

MÈTODES D'ENGINYERIA INVERSA EN SISTEMES CAS/CAD PER A LA OPTIMITZACIÓ DEL PROCÉS DE DISSENY DE PRODUCTES DE CONSUM

M. Mata Dumenjó, A. Vinacua Pla, P. Brunet
**Institut de Robòtica i Informàtica Industrial de la Universitat Politècnica de
Catalunya**
C/ Gran Capità 2-4 08032 Barcelona
mmata@iri.upc.es, avinacua@iri.upc.es, pere@lsi.upc.es

Resum-estructura:

*En aquest article es presenta el projecte FIORES a través dels seus objectius i de la forma d'assolir-los. Es divideix l'article en cinc grans apartats: **la introducció**, on es presenta el projecte; **l'optimització del procés de disseny**, un dels principals objectius del projecte; **eines utilitzades**, on es parla del concepte de l'enginyeria inversa, de l'estandarització de conceptes i procediments (features, "característiques"), de diferents eines d'interrogació de superfícies en temps real i de diferents millores per a la interacció usuari-màquina; el **prototipus de proves**, les seves característiques i funcionalitats; i finalment **els resultats esperats**.*

1. INTRODUCCIÓ

FIORES (Formalització i Integració de Mètodes de Enginyeria Inversa per a l'Optimització del Disseny de Productes de Consum) és un projecte dins del programa Brite-EuRam de l'Unió Europea, desenvolupat per 12 socis de 6 països diferents de la Unió: Alemanya, Itàlia, Suècia, França, Bèlgica i Catalunya. Aquests socis pertanyen a diferents entorns: hi ha socis industrials, usuaris de productes de CAD/CAS, tal com BMW AG (Alemanya), Saab AB (Suècia), Pinifarina (Itàlia), Eiger S. L. (Catalunya) i Electrodomesticos Taurus S. L. (Catalunya); socis d'empreses de desenvolupament de programes informàtics tal com Formtech AB (Suècia), Matra Datavision (França), Samtech S.A. (Bèlgica); i finalment socis dedicats a la recerca científica com la Universitat de Kaiserslautern (Alemanya), UDK Uytveckling (Suècia), IMA-CNT (Itàlia) y CIMNE-IRI (Catalunya).

L'objectiu del projecte és el desenvolupament d'eines que permetin incloure la fase de disseny conceptual dins del procés de producció i disseny per ordinador amb sistemes CAS/CAD (Computer Aided Styling, Computer Aided Design); cosa que donarà continuïtat al cicle de treball, i per tant, reduirà el temps de desenvolupament, en especial en aquells casos en què s'utilitzen models físics, amb els quals es perd molt temps i el flux d'informació queda partit. Les eines desenvolupades permeten reduir l'ús dels models físics al reduir el nombre de bucles d'optimització i la millora de les prestacions dels sistemes CAS/CAD.

Per aconseguir-ho; per un costat es treballa en la millorar de la **interfície d'usuari**, combinada amb un nou conjunt **d'eines d'interrogació** de les superfícies, cosa que incrementarà la acceptació de les eines de disseny per ordinador per part dels estilistes. I, per un altre costat, es treballa en el desenvolupament i introducció en els sistemes

CAX de noves tècniques de treball: **tècniques d'enginyeria inversa** que permeten reconstruir la superfície a partir de propietats objectiu definides pels dissenyadors, o la introducció del **concepte de característica** (features) per a disminuir el temps dedicat a treballs repetitius o tipificables.[1]

Els resultats esperats del projecte són:

- Un nou procés de disseny per a objectes amb superfícies complexes que permeti la supressió de la majoria dels llaços d'optimització; cosa que abaratirà el procés i permetrà un augment de la qualitat estètica del producte (optimització del procés de disseny amb la introducció de mètodes d'enginyeria inversa [1]).
- Noves funcions per al disseny estilístic, cosa que permetrà millors resultats tant pel què fa a qualitat com per a temps invertit en el disseny.
- Una arquitectura nova del sistema, de tipus modular, que permetrà a la petita i mitjana empresa accedir als sistemes de disseny CAS/CAD, fins ara fonamentalment usats per grans empreses.

Durant el projecte es desenvolupa un prototipus del programa, on s'implementen algunes de les funcions desenvolupades per a mostrar la fiabilitat dels mètodes de disseny als usuaris industrials de sistemes de CAD/CAS; i, per a provar les avantatges sobre un procés de disseny pilot.

La font principal de informació per al desenvolupament del nou programa són les especificacions, comentaris i dades procedents dels usuaris finals. A partir dels quals es treballa en la formalització de nous algorismes i el estudi de la interfície amb l'usuari, així com de les eines d'enginyeria inversa.

2. OPTIMITZACIÓ DEL PROCÉS DE DISSENY

A la majoria de departament de disseny de productes, es comú l'ús de models físics, a més a més de les eines d'assistència per ordinador (CAX), sistemes CAS i sistemes CAD. Els sistemes CAS s'utilitzen per a la generació eficient del concepte estilístic; i per tant, l'aspecte qualitatiu i quantitatiu de les dades queda en segon terme. En canvi, els sistemes CAD s'utilitzen per a definir les superfícies finals, i per tant, la qualitat i la quantificació de les superfícies són important, han de ser suficients per a la generació de prototipus mitjançant tècniques per la generació de control numèric.

Així doncs, habitualment, el modelat de superfícies s'inicia amb algun sistema de CAS seguit d'una optimització de la superfície sobre models físics. Aquest models s'usen com a base per la definició de les superfícies finals dels sistemes CAD. La principal desavantatge d'aquest procés és la discontinuïtat de la informació entre els sistemes CAX, cosa que provoca una pèrdua de la qualitat de les dades aconseguides, degut a què la qualitat de la informació dels punts mesurats sobre els models físics i utilitzats per la reconstrucció de la superfície en els sistema CAD és significativament inferior a la qualitat de la superfície del model físic. (Fig. 1)

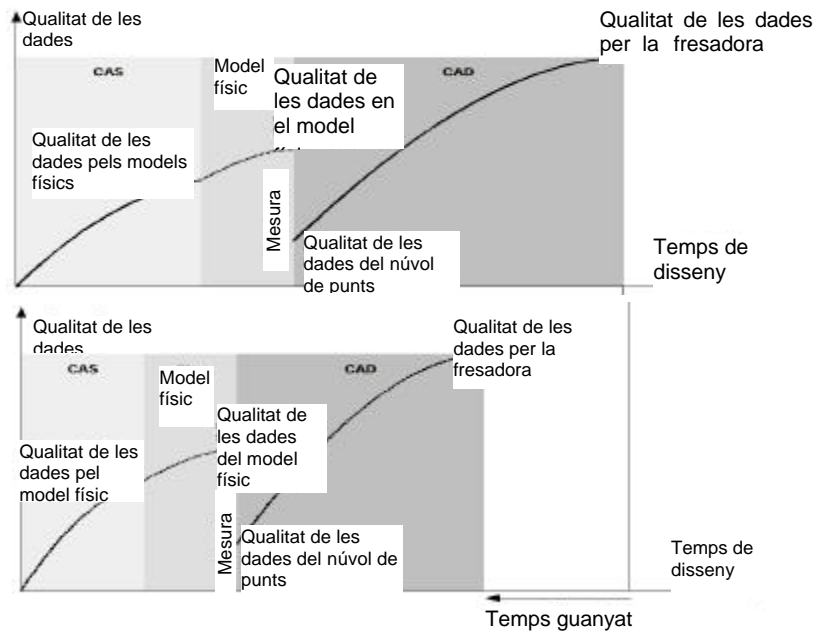


Fig.1: Procés de disseny amb l'ús de sistemes CAS, CAD i models físics

Una altra opció és el procés de disseny totalment basat en sistemes Cax, que consisteix en usar un sistema CAS per modelar i refinar, i un de CAD per definir les superfícies finals; i, procurar utilitzar les models físics, només, per visualitzar els resultats i comprovar si s'han assolit els objectius. Per tal de fer possible i facilitar aquest procés, en el projecte es desenvolupen eines d'enginyeria inversa (EiR) que permeten avaluar, modificar i recalculer les superfícies, i per tant, substituir l'ús dels models físics (Fig. 2).

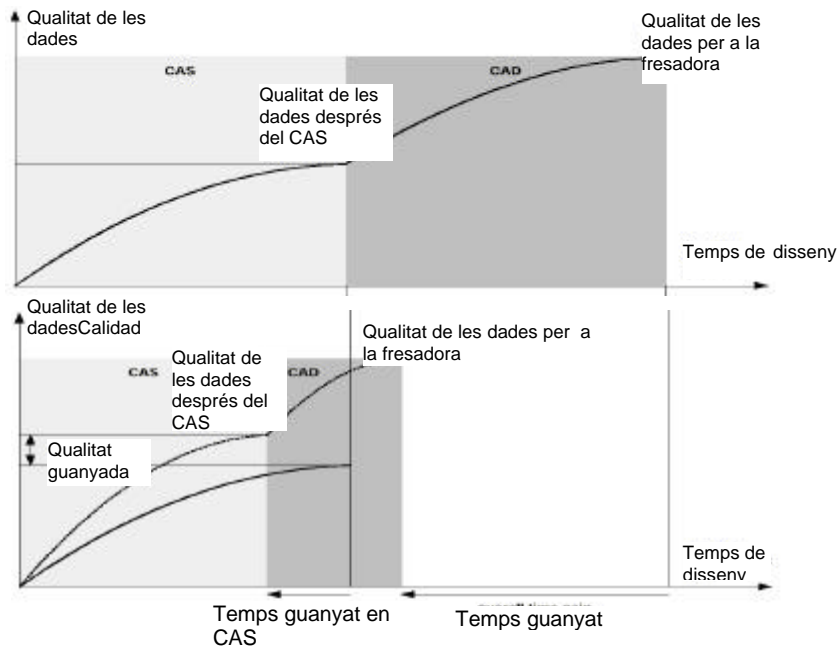


Fig. 2: Procés de disseny totalment basat amb sistemes CAx

Per altra banda, en el projecte (FIORES), es desenvolupen altres eines que complementen els sistemes CAS i CAD actual, i que permeten una reducció del temps de treball i un augment de la qualitat dels resultats de disseny (Fig. 1 inferior i Fig. 2 inferior), aquestes eines es presenten en altres apartats d'aquest article [2].

3. EINES BÀSIQUES DEL SISTEMA DESENVOLUPAT

3.1. Enginyeria inversa (EiR) [4]

- **FIORES proposa dues estratègies d'enginyeria inversa:**

- **Aproximació Directa.**

Aquesta proposta és útil per aquells casos on el problema pot expressar-se de forma matemàtica i pot ser resolt exactament, com a solució d'un problema variacional [3],[4].

La sistemàtica de treball és la següent: el dissenyador defineix un model per la superfície i un conjunt de restriccions, com són la continuïtat del model; el sistema calcula la superfície i permet avaluar el resultat a través de diferents eines d'interrogació; per exemple, amb el càlcul de línies d'ombra, que són línies sobre les quals es pot detectar fàcilment una discontinuïtat de la segona derivada; a partir d'aquí, el dissenyador pot definir noves línies d'ombra per a arreglar les imperfeccions detectades, i el sistema calcula una nova superfície que satisfaci aquestes noves corbes, mantenint les restriccions imposades al començament.

L'aproximació directa té l'avantatge de donar exactament el resultat desitjat, però no és sempre aplicable, el sistema pot no tenir solució, o els resultats obtinguts poden no són acceptables per a la producció.

- **Aproximació amb optimització (model holístic)**

A diferència de l'anterior mètode, el model holístic d'enginyeria inversa sempre ofereix una solució; aquest model representa el càlcul de la millor solució d'acord amb les restriccions definides; el resultat, però, pot quedar força lluny del resultat desitjat.

El mètode consisteix en tancar un llaç d'optimització: sortint d'un model inicial amb algunes restriccions, i a través d'un criteri de similitud i un llaç de realimentació, el sistema calcula una possible solució [2],[6] (Fig. 3).

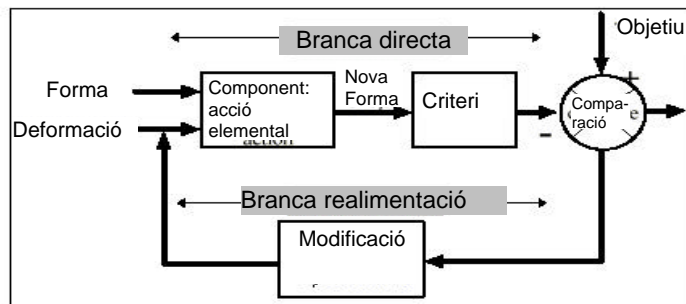


Fig. 3 Llaç de optimització

Per al desenvolupament del llaç, és necessari un algoritme que permeti l'acció elemental de forma directa (forward branch). Aquest algoritme està implementat amb un component del programa que permet la modificació de n-costats d'una àrea d'un tros de la superfície definida, mentre manté les restriccions de continuïtat G_k a les vores i a l'interior del domini triat (Fig. 4).

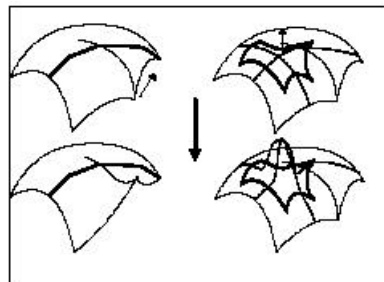


Fig. 4. Deformació

Un altra punt interessant del projecte és l'estudi del criteri de similitud escollit per a valorar els resultat i realimentar el llaç d'optimització; aquest criteri s'ha escollit a partir de les recomanacions dels usuaris i es basa en la integral dels quadrats de las derivades i de la curvatura de la superfície.

A continuació es mostra un algoritme tipus que mostra el procés d'optimització d'una superfície segons el mètode holístic d'optimització:

Algoritme (Holístic)

- Entrada superfície (S)
- Real Time Check (S; llista corbes)
- Selecció domini (S,dom)
- Selecció corba (ListaCurvas, c)

```

Modificació InteractivaCurba (c,Cmod); iter:=0
mentre Similitud (c,Cmod)>ε i iter <max fer
    Càlcul Modificació Vèrtex Control (S,e,cmod,DeltaVC)
    FdF (S,dom,Delta VC, NovaS)
    RealTimeCheck (NovaS, LlistaCorbes)
    C:=Nova Selecció (LlistaCorbes,c)
    S:= NovaS
    Iter:=iter+1
Fimentre

```

Fialgoritme

Una breu descripció del funcionament de l'algoritme és el següent: s'entra la superfície i s'interroga, el resultat d'aquesta operació és la visualització de corbes, que poden ser: les corbes d'ombra, les d'inflexió, o qualsevol entitat d'interrogació de la superfície definida; per a la modificació, l'usuari selecciona un domini de treball sobre la superfície i una corba a modificar i la redefeix, a partir d'aquí l'algoritme modifica els vèrtexs de control de la superfície, busca la nova superfície i la torna a interrogar; procés que es repeteix fins que es compleix el criteri de similitud entre la corba desitjada i la trobada, o fins que un comptador del nombre d'iteracions sobrepassi un cert valor.

Aquesta funció és especialment útil en els sistemes CAx, on la modificació de superfícies és una característica important de la geometria assistida per ordinador: per ajustar requeriments estètics globals o locals, restriccions d'enginyeria o per estudiar el comportament mecànic de l'objecte, on una operació de modificació ha de satisfer un cert objectiu; però, a l'hora ha de mantenir o millorar la qualitat de la forma original. Per exemple, en general, les superfícies en els sistemes CAx estan definides a trossos, i cada tros connecta amb els altres amb un cert grau de continuïtat concret, que hauria de conservar-se o millorar-se.

- **Arquitectura del programa per a la branca directa del llaç del model holístic.**

L'arquitectura del programa global de la branca directa del llaç reflexa una jerarquia en tres nivells (FdF0, FdF1, FdF2) [4] cada una amb una tasca específica (Fig. 5).

- FdF0 aplica una deformació sobre la superfície rebuda, a través de dos recursos, el "mapper", que especifica com quedarà la deformació sobre la superfície i el "localizer" que ajuda a determinar quina part de la superfície ha de ser modificat en cas d'ambigüitat. El resultat d'aquest mòdul és una nova superfície que pot ser presentada de diferents maneres: com a superfícies exacta, com a una aproximació per NURBS o a través d'una triangulació.

- FdF1 calcula i proporciona la deformació del domini, les restriccions i els manipuladors (que són restriccions especials) a partir del FdF0 i d'un component anomenat "Plate" on es resolen la major part dels càlculs matemàtics.

- FdF2 calcula i proporciona el "mapper", el "localizer" de la superfície, el domini i la vista de la modificació. També avalua la superfície en temps real (RealTimeCheck), amb les diferents eines d'interrogació definides: seccions planes, isofotes, línies d'ombra, mapes de curvatura de Gauss. Tot, a partir de la sortida del mòdul FdF1.

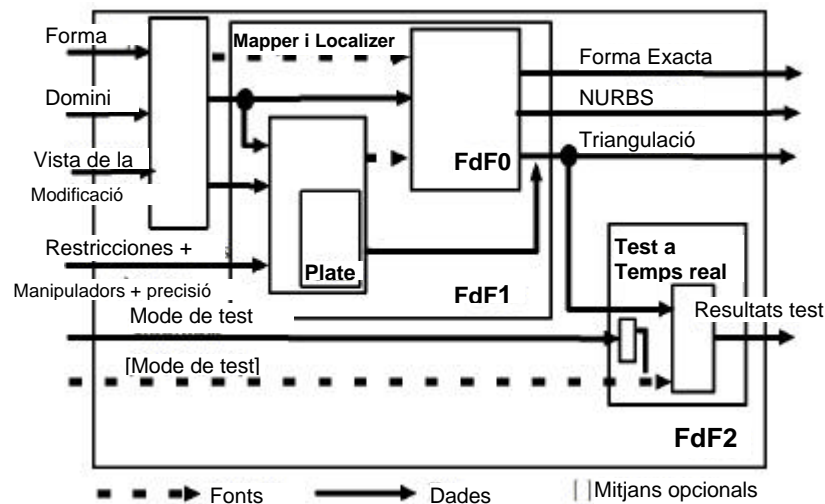


Fig. 5 Arquitectura del component corresponent a la branca directa del llaç d'enginyeria inversa.

3.2. Disseny per Característiques (Free Form Features :FFF) [5]

El disseny per "característiques" ("features") té l'objectiu de proporcionar entitats d'alt nivell amb un significat funcional. A la literatura hi ha moltes definicions diferents de "característiques" (features): sovint, es defineixen en un context d'aplicació concret, però altres vegades es defineixen de manera general, basant-se especialment en la forma (form feature), com a entitats geomètriques amb significat funcional i amb una forma estereotipada constant. Però, aquest concepte clàssic de "característica", on la "característica" queda com a un element modelador de forma estàndard, no pot ser immediatament aplicat als casos de disseny estilístic, degut a que aquesta activitat està basada en la llibertat de formes.

En el context del disseny, les "característiques" (features) es poden descriure a través de dos tipus d'informació: informació sobre formes, on les "característiques" són les relacions tipològiques i geomètriques entre les entitats geomètriques de baix nivell que formen una entitat, o com a seqüència de passos necessaris per la construcció de la geometria de l'entitat. O, es poden descriure, a través d'informació sobre comportaments; o sigui, a través de les interaccions amb el resta d'objectes.

Exemple de “característiques” (Fig. 6):

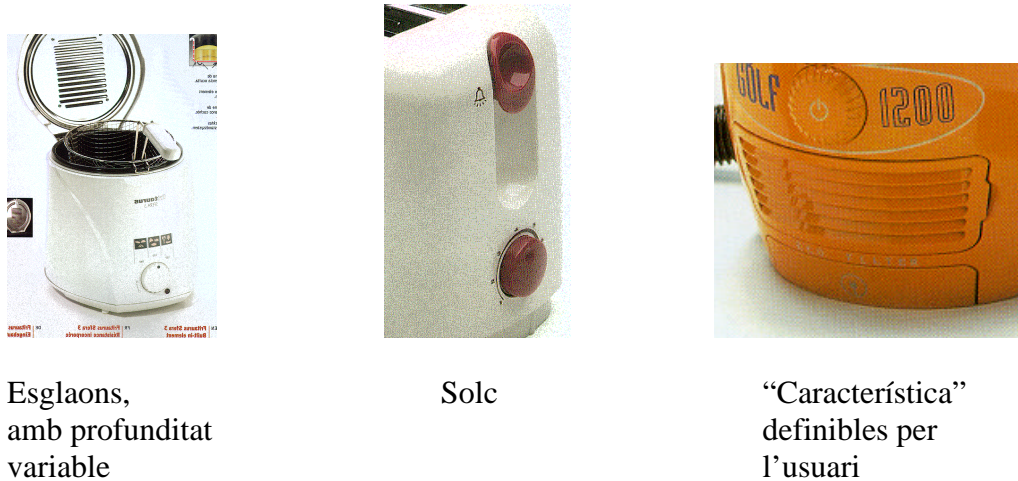


Fig 6. Exemples de “característiques”

3.3. Interrogació en temps real (RTC: Real Time Check)

Dins del projecte s’han estudiat i formalitzat les tècniques d’interrogació més usades pel dissenyadors, tal com: les línies d’ombra, les línies de reflexió, les seccions planes, les corbes d’inflexió i les corbes isofotes [8],[9]; i la manera de permetre al dissenyador definir modificacions sobre elles a través de diferents interfícies gràfiques [4][5].

En el primer prototipus del projecte s’han inclòs línies d’ombra. Les línies d’ombra es defineixen com a solució de l’equació $\vec{D} \cdot \vec{N} = 0$, on \vec{D} és un vector donat que representa la direcció de la llum i $\vec{N}(u, v)$ la normal de la superfície $S(u, v)$ (Fig. 7). Una manera típica d’obtenir una família de línies d’ombra sobre la superfície és variant el vector \vec{D} al voltant d’un eix. És, també, interessant veure que l’equació que genera les línies d’ombra es pot generalitzar de la següent manera $\vec{D} \cdot \vec{N} = ct$, equació a partir de la qual es pot generar una altra família de corbes que són les isòfotes.

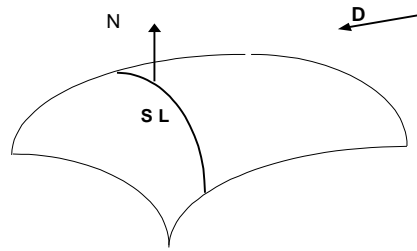


Fig. 7 Línies d'ombra

Per una altra banda, dins la feina del projecte FIORES a Barcelona, s'està estudiant la modificació de la superfície a partir de les seves línies d'inflexió per un mètode holístic [10].

Les línies d'inflexió sobre una superfície es defineixen en funció d'una direcció concreta (vector en 3D), la superfície estudiada es fa interseccionar amb un conjunt de plans perpendiculars a la direcció escollida; el resultat d'aquesta operació és un conjunt de corbes planes amb punts d'inflexió, la unió d'aquests punts són les línies d'inflexió de la superfície associades a la direcció donada. Aquest tipus de corbes no és simple, no té representació paramètrica i es difícil treballar amb elles, però l'eina és interessants perquè és molt propera a la forma de treballar dels dissenyador. A la següent figura es mostren alguns exemples de línies d'inflexió per una superfície donada i per diferents direccions (Fig.8).

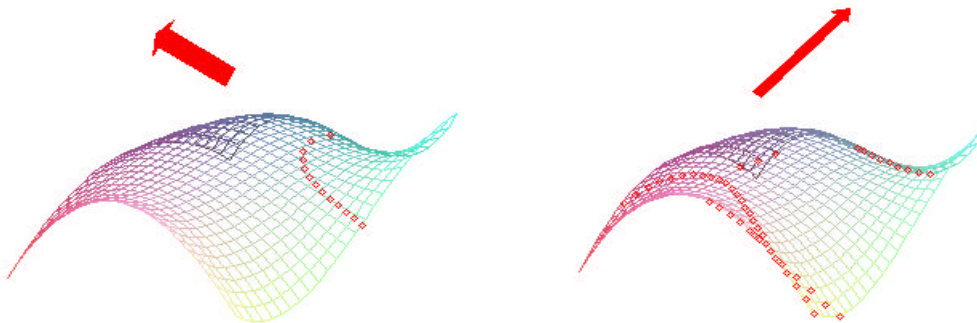


Fig. 8 Corbes de inflexió

3.4. Interfície gràfica d'Usuari (GUI)

Una de les contribucions del projecte FIORES són les eines d'interfície específiques, tal com: la manipulació manual (modificació interactiva de superfícies), modificació de corbes per similitud (amb patrons o amb corbes de referència) i la interfície d'usuari

específica per l'ús del FdF directe (deformació de superfícies amb especificacions de continuïtat).

Uns elements d'interfície d'usuari interessants i estudiats en el projecte FIORES són els dispositius de realimentació de força ("haptic"); la inclusió d'aquestes eines en els sistemes CAx permetrien l'ús del sentit del tacte, essencial en l'home i molt apreciat pels dissenyadors. En concret, dins del marc del projecte FIORES, s'estudia un "Haptic Mouse" que té la capacitat de combinar una sortida "haptic" amb una entrada estàndard tal com la d'un ratolí.

4. PROTOTIPUS FIORES :

4.1. Visió General

El prototipus FIORES consta d'un conjunt d'utilitats presentades a la figura 9. El dissenyador treballa amb el seu sistema CAD/CAS habitual i en un cert moment envia el seu model al sistema FIORES a través del STYLER (aplicació CAD comercial), que permet treballar amb funcions bàsiques i usar les utilitats de FIORES.

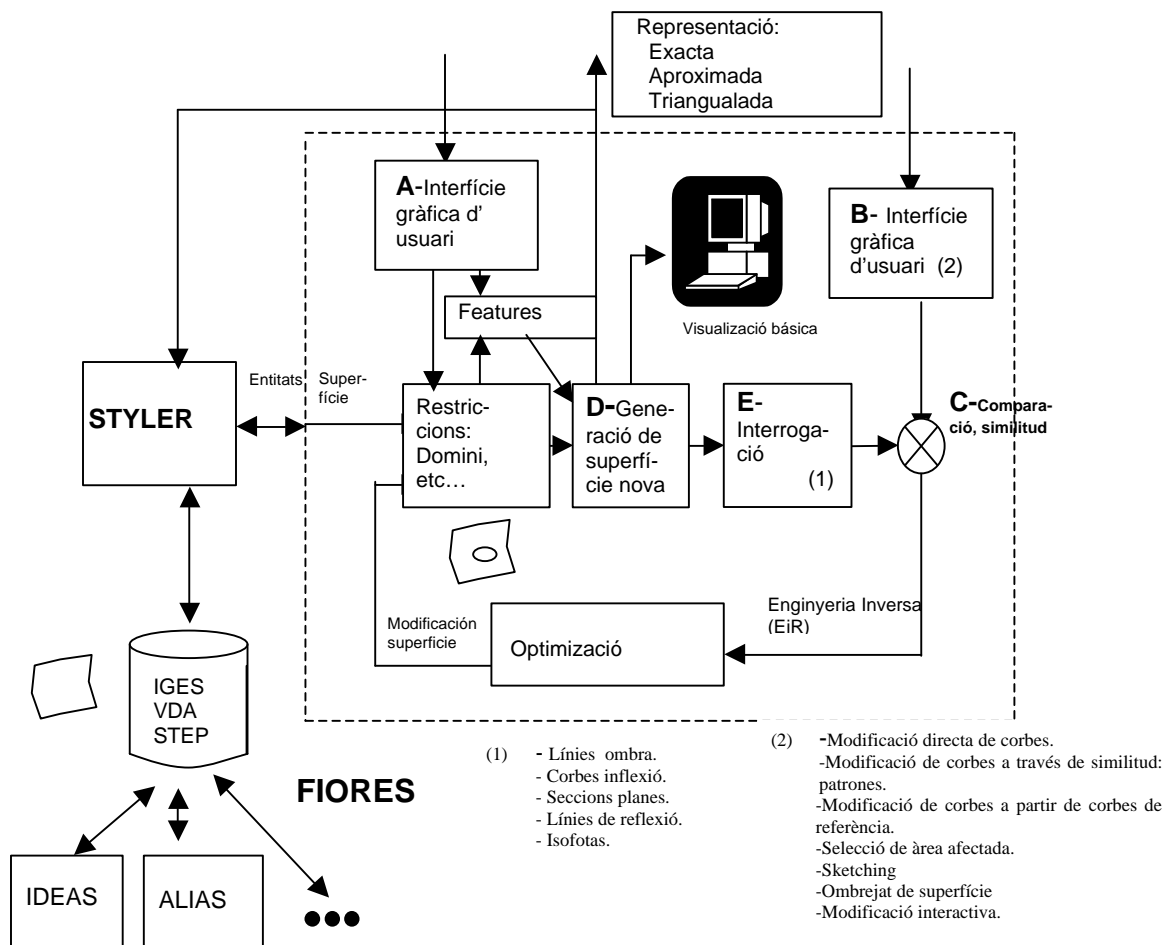


Fig. 9 Diagrama de blocs del prototipus de FIORES

En general a FIORES la superfície pot ser interrogada de diferents maneres: és possible representar línies d'ombra, línies de reflexió, seccions planes, corbes d'inflexió i/o isòfotes. Sobre aquestes entitats els dissenyadors, a través de diverses interfícies específiques, poden definir modificacions. I el programa, comparant la superfície actual amb la desitjada amb la funció similitud, intenta optimitzar la superfície per aconseguir les especificacions de l'usuari complint certes restriccions de continuïtat especificades (funció anomenada d'enginyeria inversa (EiR), exposada en apartats anterior).

El dissenyador pot també definir un domini sobre la superfície i una modificació sobre aquest o pot incloure "característiques" (features) i manipular-les, i FIORES reconstrueix la superfície (FdF) conservant les condicions de continuïtat, prefixades.

4.2. Funcions del prototipus actual

El prototipus de test inclou els principals components per a tancar el llaç d'optimització d'enginyeria inversa: un cop introduïda la superfície i definides les restriccions a través d'una interfície d'usuari senzilla (A, fig. 9), el sistema calcula una nova superfície (D, fig. 9) i la interroga, cosa que en aquesta primera versió es redueix a representa les seves línies d'ombra i/o isòfotes (D, fig. 9); a partir de aquí, el dissenyador, pot modificar sobre la pantalla les línies d'ombra tot proposant-ne de noves (B,fig.9) sobre les quals el sistema adapta la superfície, (en el primer prototipus únicament es poden modificar directament les línies d'ombra). Per aconseguir-ho, el sistema compara les corbes desitjades amb les actuals a través del criteri de similitud (C, fig. 9) i entra al llaç d'optimització fins que la funció similitud dona un resultat acceptable.

A través de les figures 11,12,13 i 14 es presenta el procés per a la millora de les corbes d'ombra d'una superfície. La figura 11 mostra la superfície, la figura 12 mostra: les corbes d'ombra inicials de la superfície per una direcció donada de la llum en groc, i en vermell una línia d'ombra desitjada; les figures 13 i 14 mostren el resultat segons dos graus de precisió, o sigui segons dos nivells de triangulació diferents de la superfície.

La interfície implementada incorpora un nou component anomenat "Empènyer-Estirar" (Push-Pull) que és una interfície gràfica que permet redibuixar corbes empenyent i estirant porcions d'aquestes a través d'un cercle per poder canviar la seva forma o suavitzar la seva curvatura (Fig. 10).

L'aspecte del prototipus és tipus "Windows", amb el menú principal a la part alta de la pantalla, un altre menú de visualització a l'esquerra, una línia inferior on van apareixent missatges d'alarma o instruccions per a l'ús de les diferents funcions; i, una àrea de treball on poden aparèixer diverses finestres amb diferents vistes o diferents feines, sobre la qual es pot desplegar el menú prement el botó de l'esquerra del ratolí.

Cada una de les etiquetes del menú principal és un menú secundari amb les diferents funcions del prototipus: hi ha submenús típics com "Arxiu" (File), "Edició" (Edit), "DEMO", amb una petita demostració del que podrà fer la següent versió, i el

submenú “Windows”. Hi ha, també, el submenú “Funcions” (Functions) on apareixen les eines especials del sistema FIORES: la funció de “Similitud” (Similarity), la funció “Marcar Corbes sobre Superfícies a Partir de Punts “ (Curves on Surface by Picking Points), la funció “Eina Empènyer-Estirar” (Push-Pull tool) (Fig. 10), la funció “Interrogació en Temps Real” (Real Time Checks), la funció “Modificació de Línies d’Ombra” (Shadow Line Modifications) i la funció “Modificació de Línies d’Ombra amb el Mètode FdF” (Shadow Line Modification using FdF); a través d’aquestes dues últimes funcions es recalcula i modifica la superfície a partir de les indicacions del dissenyador segons dos mètodes d’enginyeria inversa: la aproximació directa i l’aproximació amb optimització.

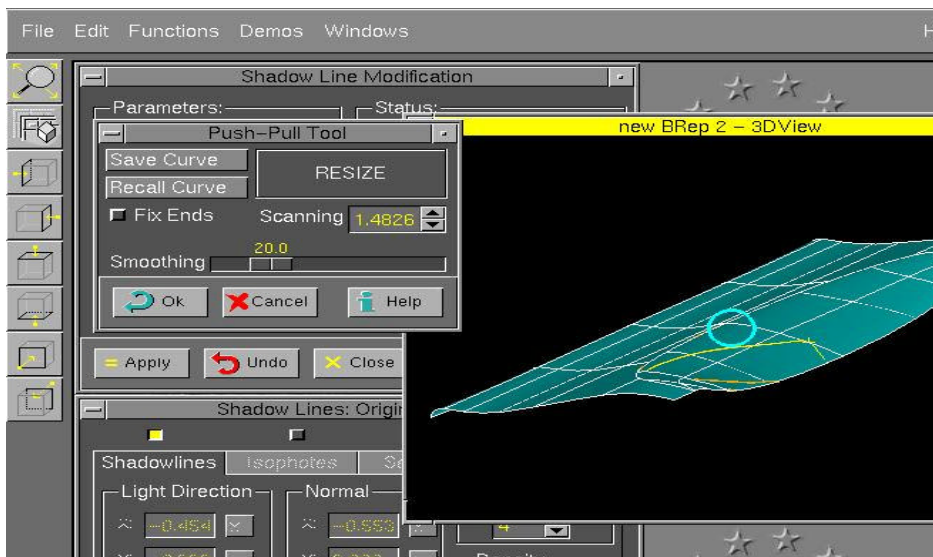


Fig. 10 Entorn del prototipus FIORES

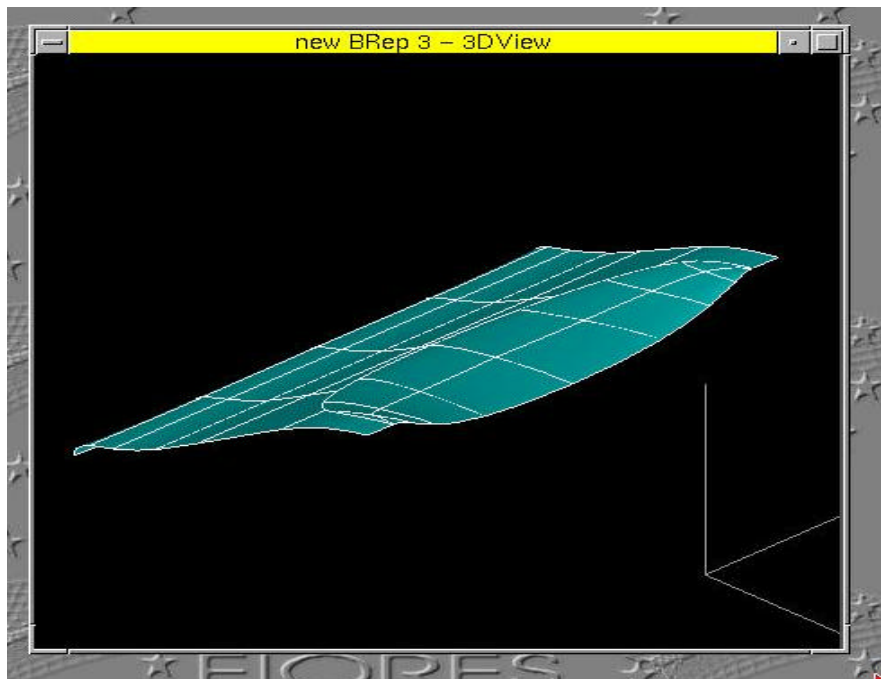


Fig. 11 Vista d’una superfície

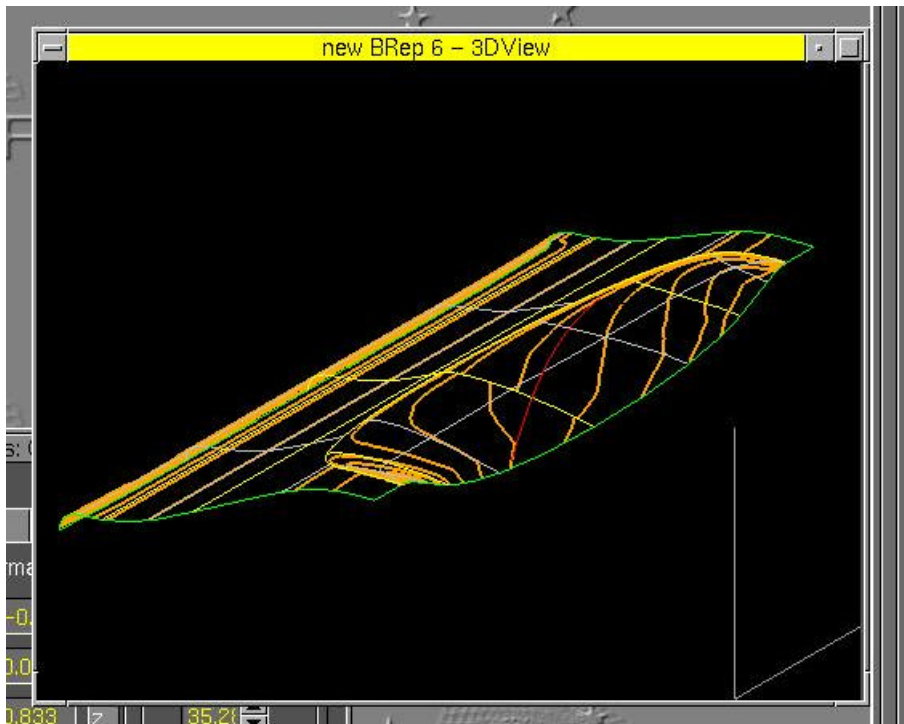


Fig. 12 Vista de la superfície amb les seves línies d'ombra en groc, i la línia d'ombra desitjada en vermell.

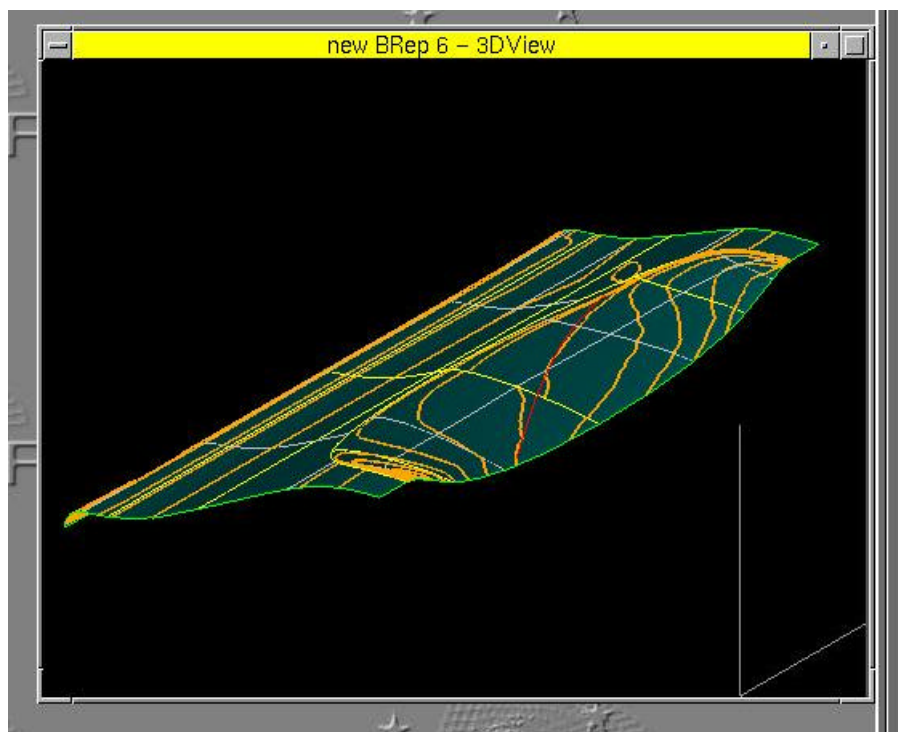


Fig. 13 Noves línies d'ombra calculades amb el mètode holístic.

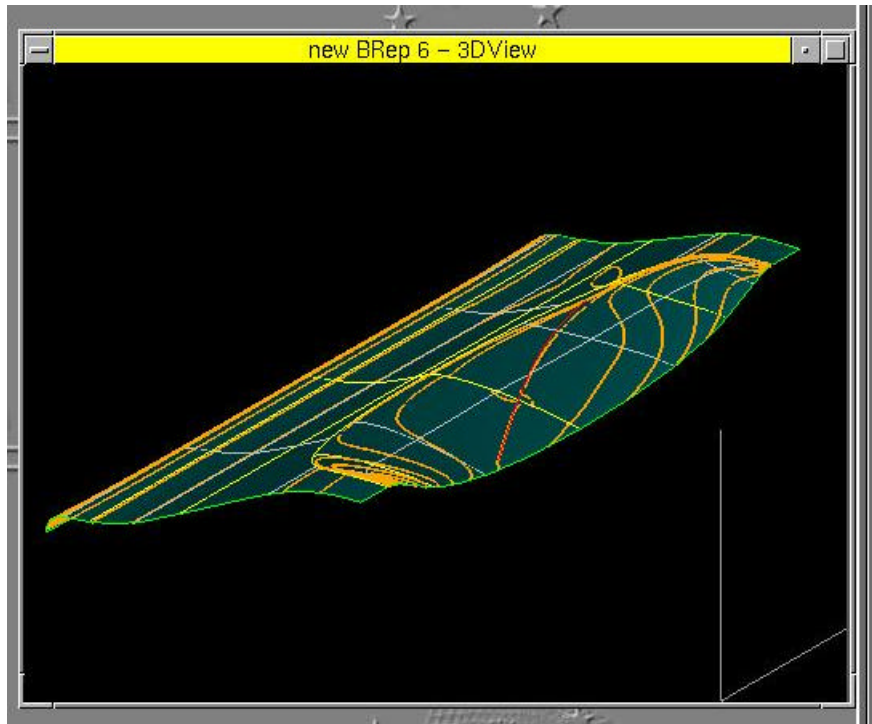


Fig. 14 Recàlcul de les noves línies d'ombra amb el mètode holístic, però amb una triangulació més fina, que la presentada a la figura 13.

5. RESULTATS

El prototipus és l'eina concreta resultant del projecte. En aquest moment s'ha implementat una primera versió del prototipus que està sent provada pels socis industrials, cosa que permetrà la seva millora.

Per altra banda, alguns dels resultats teòrics del projecte es poden consultar a una pàgina electrònica amb la següent adreça: <http://rkk.mv.uni-kl.de/FIORES/Fiores.html>.

I, es preveu implementar el nou procés de disseny al cicle de treball dels participants industrials, cosa que durà a la reducció del temps de desenvolupament i dels costos generals, a més a més d'incrementar la qualitat del producte resultant. I, per tant, millorar la seva posició en el mercat.

REFERÈNCIES

- [1] FIORES Project Program for the Brite EuRam project BE 96-3579 .
- [2] Prof. C. W. Dankwort, G. Podehl, Uni. Kaiserslautern, Germany, “FIORES - A European Project for a New Workflow in Aesthetic Design”, in: VDI-Berichte Nr. 1398, 1998, pp. 177-192.
- [3] M.I.G. Bloor, M.J. Wilson & H.Hagen: “The Smoothing Properties of Variational Schemes for Surface Design”, CADG, 1995.
- [4] P.Bosinco, G. Durand, J.Goussard, A. Lieurtier, A. Massabo “Complex Shape Modifications”, IDMM’98 – Compiègne (France)- May 1998 MATRA DATAVISION DS.
- [5] T. De Marino, B. Falcidieno, F. Giannini, S. Hassinger, Jovcharova “Feature-based Modeling by Integrating Design and Recognition Approaches”, Computer Aided Design, vol. 26 No.8, August 1994.
- [6] Andersson, K.E.R “Surface with Prescribed Curvature I”, Computer Aided Geometric Design (1993) 431-452.
- [7] Andersson, K.E.R, “The Direct Modification of Surface Curvature in Car Body Design., in Progresss in Industrial Mathematics” at ECMI 94, Helmut Neunzert (De.), John Wiley & sons and B. G. Teubner, 1996.
- [8] Montserrat Mata Dumenjó, Pere Brunet, “Dictionary of Terms: FIORES (Formalization and Integration of an Optimized Reverse Engineering Styling Workflow)” IRI-DT 9709 UPC Nov -97.
- [9] Montserrat Mata Dumenjó, Pere Brunet “Resultat enquestes.FIORES Interview Phase: Questions and Answers (Taurus and Eiger)”, IRI-DT 9715 UPC, Novembre 1997.
- [10] Montserrat Mata Dumenjó, Àlvar Vinacua Pla, Pere Brunet Crosa, “FIORES Task 2: Formalization and Fundamentals: INFLECT-I : Control of Inflections-I” IRI-DT 9815 UPC Dec-1998.