important en el camp de l'enginyeria, especialment per al disseny mecànic ja que permet analitzar el comportament dels mecanismes sense necessitat d'haver-los de construir. En el mercat, existeixen molts programes de simulació de mecanismes però generalment estan dirigits a la simulació a l'espai i presenten gran quantitat de possibilitats, amb la complexitat de funcionament que això comporta. Els pocs programes de simulació de mecanismes existents de poca complexitat busquen més l'espectacularitat que no pas el rigor científic i tècnic i, per tant, el seu ús en assignatures d'una carrera universitària no és adequat.

A partir de l'experiència docent del grup de professors de l'assignatura troncal Teoria de Màquines de l'ETSEIB i fruit de diverses reflexions, es va detectar la necessitat de disposar de programari docent específic per a la simulació de mecanismes que es pogués aprendre a utilitzar en la durada temporal d'una assignatura de grau. Aquesta necessitat es va revelar general a diverses assignatures relacionades amb les màquines a les escoles on el departament hi imparteix docència (ETSEIAT, EUETIT, EUPM, EPSEVG, EUTEIB). Aquest programari hauria de servir per analitzar la cinemàtica i la dinàmica dels mecanismes, així com a introducció a l'utilització de grans paquets comercials de programari de simulació de mecanismes.

A partir d'una primera versió d'un programari didàctic de simulació de mecanismes (PAM-Programa d'Anàlisi de Mecanismes) elaborat anteriorment a la concessió d'aquest ajut per un grup de professors del Departament d'Enginyeria Mecànica, es va plantejar la necessitat d'incorporar-hi millores i aspectes que no havien estat considerats en la versió original. L'ajut concedit per part de la UPC va permetre elaborar una nova versió del programari que és una important eina de suport a la docència de diverses assignatures de l'ETSEIB relacionades amb les màquines. Conjuntament amb aquest programari es va desenvolupar una aplicació interactiva que serveix per introduir l'alumnat en la seva utilització, així com donar una primera visió de les possibilitats de la simulació de mecanismes.

Per tant, aquest projecte de millora de la docència es plantejava a partir dels objectius següents:

- Fomentar l'ús de la simulació de mecanismes en les assignatures de la titulació d'Enginyer Industrial relacionades amb les màquines, tant en els estudiants com en el professorat.
- Dotar d'una eina multimèdia als estudiants que permeti la millora del seu rendiment acadèmic en base a l'autoaprenentatge, el treball en equip i el seu esperit emprenedor.

- Plantejar l'anàlisi i el disseny de mecanismes mitjançant ordinador com a eina de treball habitual en el món professional.
- Millorar el programari PAM per a la seva adequació i utilització en diverses assignatures de la titulació d'Enginyer Industrial relacionades amb les màquines.
- Utilitzar les noves tecnologies en la docència.
- Donar un caire més experimental a diverses assignatures amb la síntesi del què s'ha après mitjançant l'elaboració d'un projecte final d'assignatura.
- Crear un curs d'autoaprenentatge en format multimèdia dels programaris de simulació de mecanismes.

## 2. Descripció

La implementació del programa de simulació PAM s'ha desenvolupat en llenguatge VisualFortran 6.6.0 per l'adequació del llenguatge fortran al càlcul matemàtic i el coneixement que d'aquest llenguatge tenen els autors del programa. El programa funciona en PC sota l'entorn Windows. És un arxiu executable senzill que no necessita instal·lació i està disponible, de forma gratuïta, a la pagina web del departament d'Enginyeria Mecànica [http://www.em.upc.edu/docencia/estudis\\_grau/etseib/teoria\\_maquines](http://www.em.upc.edu/docencia/estudis_grau/etseib/teoria_maquines).

Prèviament a la concessió de l'ajut estava disponible la versió 2.0 del programa i amb el finançament d'aquest s'han incorporat les millores per resoldre els errors detectats i també els suggeriments fets per part de l'alumnat i del professorat del departament. Actualment es troba en la versió 2.2. (fig. 1)

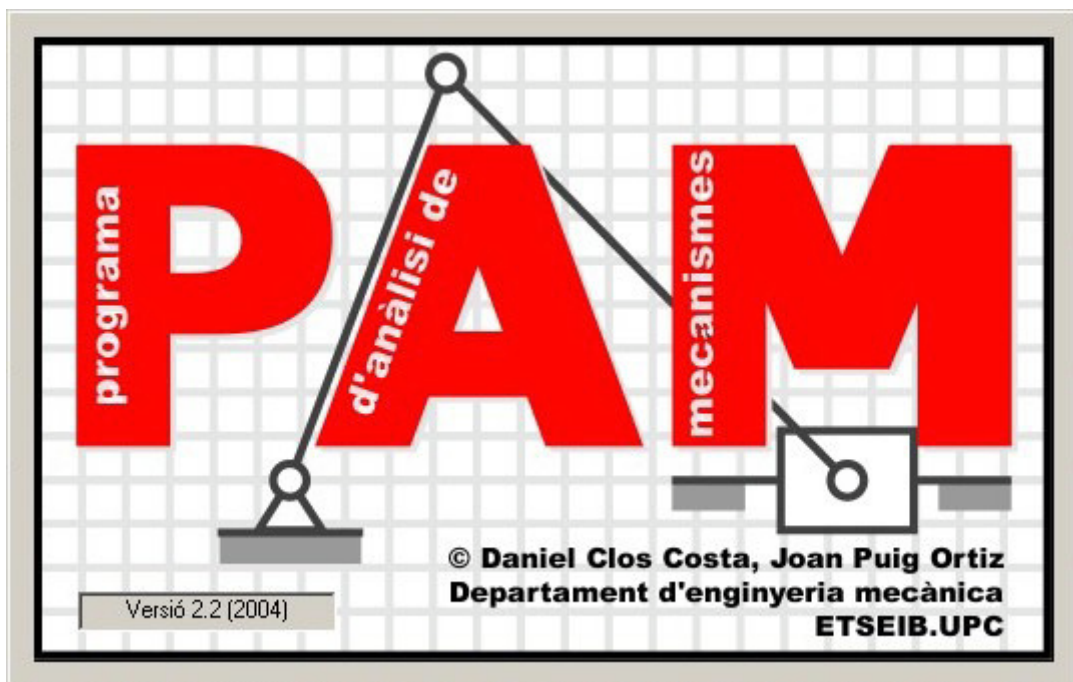


Fig. 1: Pantalla de crèdits del PAM

El programa presenta una senzilla estructura de menús (fig. 2) amb els dos menús habituals en qualsevol aplicació informàtica, *Fitxer* i *Ajuda*, i tres menús bàsics de qualsevol programa de simulació, *Definició*, *Càlculs* i *Resultats* (fig. 3). També s'hi ha afegit el menú *Mostrar dades* per poder obtenir, de manera directa, tota la informació de la definició del mecanisme.

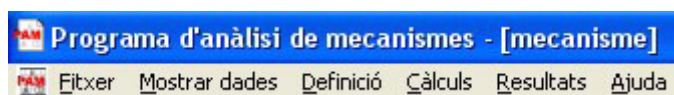


Fig. 2: Menú principal del programa PAM.

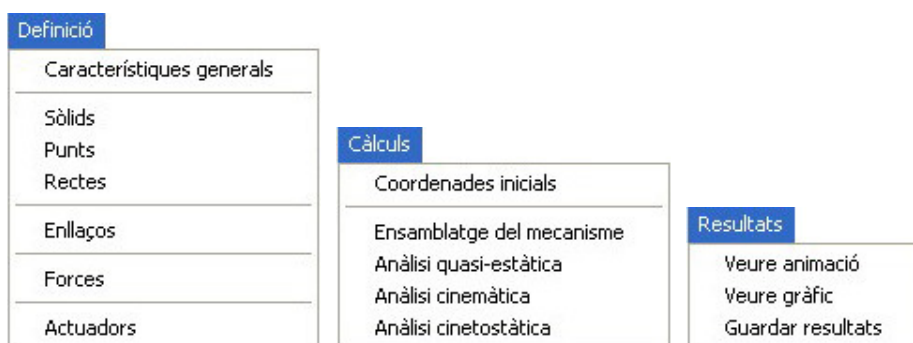


Fig. 3: Menús bàsics del programa PAM.

El Curs d'Autoaprenentatge de Simulació de Mecanismes, que ha estat desenvolupat amb l'eina Flash de Macromedia, està plantejat de manera deslligada a qualsevol temari d'assignatura. Requereix certs coneixements de cinemàtica i dinàmica del sòlid rígid, que s'adquireixen en assignatures bàsiques de mecànica, i pot ser d'utilitat per a diverses assignatures relacionades amb les màquines, tals com Teoria de Màquines, Mecanismes i Màquines, Vibracions Mecàniques i Disseny de Màquines de l'ETSEIB.

El curs està estructurat en quatre blocs i en cadascun d'ells es fa una breu introducció teòrica del tema tractat alhora que s'hi mostren simulacions i es mostra un exemple pas per pas de la seva implementació amb el programa PAM (fig. 4). Aquests blocs són:

- Introducció

En aquest apartat es fa una introducció a la simulació de mecanismes per ordinador com a eina d'ús en el camp de l'enginyeria mecànica. Es mostren visualment les possibilitats de la simulació amb diferents graus de realisme (esquema de símbols, representació 3D) a partir d'un vídeo d'un mecanisme real (fig. 5).

## Curs d'autoaprenentatge de simulació de mecanismes

### 2.3.1 Modelització d'enllaços en el PAM

Nom de l'enllaç	Tipus	Anclatge 1	Anclatge 2	Relació de transmissió	Angle inicial	Visualització
	Piu-guia	barra1.recta1	roda2.punt2	1,0000	0,0000	guia visible

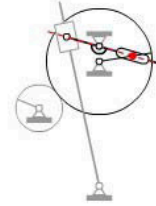
#### Seleccioneu el tipus d'enllaç

##### Piu - guia

Aquest enllaç fa que un punt d'un sòlid es mogui en tot moment sobre la recta d'un altre sòlid. La columna *Anclatge1* permet seleccionar les rectes definides en els sòlids del mecanisme i la columna *Anclatge2* permet seleccionar els punts definits en els sòlids del mecanisme. La columna *Visualització* permet escollir si es vol que la guia sigui visible o no.

##### Exemple

Es defineix un parell piu-guia entre el sòlid *barra1* i el sòlid *roda2*.



[Anterior](#)

[Inici](#) || [Definició del model](#) || [Modelització d'enllaços](#) || [en el PAM](#)

[Repetició](#)

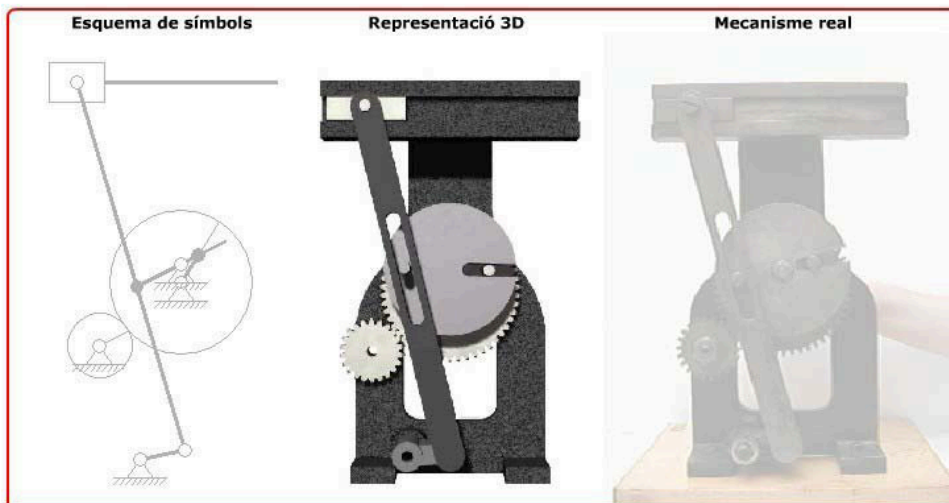
[Següent](#)

Fig. 4: Implementació de l'enllaç piu guia en el PAM.

## Curs d'autoaprenentatge de simulació de mecanismes

### 1.1 Simulació de mecanismes

La simulació de mecanismes per ordinador és una eina d'ús creixent en el camp de l'enginyeria mecànica que permet estudiar la cinemàtica i la dinàmica dels mecanismes prèviament a la seva construcció, així com analitzar mecanismes ja existents.



[Anterior](#)

[Inici](#) || [Introducció](#) || [Simulació de mecanismes](#)

[Següent](#)

Fig. 5: Visualitzacions de la simulació amb diferents graus de realisme.

Es presenten els programes de simulació més estesos tant els grans programes d'ús comercial que abasten tots els camps de l'enginyeria (Virtual.Lab Motion, ADAMS, Dymola) com els que permeten fer simulacions més específiques (CARSim) o els que amb un enfocament eminentment docent permeten fer simulacions de mecanismes plans (Working Model 2D, SAM, PAM). S'indica l'enllaç web a cadascun d'ells.

Finalment, es presenta l'esquema de blocs subjacent de la simulació de mecanismes i s'indica en quins moments són d'utilitat els programes de simulació.

#### – Definició del model

En aquest apartat es presenten els diversos aspectes que cal tenir en compte a l'hora de definir el model d'un mecanisme real a analitzar. Cal fer una descripció dels diferents sòlids que formen el mecanisme, dels diferents enllaços entre els sòlids, de les forces que actuen sobre el mecanisme i dels actuadors amb els quals es fa moure el mecanisme.

En el subapartat de modelització dels sòlids es fa èmfasi en les característiques físiques de cadascun que cal tenir en compte a l'hora de la modelització i en el procés que va des del sòlid real fins a l'esquema (fig. 6).

En el subapartat de modelització d'enllaços es presenten els més habituals en la modelització en 3D i 2D que incorporen els programes de simulació. També es fa una reflexió sobre els problemes més usuals que es poden presentar a l'hora de realitzar una simulació a causa de la insuficiència en la definició d'enllaços o de l'existència d'enllaços redundants.

En el subapartat de modelització de forces es fa distinció entre els tipus de forces que reben els sòlids dels mecanismes. Es distingeix entre forces i moments externs i forces i moments interns els quals poden dependre de la posició, de la velocitat o del temps explícitament.

En el subapartat de modelització d'actuadors es distingeix entre actuadors lineals i actuadors angulars i s'analitza quin és el nombre d'actuadors a definir en funció de les característiques del mecanisme i del tipus d'anàlisi a realitzar.

#### – Realització de càlculs

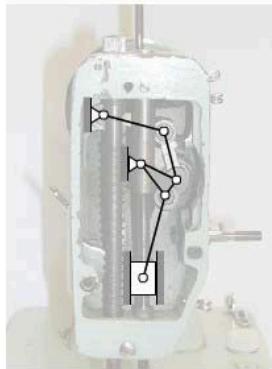
En aquest apartat es presenten els diferents tipus de simulacions que es poden realitzar amb aquests programes: d'ensamblatge, cinemàtica, quasi-estàtica, cinetostàtica, o dinàmica inversa, i dinàmica directa. Es realitza una anàlisi del tipus d'equacions implicades en la resolució de cada tipus de simulació i s'expliciten els resultats que es poden obtenir en cadascun d'ells.

## Curs d'autoaprenentatge de simulació de mecanismes

### 2.2 Modelització de sòlids

2/3

Hi ha alguns programes de simulació que permeten estudiar, donada una forma concreta dels sòlids, les interferències que es produeixen entre ells. Això però, no és el més habitual ja que és un problema complex, que depèn de la solució constructiva, sovint no coneguda fins a les últimes etapes de disseny, i que requereix un esforç molt notable tant de la posada a punt del model com de càlcul. Per això, en molts casos es realitzen les simulacions prescindint de la materialització dels sòlids.



mecanisme ←-----|-----> esquema

Anterior

Inici || Definició del model || Modelització de sòlids

Següent

Fig. 6: Modelització de sòlids.

## Curs d'autoaprenentatge de simulació de mecanismes

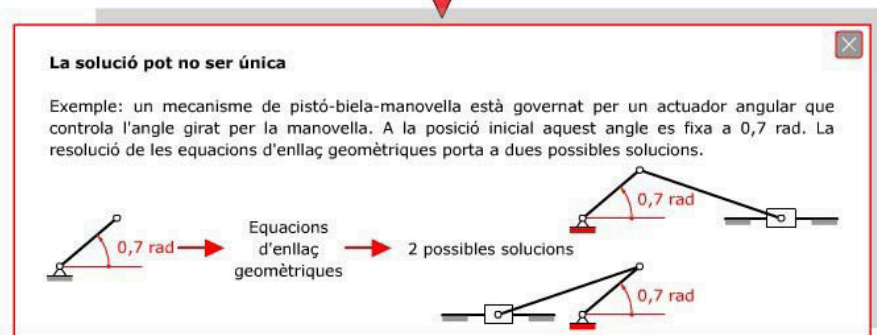
### 3.2 Resolució de les equacions d'enllaç geomètriques

1/3

En tots els passos de simulació cal resoldre les equacions d'enllaç geomètriques que formen un sistema d'equacions no lineals. Els sistemes d'equacions no lineals no tenen, en general, solució analítica. Això fa que calgui recórrer a mètodes numèrics de resolució d'equacions.

Els problemes que planteja la resolució de sistemes d'equacions no lineals són els següents:

- La solució pot no ser única.
- Els algorismes de resolució necessiten un valor inicial de les variables.



Anterior

Inici || Realització de càlculs || Resolució de les equacions d'enllaç geomètriques

Següent

Fig. 7: Resolució d'equacions no lineals.

També s'analitzen les dificultats a l'hora de resoldre les equacions no lineals que apareixen en l'anàlisi de la geometria del mecanisme (fig. 7). Aquesta anàlisi és necessària en tots i cadascun dels tipus de simulació. Es mostra un exemple de resolució de les equacions geomètriques per al cas d'un mecanisme pistó–biela–manovella.

– Obtenció de resultats

En aquest apartat es comenten els resultats de les variables del model que s'obtenen per a cada instant de temps de la simulació. Es mostren exemples dels resultats en els tres formats habituals per a aquests tipus de programaris: animacions del mecanisme, gràfics i taules de dades (fig. 8). Tot i l'espectacularitat de les animacions que es poden obtenir, cal fer èmfasi en què per al propòsit de les assignatures relacionades amb les màquines són de molta utilitat els resultats en forma de gràfic o la importació de dades cap a altres programes.

Per acabar de completar el curs s'inclou un apartat de bibliografia sobre cinemàtica i dinàmica de màquines.

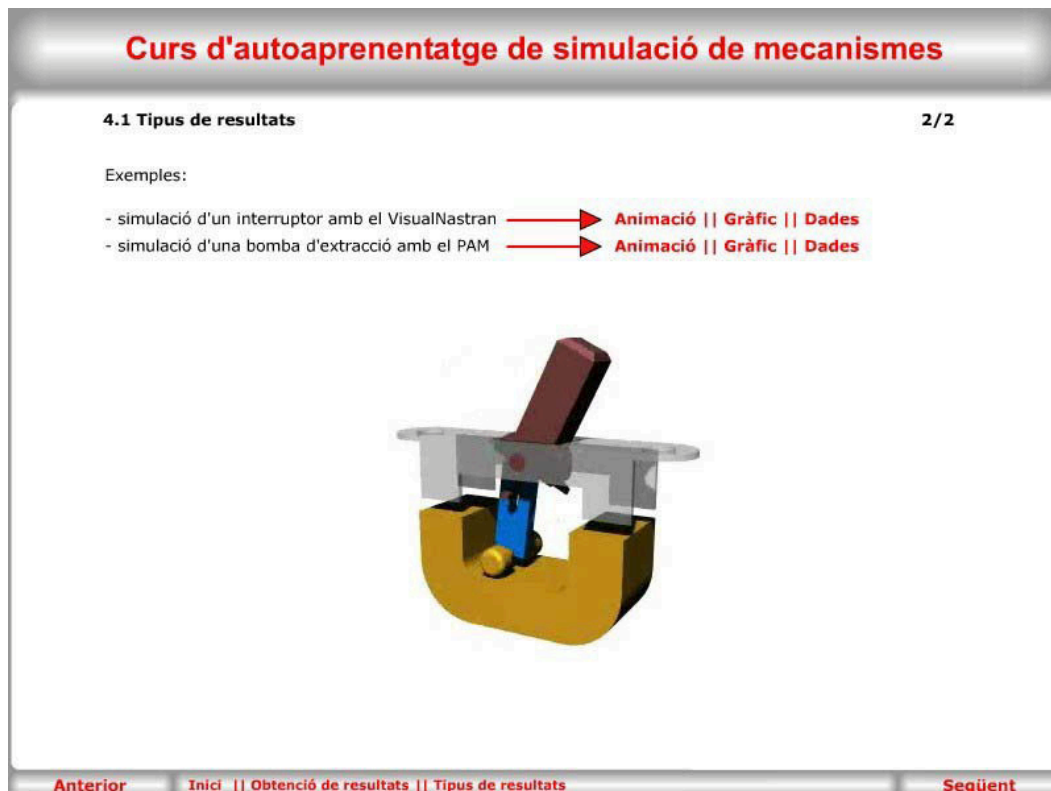


Fig. 8: Animació d'un interruptor obtinguda amb VisualNastran.

### 3. Resultats

El PAM s'ha utilitzat amb èxit en el desenvolupament, en grup, d'un treball de curs de l'assignatura Teoria de Màquines de l'ETSEIB. Aquest inclou la



simulació de mecanismes, la qual cosa dona un caire més tècnic i més proper a la metodologia de treball habitual en el món professional.

El PAM també s'ha emprat en el desenvolupament d'alguns projectes individuals de l'assignatura Mecanismes i Màquines de l'ETSEIB i en diversos Projectes Final de Carrera a l'ETSEIB, cosa que ha sobrepassat els objectius inicials del projecte. A més a més, es té constància de la utilització del PAM en d'altres universitats de l'estat espanyol i de llatinoamèrica. Això ha estat facilitat pel fet d'oferir gratuïtament el PAM en versió catalana i castellana.

La creació del Curs d'Autoaprenentatge de Simulació de Mecanismes ha resultat útil per a les pràctiques de l'assignatura troncal Teoria de Màquines de l'ETSEIB ja que després del seguiment del curs l'alumnat que l'ha utilitzat ha estat capaç de realitzar petits treballs de simulació de mecanismes amb èxit. Una altra millora que ha aportat el curs és el fet que l'alumnat ha pogut revisar i reforçar els coneixements adquirits a la pràctica.

El curs s'ha editat en CD's que s'han distribuït entre el professorat del Departament d'Enginyeria Mecànica de les diverses escoles de la UPC, del Departament d'Informàtica i Enginyeria Industrial de la UdL i del Departament d'Enginyeria Industrial de la URL, per tal que en facin ús i fomentar així l'ús de la simulació de mecanismes en les assignatures de la titulació d'Enginyer Industrial. També s'han repartit CD's en cursos de formació de professorat de secundària impartits per membres del departament.

El contingut del CD també està disponible en format comprimit a la pàgina web [http://www.em.upc.edu/docencia/estudis\\_grau/etseib/teoria\\_maquines](http://www.em.upc.edu/docencia/estudis_grau/etseib/teoria_maquines).

En definitiva, doncs, s'ha dotat d'una eina multimèdia als estudiants, i al professorat, que permet la millora del seu rendiment acadèmic en base a l'autoaprenentatge, el treball en equip i el seu esperit emprenedor.

#### **4. Conclusions**

La versió actual del Programa d'Anàlisi de Mecanismes és apta per a l'alumnat de Teoria de Màquines i matèries afins de les diverses escoles de la UPC en les quals el Departament d'Enginyeria Mecànica imparteix docència i també d'altres departaments semblants d'altres universitats. Tot i que el PAM està a disposició de tota la comunitat universitària, s'ha constatat que el que és necessari és un canvi de mentalitat per part del professorat d'assignatures relacionades amb les màquines per tal d'introduir-hi la simulació de mecanismes. El fet de disposar d'una eina senzilla i gratuïta com el PAM permet facilitar aquest canvi de mentalitat.

A partir de la utilització del Curs d'Autoaprenentatge de Simulació de Mecanismes en les pràctiques de Teoria de Màquines a l'ETSEIB s'ha fet evident que és una eina totalment vàlida per a un ensenyament

semipresencial i que serà d'utilitat en l'adaptació de les assignatures relacionades amb les màquines a l'EEES.

## 5. Referències/Més informació

Haugh, E. J. Computer-aided kinematics and dynamics of mechanical systems, Boston, Allyn and Bacon, (1989).

García de Jalón, J., Bayo, E., Kinematic and dynamic simulation of multibody systems, Nova York, Springer-Verlag, (1994).

Cardona, S., Clos, D., Teoria de Màquines, Barcelona, Edicions UPC, (2001).

Cardona, S., Jordi, L., Clos, D., Puig, J., Metodología docente para la enseñanza de Teoría de Máquinas, Anales de Ingeniería Mecánica 14(1), pp. 624-627, (2002).

Cardona, S., Jordi, L., Las enseñanzas de secundaria adecuadas para una carrera técnica, I Conferencia Científica Internacional Universidad y Sociedad, Holguín (Cuba), Actes del congrés en CD, (2003).

Clos, D., Puig, J., PAM, un programa de análisis de mecanismos planos, Anales Ingeniería Mecánica, 15(1), pp. 757-765, (2004).

Puig, J., Clos, D., Programari de simulació de mecanismes per a la docència, 3r. CIDUI, Girona, Actes del congrés en CD (2004).

Nápoles, A., Pérez, M. V., Material de estudio y CD-ROM interactivo para el autoaprendizaje del análisis de mecanismos, [Consulta gener 2008]. Disponible a: <<http://hdl.handle.net/2099/3332>>

[http://www.em.upc.edu/docencia/estudis\\_grau/etseib/teoria\\_maquines](http://www.em.upc.edu/docencia/estudis_grau/etseib/teoria_maquines)