

**interdisciplinarietat en la recerca**

## **SOSTENIBILITAT EN EL TRANSPORT: OPTIMIZACIÓ DEL CONSUM DE COMBUSTIBLE**

**Jordi Llumà<sup>\*</sup>, Manuel Manzanares<sup>\*\*</sup>**

Escola Universitaria d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona (EUETIB)

Edifici ADF

Urgell 187

08036 – Barcelona, Spain

Web page: <http://www.euetib.upc.es/>

jordi.lluma@upc.edu<sup>\*</sup>, manolo.manzanares@upc.edu<sup>\*\*</sup>

### **RESUM**

La reducció del dispendi d'energia d'un vehicle es pot minimitzar mitjançant un ús adequat del sistema propulsor. El mètode desenvolupat implica l'elaboració d'un model numèric del vehicle i una descripció matemàtica de la via (perfil altimètric i traçat) per poder-lo simular en un ordinador. Amb un mètode d'optimització numèrica es pot cercar el mínim de consum d'energia i la millor relació de transmissió possible. El mètode va ser comprovat en el vehicle "Centenari" (un prototipus de vehicle de baix consum), assolint una reducció del 34% en el consum de gasolina, i permetent al vehicle recorre 1066 km amb només 1 litre de benzina.

### **1. INTRODUCCIÓ.**

Als darrers anys s'ha fet un gran esforç en la indústria del transport per reduir el consum d'energia mitjançant millores en el disseny: reduint el pes, millorant l'aerodinàmica, l'eficiència dels motors, etc. Malgrat això, les emissions de gasos d'efecte hivernacle que provenen del transport s'han incrementat un 18% en la mitjana de la UE des de 1990 fins 1999 [1].

L'entrada en vigor del protocol de Kyoto [2] (que implica una reducció de les emissions de CO<sub>2</sub> i altres gasos d'efecte hivernacle), la reducció de les reserves de combustibles fòssils, el seu increment en la demanda i la previsió que la demanda superi aviat a la producció, imposen una dràstica reducció del malbaratament energètic.

Curiosament l'esforç fet per reduir el consum rarament va més enllà de la construcció del vehicle. Només algunes campanyes institucionals o notes tècniques elementals dels operadors de transport s'han publicat.

El present treball vol col·laborar a superar aquest dèficit, desenvolupant un procediment sistemàtic per a optimitzar l'ús del motor i la transmissió. El mètode ha estat comprovat en un sistema simplificat: l'estratègia d'ús del motor del "Centenari" (un prototipus de vehicle de baix consum de combustible, figura 1) a la "Shell Eco Marathon" **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (la cursa més important de vehicles de baix consum).



*Figura 1.- Vehicle de baix consum “Centenari”*

La cursa consisteix en recórrer 25.272 km (7 voltes al circuit Paul Armagnac, Nogaro, França) en menys de 50 min 34 s, forçant a una velocitat mitjana mínima de 30 km/h. El guanyador serà el vehicle que menys combustible consumeixi durant la cursa.

Una tècnica habitual per reduir el consum de combustible durant la cursa és emprar el vehicle en mode híbrid, un motor de combustió interna genera l'energia que s'acumula al vehicle, per posteriorment recuperar-la. Quan la reserva energètica del vehicle és prou alta, el motor s'atura i roman aturat fins que la reserva energètica és menor que un cert nivell. Llavors el motor s'arrenca de nou per acumular energia. Però en aquest cas el vehicle acumula energia en forma d'energia cinètica, que s'empra per superar les pujades del circuit i reposar les pèrdues d'energia. Cada vegada que s'arrenca el motor implica una pèrdua de combustible, doncs la benzina gastada en les primeres explosions no repercuteix en una acceleració del vehicle. Com a conseqüència, és important minimitzar el nombre de cops que el motor s'engega.

Per una altra banda, els motors de combustió interna tenen molt poca eficiència a baixes revolucions, no sent recomanable reduir massa la velocitat mínima a que s'ha d'arrencar el motor. Finalment, velocitats elevades el vehicle impliquen majors pèrdues energètiques, que aconsellen no assolir velocitats elevades.

Llavors, la pèrdua de combustible al arrencar el motor aconsella reduir al màxim el nombre d'arrancades, però la poca eficiència a baixes revolucions i l'increment de pèrdues d'energia a velocitats elevades aconsella no variar gaire la velocitat, i en conseqüència, arrancar el motor molt sovint.

Òbviament, hi ha un punt de treball òptim entre els dos comportament, que comportarà el consum mínim. Aquest punt depèn d'un conjunt de factors com: la corba de potència del motor, la corba de consum del motor, la corba d'eficiència de l'embragatge, la relació de transmissió, les pèrdues d'energia del vehicle, el perfil del circuit, etc.

## **2. MODELITZACIÓ**

Com el “Centenari” és un vehicle força simplificat, amb una relació de canvi fix i sense regulació de gas, l'equació per modelar-lo també ho és:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = e \cdot f \cdot \frac{Pot}{m \cdot v} - g \cdot \left\{ \mu \cdot m + \sin \left[ \arctan \left( \frac{dy}{dx} \right) \right] \right\} - a_0 \cdot v - a_1 \cdot v^2 - a_2 \cdot \frac{v^2}{R}$$

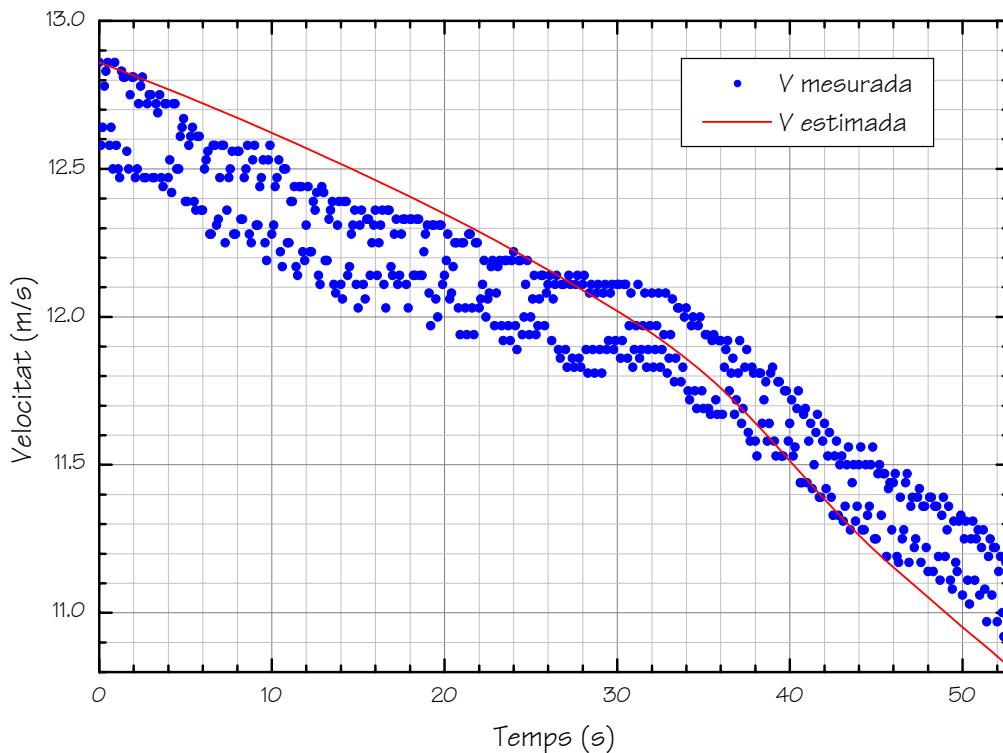
on  $v$  és la velocitat del vehicle,  $t$  el temps,  $e$  l'eficiència de l'embragatge,  $f$  la relació de transmissió,  $Pot$  la potència instantània del motor,  $m$  la massa total del vehicle (incloent passatge),  $g$  la gravetat,  $y$  l'alçada,  $x$  la posició,  $R$  el radi de curvatura de la trajectòria i  $\mu$ ,  $a_0$ ,  $a_1$  i  $a_2$  paràmetres de pèrdua del vehicle (fricció, aerodinàmica, gir, etc.) que cal ajustar.

La massa del vehicle ( $m$ ) s'obté mitjançant pesada, l'eficiència de l'embragatge ( $e$ ) i les corbes del motor ( $Pot$  i consum) s'extreuen dels respectius bancs d'assajos instrumentats [4]-[7], les dades del traçat ( $y$  i  $R$ ) mitjançant tècniques topogràfiques [8]. Com les dades obtingudes no tenen una expressió matemàtica clara, aquestes s'ajusten a un conjunt de polinomis, imposant continuïtat de la funció i la derivada i una longitud mínima de la corba.

Els paràmetres de pèrdua del vehicle ( $\mu$ ,  $a_0$ ,  $a_1$  i  $a_2$ ) s'extragueren minimitzant la discrepància quadràtica entre la velocitat calculada en la simulació ( $\tilde{v}$ ) del vehicle i les dades mesurades per l'adquisició de dades ( $v$ ) durant dues voltes de prova.

$$F = \sum_i (v_i - \tilde{v}_i)^2$$

Per evitar distorsions degut a errades en la modelització del grup propulsor, només es tingueren en compte aquells trams on el motor no funcionava [9]. El resultat obtingut es pot veure a la figura 2.



**Figura 2.-** Velocitat mesurada (punts) i estimada (línia) per a un tram del circuit.

### 3. OPTIMIZACIÓ

Una vegada modelat el sistema, es simulen centenars de condicions d'operació (cada simulació dura dècimes de segon), on es variens els paràmetres a obtenir, velocitat mitjana i relació de transmissió (doncs la velocitat mínima ve imposada al haver de complir la velocitat mitjana de 30.6 km/h).

Els resultats obtingut van convergir sobre un punt amb una relació de transmissió de 0.092, una velocitat màxima de 43.8 km/h i un consum estimat de 1041 km/L de benzina. Al implementar la relació de transmissió i donar instruccions a la pilot, el resultat fou de 1066 km/L de gasolina amb una velocitat mitjana de 30.5 km/h, molt similar a la estimada. La millor marca prèvia corresponia a 640 km/L (un 38% més de consum).

### 4. CONCLUSIONS

L'estratègia de conducció obtinguda mitjançant una simulació i minimització del consum ha permès obtenir un estalvi del 38% sobre una conducció intuïtiva encarada a minimitzar el consum. El model desenvolupat és suficientment adequat com per obtenir una discrepància en el resultat de només un 1 %.

Aquesta metodologia es podria estendre fàcilment a vehicles de major complexitat amb traçat i parades prèviament conegudes, com per exemple: tren, metro, tramvia, vaixells i avions.

### REFERÈNCIES.

- [1] J.L. Míguez et al. "*Review of the energy rating of dwellings in the European Union as a mechanism for sustainable energy*". Renewable and Sustainable Energy Reviews 2006;10:24-45
- [2] Kyoto protocol. Third session of the conference of the parties to the UNFCCC in Kyoto, Japan; 1997.
- [3] Shell Eco Marathon 2004 "*Reglamento*", Shell España, S.A., [www.shell.com](http://www.shell.com)
- [4] P. Enríquez, A. Pelarda, "*Modelización de un inyector para un motor de combustión interna*", Projecte Final de Carrera EUETIB (UPC) 2004.
- [5] J. Fernández, R. Gil, "*Desarrollo de un banco de frenado con secuencia programable para el ensayo y puesta a punto de motores de combustión interna*", Projecte Final de Carrera EUETIB (UPC) 2004.
- [6] S. Juan, D. Santos, "*Placa electrónica de control genérica para motores de corriente continua*", Projecte Final de Carrera EUETIB (UPC) 2004.
- [7] A. Calafat, D. del Ojo, "*Desarrollo de la electrónica de un sistema de frenado para motores térmicos con secuencia programable*", Projecte Final de Carrera EUETIB (UPC) 2003.
- [8] <http://www.tim-upsa.fr>
- [9] O. Sala, "*Optimització de l'estratègia de cursa per la Shell Eco-Marathon*", Projecte

Final de Carrera EUETIB (UPC) 2004.