



# Models informàtics del temps a la muntanya i les seves aplicacions

• 17 de març del 2016 a les 20.00 h  
• Sala d'actes del Centre Cultural La Llacuna, Andorra la Vella



## Alan Ward i Koeck

*Doctor en Societat de la Informació i el Coneixement per la UOC, i professor de l'Escola Andorrana i coordinador de la secció de noves tecnologies de la SAC*

## ▲ Currículum

Alan Ward i Koeck és enginyer en Informàtica, llicenciat en Estudis d'Àsia Oriental, màster en Programari Lliure, bàtxel en Dret, màster en Fiscalitat i doctor en Societat de la Informació i del Coneixement.

És professor d'informàtica i d'electrònica al centre de batxillerat de l'Escola Andorrana des de la creació d'aquest centre, el 1995. Ha estat professor consultor de l'Escola d'Informàtica i Gestió de la Universitat d'Andorra i de la Universitat Oberta de Catalunya.

Els seus àmbits de recerca actuals inclouen la seguretat informàtica i la computació paral·lela, sobretot per les seves aplicacions al càlcul dels efectes del canvi climàtic, així com diferents aspectes de la història d'Andorra. També s'interessa per la cultura dels països de l'Àsia oriental.

Les seves publicacions més recents inclouen:

ALAN WARD "Andorra i els petits estats d'Europa davant dels reptes del comerç electrònic". Universitat d'Estiu de Prada, Conflent, Agost 2015.

ALAN WARD; JOSEP JORBA "Planning passive snowdrift reduction on high-altitude roads with lateral obstacles to wind flow" SIRWEC 17th International Road Weather Conference, Andorra, January 2014.

ALAN WARD; JOSEP JORBA "Harmonic buffeting in a high-altitude ridge-mounted triblade Horizontal Axis Wind Turbine". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Volume 121, October 2013, pages 106-115.

ERIC JOVER; ALAN WARD; ULF BÜNTGEN "Linking long-term temperature variability to population density in Andorra (Central Pyrenees)". *Population and Environment*, October 2012.

ALAN WARD; JOSEP JORBA "An iterative method for the creation of structured hexahedral meshes over complex orography". *Applied Mathematics and Computation*, Volume 218, Issue 7, 1 December 2011, pages 3847-3855.

ERIC JOVER COMAS; ALAN WARD; ALAN WARD LEACH "Els Andosins en el context cultural de la 2a Guerra Púnica". *Papers de Recerca Històrica*, Societat Andorrana de Ciències, vol. 6, 2010.

La xerrada d'avui té un doble vessant. En primer lloc, és una manera d'informar el públic en general del contingut de la meua tesi doctoral, que vaig tenir el plaer de defensar el mes de setembre passat sota la direcció del Dr. Josep Jorba. Per als que vulguin tenir accés al document original de la tesi, està disponible tant en format digital<sup>1</sup> (*Tesis en Xarxa*, PDF) com també en suport físic<sup>2</sup> ([www.amazon.com](http://www.amazon.com)).

D'altra banda, també és una manera de respondre a una sèrie d'inquietuds que hom pot tenir davant de l'estat actual i futur de certes activitats humanes a la muntanya. Una inquietud és l'ús dels recursos disponibles (aigua, energia elèctrica) per al desenvolupament d'activitats com l'esquí. En l'estat actual de les coses, hi ha un marge per optimitzar la gestió dels recursos (figura 1), cosa que redunda no només en la millora de la consciència ecològica, sinó també en unes conseqüències favorables del punt de vista econòmic.

Una altra inquietud que podem tenir davant de fenòmens com el canvi climàtic "davant del qual les zones de muntanya es troben entre les més sensibles" és saber si podem ni tan sols continuar amb les activitats actuals. La situació pot ser especialment crítica en estacions d'esquí situades a baixes cotes, com la majoria de les estacions catalanes però també les andorranes de menys altitud. En aquest context, convé preguntar-se si val la pena fer inversions importants, per exemple en mitjans d'innivació artificial, i quins efectes podran tenir.

Abans de continuar, es pot precisar que l'abast d'aquest treball és limitat a models meteorològics que pertanyen al domini del temps, i ja no del clima. Es tractaran, doncs, fenòmens de relativa curta durada (hores, dies), sobre una àrea geogràfica també limitada. La nostra idea és centrar-nos en un àmbit que va des dels centenars de metres fins a un quilòmetre -o sigui, a l'escala d'una vall de muntanya individual.

Aquests models han de servir per representar la circulació dels vents, així com la caiguda de neu. Es presenten com a eina de previsió que es pugui fer servir abans de fer una intervenció humana, amb l'objectiu d'evitar incórrer tant en despeses innecessàries com en actuacions potencialment destructives per al medi ambient. Finalment, també es poden contemplar com a eines de previsió de riscos naturals.

S'estructurarà aquesta intervenció al voltant de tres idees: en primer lloc, es presentarà de manera simplificada el concepte de model informàtic. Després, es farà un resum dels elements que ens caldran per poder modelar el temps. Finalment, es presentaran aplicacions concretes de l'ús dels models informàtics.

### **Què és un model informàtic?**

L'ús principal d'un model informàtic és descriure la realitat. Per aquest motiu, abans de llençar-se a construir un model, cal començar per assegurar-se conèixer bé la realitat física que es



*Figura 1: ús no òptim dels recursos disponibles*

vol representar i intentar-la entendre de la manera més aprofundida possible. Una vegada coneguda, es poden convertir els seus paràmetres en equacions matemàtiques. Finalment, la tercera etapa consisteix a dissenyar el model informàtic propi. És en aquesta última etapa en què han d'intervenir consideracions com la quantitat d'informació que caldrà tractar, la complexitat del càlcul i, en general, el cost econòmic dels mitjans de computació adients per desenvolupar i executar el model.

Per donar-ne un exemple, considerem l'exemple molt conegut del pèndol, en la variant del pèndol esmorteït (figura 2). Aquest sistema físic es pot descriure a través dels seus paràmetres:

- Llargada  $L$
- Massa  $m$
- Angle  $\theta$  respecte a la vertical
- Velocitat  $v$
- Acceleració  $a$ , que pot ser produïda per
  - La força de la gravetat
  - Altres forces, com la fricció

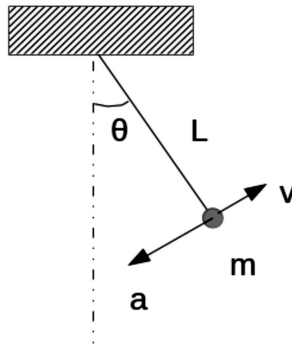


Figura 2: un pèndol esmorteït amb els seus paràmetres principals

Una vegada coneguda la realitat física del pèndol podem passar a crear-ne un model matemàtic.

Per fer-ho farem servir la segona llei del moviment (de Newton):  $F = m \cdot a$

En tractar-se d'un sistema esmorteït, caldrà fer intervenir la fricció a través de la llei d'Stokes:

$$F_R = -k \cdot v$$

La força principal que s'exerceix sobre el pèndol és la gravetat:  $F_g = -m \cdot g \cdot \sin(\theta)$

Podem convertir l'acceleració  $a$  i la velocitat  $v$  en les expressions equivalents de  $\theta$ :  $a = L \cdot \ddot{\theta}$  i  $v = L \cdot \dot{\theta}$

Amb això, ja podem escriure l'equació del moviment del pèndol:

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{L} \sin(\theta) - \frac{k}{m} \dot{\theta}$$

Passant ara a l'aspecte informàtic del model, es pot escriure un curt programa com aquest en el llenguatge Python (figura 3) per fer la modelització del pèndol. En essència, el que es fa és

prendre la posició del pèndol en un instant  $t$  donat com a base per poder calcular la seva nova posició al cap d'un interval de temps molt curt  $dt$ . Iterant aquest procediment, es pot arribar a estimar la posició del pèndol al llarg d'un interval de temps.

```
dt = 0.01
ft = 10.0

t = 0.0
theta = 0.5
theta_p = 0.0
while (t < ft):
    t = t + dt
    theta_s = -(g / L * math.sin(theta) + k / m * theta_p)
    theta = theta + dt*theta_p + 0.5*dt*dt*theta_s
    theta_p = theta_p + dt*theta_s
    print theta, theta_p, theta_s
```

Figura 3: breu extracte d'un model informàtic simple d'un pèndol esmorteït

A condició de fer els càlculs amb suficient precisió, i emprant un interval de temps suficientment breu, es pot arribar a resultats com aquesta trajectòria del pèndol esmorteït (figura 4), en què s'aprecia que el període (temps entre crestes) del pèndol es manté més o menys constant, tot i que l'amplitud del moviment es va reduint a causa de la fricció.

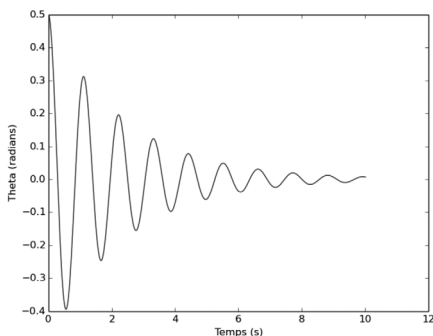


Figura 4: gràfic dels resultats del model anterior

Si analitzem el model anterior, es pot considerar el bucle principal de càlcul com a base del tractament informàtic (figura 5). Al seu damunt, podem situar els paràmetres concrets que considerarem per a aquell sistema. El flux principal d'informació va d'esquerra a dreta, amb l'entrada dels *inputs* o dades d'entrada (situació inicial) i la producció d'*outputs* o sortides (evolució calculada del sistema). És important notar la possibilitat d'un bucle de retroacció: una vegada obtinguts els resultats del model, és important tornar-los a comparar amb els valors coneguts a partir de l'observació directa i del coneixement que puguem tenir sobre el sistema físic original. En cas de detectar discrepàncies, s'haurà de tornar enrere i millorar el model informàtic.

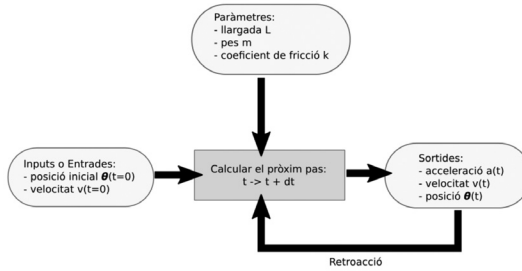


Figura 5: elements del tractament informàtic

Tornant al càlcul d'un sistema de vents i/o precipitacions de neu, es poden preveure dues grans categories de models que es faran servir per descriure els fluids que intervindran. D'una banda, en un *model eulerià* el que es farà és considerar el fluid com un conjunt. Se'n mesuren la velocitat, pressió o altres paràmetres en una sèrie de punts fixos. De l'altra, en un *model lagrangià* es considera el moviment de cada parcel·la del fluid de manera individual. Conceptualment, és com si en el primer cas l'observador se situés en una posició donada i examinés el que succeeix davant del seu nas. Per contra, en un model lagrangià és com si l'observador acompanyés el moviment de cada parcel·la de fluid des del punt de vista de la mateixa parcel·la, tal com seria la tècnica de la càmera subjectiva en una filmació.

En el cas del transport de la neu, es tracta d'un *sistema dual*, que consisteix en la coexistència d'un fluid portador (l'aire o el vent) més una matèria en suspensió (la neu). Això implica la importància, en una situació de muntanya, de considerar el moviment del vent i els seus efectes sobre les trajectòries de la neu. Ara bé, per fer el càlcul del moviment del fluid portador, resulta més pràctic implementar un càlcul eulerià. Per contra, per modelar el moviment de les parcel·les de neu, un càlcul lagrangià resulta més adequat (figura 6).

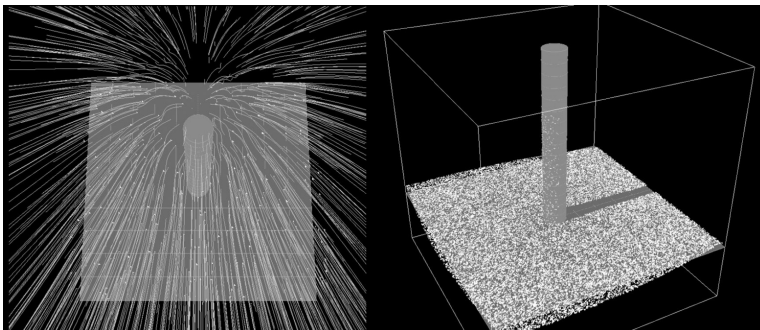


Figura 6: exemple de càlcul de la caiguda de parcel·les de neu al voltant d'un obstacle fix, que podria ser un tronc d'arbre. Font: Alan Ward i Koeck

## Què necessitem per modelar el temps?

En aquesta secció ens caldrà adreçar-nos sobretot als *inputs* del sistema descrit a la figura 5: necessitarem, així doncs, a la vegada una font de dades orogràfiques que descriu la forma del terreny i una font de dades meteorològiques. Aquestes últimes (dades de temperatura, vent, humitat) constituiran la descripció de la situació inicial a partir de la qual després es calcularà l'evolució mitjançant el model.

Pel que fa a les dades orogràfiques, avui en dia existeixen dades fruit de l'ús de sistemes de teledetecció des de l'espai. Es pot citar especialment les missions SSRT de l'Space Shuttle americà,<sup>3</sup> que han recollit una cobertura comprensiva d'altituds del globus terrestre des d'òrbita baixa emprant un radar. Pel que fa al Pirineu, es pot observar el detall de la topografia en tres dimensions generada a partir d'aquestes dades (figura 7).

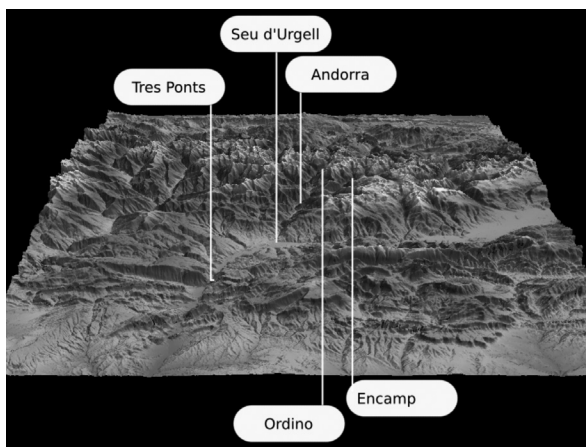


Figura 7: model tridimensional d'una part del Pirineu central a partir de dades subministrades pel SSRT

Pel que fa a les dades meteorològiques, la qüestió és més complexa. La majoria de les estacions de mesura disponibles es troben a cotes d'altitud baixes, en els fons de les valls. Però en aquesta situació, pateixen la influència de la mateixa forma de la vall, que té tendència a canalitzar l'aire en direcció de pujada o bé de baixada per la vall. Així, aquestes estacions responen molt bé quan la direcció del vent regional està alineada amb la vall on se situa l'estació, però quan aquesta direcció és ortogonal a penes es registren valors de vent.

En aquest sentit, cal dir que manquen dades a l'aire lliure, o sigui dades obtingudes en l'espai damunt del relleu. La seva obtenció és difícil i costosa, ja que la tècnica estàndard per fer-ho és encara l'ús de globus sonda, cosa que naturalment en limita bastant l'ús.

Tot i això, es pot observar que s'han produït avanços importants en anys recents a Andorra, ja que el nombre d'estacions meteorològiques -respecte d'estacions automàtiques- ha anat

creixent força. Ara bé, en la gran majoria es tracta d'estacions de fons de vall, o en proximitat immediata de l'activitat humana, amb la qual cosa aquesta mateixa activitat pot desvirtuar les lectures obtingudes.

Finalment, una vegada que s'està en possessió de les dades d'orografia i meteorològiques necessàries, encara falta tractar la qüestió del càlcul informàtic i de la seva dimensió. La primera acció que es du a terme és dissenyar la malla de càlcul, en tres dimensions (figura 8). Aquesta és una subdivisió regular de l'espai en una sèrie d'elements amb forma aproximadament cúbica, i situats entre la frontera inferior de la malla (l'orografia) i un nivell superior escollit.

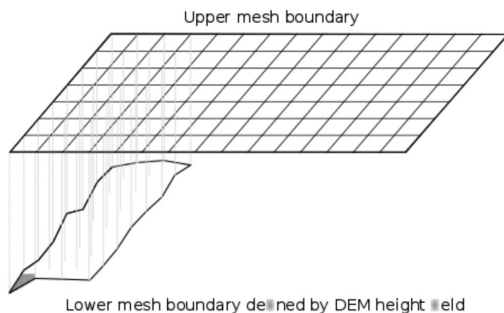


Figura 8: malla de càlcul 3D

Partint d'una malla de dades orogràfiques del tipus subministrat pel projecte SSRT, s'obté una descripció de la frontera inferior en forma d'una graella de 1.201x1.201 punts d'alçada, que cobreixen una àrea corresponent a un grau de latitud x un grau de longitud. A la latitud del Pirineu, això correspon a un rectangle d'uns 83,4 km en sentit est-oest i de 111,3 km en sentit nord-sud. L'obertura mínima de la malla és doncs d'uns 69,5 m, fet que implica que per tal d'obtenir uns elements de volum de dimensions poc deformades, la separació vertical entre capes de la graella també hagi de ser de dimensions semblants. Si es considera el volum situat entre 1.000 i 5.000 m per sobre del nivell de mar, acabem doncs amb unes 60 capes verticals en la graella.

O sigui, caldrà treballar amb una graella de  $n = 1200 \times 1200 \times 60 = 86.400.000$  elements. Per a cada element de volum, es tindran en compte pel cap baix cinc paràmetres escalars: un per a la densitat, tres per a la velocitat de l'aire en aquell punt, i l'últim per a la densitat de neu. Tot plegat, el que s'està fent és en realitat resoldre un sistema d'equacions, en què cada equació pot comportar fins a 432 milions d'incògnites, i hi ha un total de 432 equacions dins el sistema. Així, s'entén que des del punt de vista informàtic s'està dins el domini en què cal fer servir molts ordinadors en paral·lel per efectuar la computació, en el marc del que s'anomena *cluster computing* o bé *grid computing* segons les tècniques exactes que es facin servir.

Anteriorment, aquest tipus de recursos informàtics resultaven súmmament cars. Tot i això, hi ha en l'actualitat diferents solucions tècniques que permeten abastar el problema. Una és l'ús compartit d'ordinadors de despatx, que es fan treballar de la manera normal per a tasques d'ofimàtica durant el dia i que es transformen en ordinadors de càlcul durant la nit. Una altra és

l'ús de grans clústers previstos per executar tasques de modelització, com el *Marenostrum* de la Universitat Politècnica de Catalunya<sup>4</sup> (figura 9).

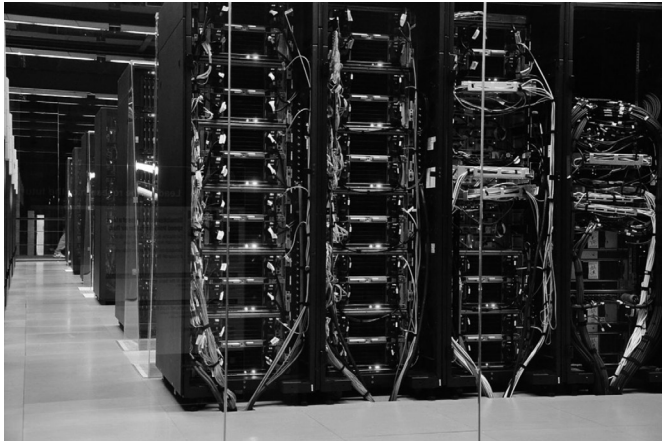


Figura 9: ordinador 'Marenostrum'. Font de la imatge: V. Carceler (WikiMedia), 2012

Tampoc no es poden obviar solucions com la construcció de clústers de càlcul més petits per treballar sobre models que concerneixin les àrees físicament més reduïdes o episodis meteorològics de durada més curta. En aquest sentit, últimament hi ha un interès creixent per l'ús dels processadors gràfics (GPU, o Graphical Processing Unit) que formen part de targetes gràfiques de gamma alta per a la realització dels càlculs paral·lels que es necessiten per a aquest tipus de model.

Finalment, també s'ha de considerar el programari emprat. Avui en dia, el *toolkit* ("caixa d'eines") del projecte OpenFOAM<sup>5</sup> de l'OpenFOAM Foundation és reconegut per ser en primer lloc de codi obert. Aquest fet té importància en un entorn de recerca, ja que permet que el codi informàtic sigui examinat i verificat *per molts ulls*: es pot auditar en profunditat, d'una manera que no sempre resulta possible en l'àmbit del programari comercial. S'entén que els seus fabricants no tenen gaires incentius per deixar examinar el funcionament intern dels seus productes. El codi obert també permet la seva adaptació fàcil a diferents situacions d'ús, i es pot optimitzar per a una varietat d'arquitectures d'ordinador "entre les quals es troben els PC normals" amb un cost d'adquisició relativament baix.

### Exemples d'aplicació

Un primer exemple d'aplicació dels models informàtics a la muntanya és la instal·lació d'un aerogenerador. Tots hem vist aquelles fileres de màquines enormes, instal·lades sovint al llarg de les crestes al Prepirineu o en altres indrets relativament plans. De fet, un dels llocs en què més s'han instal·lat és a les grans planúries del nord d'Alemanya o dels Països Baixos, o també en instal·lacions de desenes de màquines situades en aigües poc profundes del mar a prop de



Dinamarca. Els avantatges d'aquesta opció són poder fer-ne la instal·lació en llocs en què hi ha poca habitació humana i una gran influència del vent.

Pel que fa a l'orografia més pronunciada de la muntanya pròpiament dita, també es pot contemplar la instal·lació d'aerogeneradors en cims o serralades de muntanya. En aquella situació, es beneficiarien de l'efecte del relleu, que concentra i augmenta la velocitat del vent al pas per les serralades, al mateix temps que la disminueix al llarg de les valls. En un model informàtic de la conca superior d'Arcalís (figura 10), s'observa clarament aquesta diferenciació, amb els vents més forts (superiors a la mitjana regional) per damunt de les crestes entre el port del Rat i el port de Creussans.

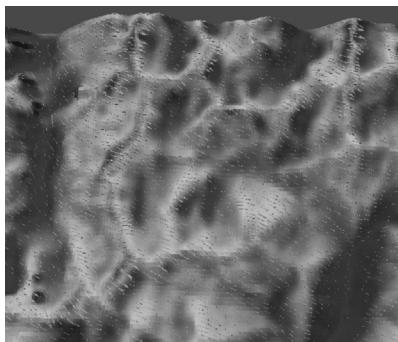


Figura 10: part superior del domini esquiable d'Arcalís (Ordino, Andorra). Vent del nord-oest. A l'esquerra, la vall de Soulcem (França), i al centre, a dalt, els estanys de Tristaina (Andorra). Font: Alan Ward i Koeck

Ara bé, els aerogeneradors no han estat concebuts per treballar en aquesta situació, sinó en plana. Per aquest motiu, és interessant establir un model informàtic més detallat de la circulació al voltant de les crestes més abruptes que es presenten a l'alta muntanya. El resultat és aclaridor (figura 11): a més del component horitzontal del vent, ja esperat, es produeix un altre component, vertical. La seva situació depèn del lloc en què es mesura, però també de la forma exacta de l'orografia i de la direcció del vent -amb la qual cosa es fa difícil trobar un punt concret d'una serralada en què no es produeixi aquest component vertical.

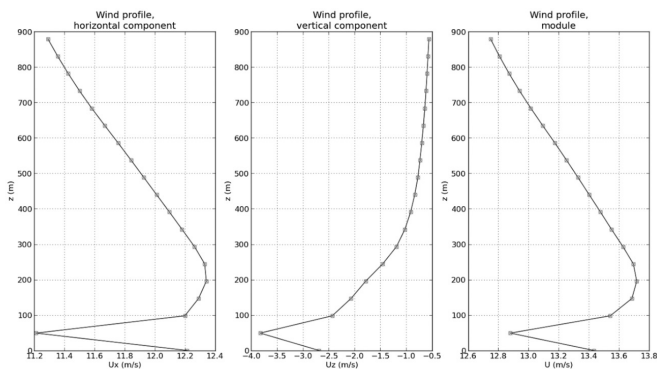


Figura 11: perfil vertical del vent en una cresta, components horitzontal, vertical i mòdul. Model informàtic. Font: Alan Ward i Koeck

Pel que fa als efectes, s'ha construït també un model informàtic d'un aerogenerador. Aquest mostra clarament (figura 12) que un aerogenerador sotmès a un vent que no sigui perfectament horitzontal ja no es troba en la situació de funcionament per a la qual es va dissenyar. Així, les tres aspes de l'aerogenerador típic no es poden equilibrar en el funcionament i apareixen fenòmens cíclics. El més preocupant és pel que fa al parell al voltant de l'eix vertical del generador, que té tendència a forçar contra el mecanisme de direcció "el que apunta el cap del giny contra el vent". Aquest fet ens fa preveure una usura accelerada d'aquest mecanisme. També es poden observar (figura 12, corba gruixuda inferior) variacions cícliques en la producció d'energia elèctrica, que en tot cas es troben inferiors als valors esperats per una velocitat del vent donada per aquell model d'aerogenerador.

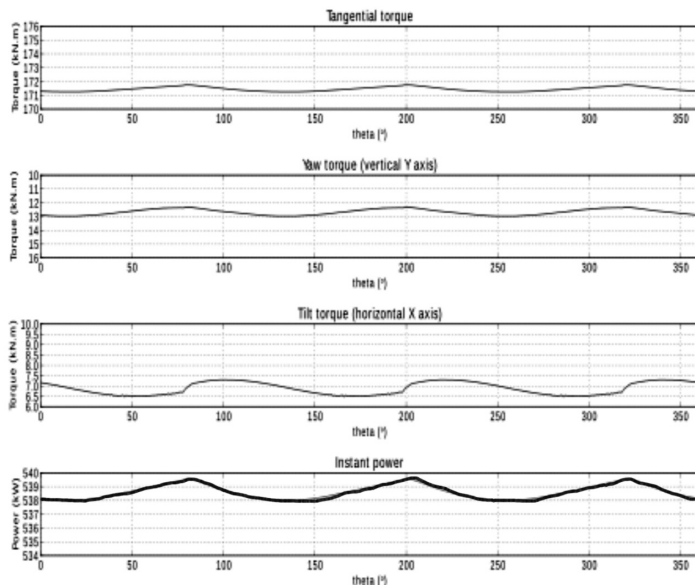


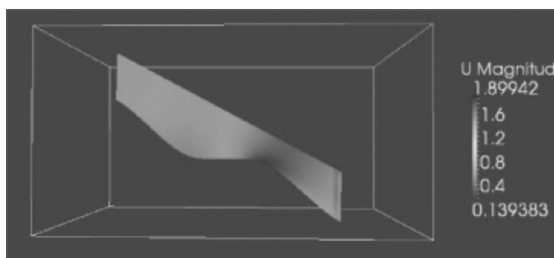
Figura 12: aparició d'efectes cíclics en els parells aplicats a un aerogenerador. Font: Alan Ward i Koeck

Un segon exemple d'aplicació del model informàtic és relatiu a la circulació de vehicles en condicions de caiguda de neu. L'activitat econòmica d'un país com Andorra requereix facilitar el pas del trànsit, sobretot en moments en què es pot produir una acumulació de neu a l'hivern. Ara bé, cal tenir en compte la combinació entre la caiguda primària de la neu (dipòsit inicial) i els efectes del vent (transport secundari), que té tendència a formar congestes. Aquesta formació es confirma a través dels models informàtics. Així, en la figura 13 s'observa una carretera típica de muntanya, situada en un tall fet a través del talús de la muntanya. En aquest model, el vent s'ha considerat en direcció de baixada des de l'esquerra al llarg del talús.

Es produeixen dues zones d'interès:

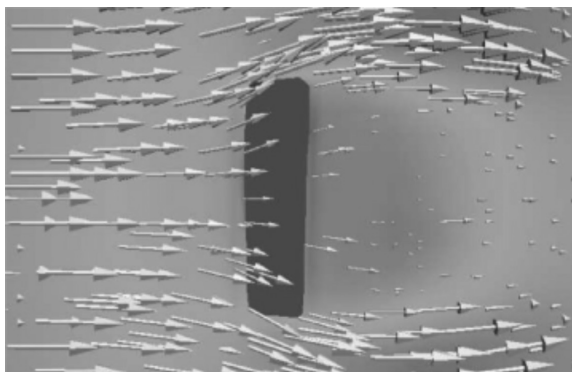
- En primer lloc, una depressió (color blau) al costat interior (muntanya) de la carretera, zona en què el flux d'aire s'alenteix i, per tant, en què hi ha una tendència a produir-se el dipòsit de més quantitat de neu.
- En segon lloc, una zona en què l'aire s'accelera (color vermell) al costat exterior (vall) de la carretera. En aquesta zona es fa més difícil que la neu es dipositi originàriament i se'n facilita l'evacuació pel vent.

En resum, hom reconeix la típica situació d'una carretera de muntanya, en què s'ha produït una congesta a la part interior que bloqueja parcialment la circulació per la via, mentre que resulta possible o fins i tot facilitada en la part exterior.



*Figura 13: carretera de muntanya sotmesa a vent provinent de l'esquerra de l'observador*

Una vegada validat a través de la comparació amb situacions conegudes, el model informàtic es pot estendre a altres situacions com ara la presència de vehicles aturats a la via. En el cas de vehicles de grans dimensions com autocars, la seva presència actua amb el flux d'aire i modifica el patró de formació de les congestes (figura 14). Segons la situació del vehicle a la via, es pot produir un increment de la innivació a la part que no ocupa i dificultar així la circulació de vehicles més petits que el vulguin passar.



*Figura 14: patró de vents al voltant d'un autocar aturat*

Aquesta tècnica es pot aplicar també a estructures de l'enginyeria civil. Per exemple, el pont situat a la parròquia de la Massana que dóna accés al túnel de les Dos Valires està "molt correctament" dotat de barreres que protegeixen els vianants que hi hagin de passar. Ara bé, aquestes barreres també interfereixen amb el flux d'aire, que, en aquella localització, solen venir del nord durant l'hivern i que travessen el pont des de l'esquerra a la figura 15. Actuant de la mateixa manera que les barreres de neu (*snow fences*) emprades com a manera passiva de modelar les congestes, aquestes barreres de protecció creen una zona de baixes velocitats del vent al mig del pont que resulten en l'acumulació progressiva d'un gruix de neu sobre la calçada (línies blaves). Si, posteriorment, es programa un període de vents més elevats en el model informàtic, el model ens mostra que hi ha erosió i desplaçament pel vent de les quantitats dipositades per damunt de les mateixes barreres, però que el gruix de la congesta formada al centre de la calçada es manté (línies gruixudes).

Aquesta situació es podria evitar millorant la forma de les barreres de protecció dels vianants, de tal manera que s'acceleri la velocitat del vent quan passa el pont en comptes de disminuir-la.

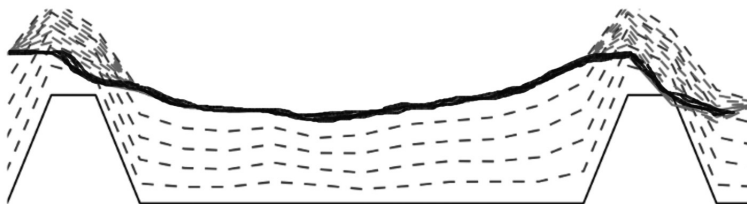


Figura 15: acumulació de neu sobre les vies d'un pont

Finalment, els models informàtics també permeten millorar la gestió de les pistes d'esquí, tema important en un país com el nostre. En la figura 1 s'havia començat per presentar una imatge típica de principis de temporada d'esquí. Aquesta ha estat presa a Arcalís (Ordino), però podria haver estat en qualsevol altre domini esquiable del país. Durant els primers mesos de la campanya -novembre i principis de desembre- sovint ens trobem en una situació de vents del nord-est. Aquests vents, d'origen polar i que han passat sobretot damunt del continent europeu, solen ser freds però relativament secs. Per aquest motiu no es produeixen grans nevades que permetin començar la temporada amb certa acumulació de neu sobre les pistes. Potser per sort, les baixes temperatures permeten emprar els canons de neu per fer neu de cultiu.

Aquí es presenta, però, una situació diferenciada segons les característiques de la mateixa pista. En el cas de la figura, es pot fer el model informàtic de la zona de més avall de les pistes d'Arcalís, sotmesa a un vent del nord i nord-est. El resultat de la simulació (figura 16) mostra clarament que en aquella configuració el vent dominant té tendència a pujar directament les pistes, a contrapendent. Naturalment, això dificulta la tasca dels canons de neu -i, sobretot, de les llances-, que operen generalment cap avall de la pendent.

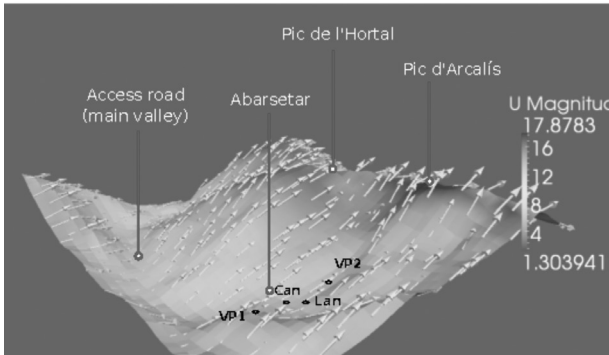


Figura 16: camp de neu d'Arcalís, sotmès a un vent de direcció nord i nord-est

En resum, aquesta situació pot ser un factor a tenir en compte en el moment de fer el disseny de pistes d'esquí "conjuntament, és clar, amb els altres factors més propis d'aquella activitat". Existeixen altres tècniques per investigar el posicionament òptim dels canons de neu, entre d'altres, emprar canons mòbils (figura 16), tal com s'ha fet en aquest precís indret. Ara bé, l'ús ve condicionat per la presència d'una instal·lació prèvia que permeti aportar la barreja d'aire i aigua com també el subministrament elèctric necessari. Aquestes instal·lacions suposen un cost important d'infraestructura, motiu pel qual es proposa l'ús de les tècniques del model informàtic com a complement més econòmic i més flexible en el procés de disseny de la pista.

## Conclusions

En aquesta exposició hem vist que la construcció d'un model informàtic és un procés que comença per un bon coneixement de la realitat física del sistema i passa després per la seva modelització matemàtica. Durant la implementació del model, qüestions com la potència de càlcul necessari pot portar a l'ús de tècniques com la computació paral·lela o l'ús de clústers de càlcul. D'altra banda, dissenyar un model informàtic del temps implica tenir accés no només a les dades orogràfiques per la descripció del terreny sobre el qual el fenomen meteorològic té lloc, sinó també l'accés a les dades meteorològiques corresponents per poder iniciar el model. L'ús de programari de codi obert pot ajudar, entre d'altres, a poder-ne fer l'auditoria de manera correcta. Les aplicacions del model informàtic del temps poden abastar situacions tan diverses com la instal·lació d'aerogeneradors en serralades de muntanya, la gestió viària en condicions de neu o l'optimització dels recursos (cultiu de neu) en el disseny de pistes d'esquí.

Dit això, queda clar que no es pot obviar el coneixement anterior que el professional humà té de les situacions examinades; el model informàtic es proposa, no com a mitjà substitutori dels existents, sinó com una eina complementària que es pot aplicar, o no, segons les característiques i necessitats del projecte concret. En aquest sentit, es pot destacar la importància de la formació d'informàtics i futurs informàtics no només en l'àmbit de la tecnologia del comerç electrònic, sinó també en altres àrees d'aplicació de les tècniques de computació com seria el camp de les ciències.

## Notes

- 1- ALAN WARD I KOECK (2015) Modeling and distributed computing of snow transport and delivery on meso-scale in a complex orography. PhD Thesis. Universitat Oberta de Catalunya. URL (TDX): <http://www.tdx.cat/handle/10803/327598>
- 2- Idem, URL (Amazon, paper): <http://www.amazon.es/Modeling-distributed-computing-transport-delivery/dp/151485659X>
- 3- T. G. FARR (2007) "The shuttle radar topography mission." Reviews of Geophysics 45, RG2004.
- 4- Barcelona Supercomputing Center. Marenostrum Support and Services. URL: <http://www.bsc.es/marenostrum-support-services>
- 5- OpenFOAM projecte, URL: <http://www.openfoam.org/>