Acte d'investidura
del Dr. Jaume Peraire Guitart
com a doctor *honoris causa*
per la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech

UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Acte d'investidura del Dr. Jaume Peraire Guitart com a doctor *honoris causa* per la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech

3 de juny de 2022

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH

Imprès en paper ecològic i sostenible procedent de boscos ben gestionats.
Servei de Comunicació de la UPC, 2022 (10285)

Índex / Índice / Table of contents

Ordre de l'acte d'investidura / 7
Elogi dels mèrits del Dr. Jaume Peraire,
Dr. Antonio Huerta / 9
Discurs del nou doctor *honoris causa*,
Dr. Jaume Peraire / 13

Orden del acto de investidura / 19
Elogio de los méritos del Dr. Jaume Peraire,
Dr. Antonio Huerta / 21
Discurso del nuevo doctor *honoris causa*,
Dr. Jaume Peraire / 25

Order of the award ceremony / 31
Oration for Prof. Jaume Peraire
by the sponsor Prof. Antonio Huerta / 33
Acceptance speech
by Prof. Jaume Peraire / 37

Ordre de l'acte d'investidura

Benvinguda del rector de la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech, Dr. Daniel Crespo.

Lectura de l'Acord del Consell de Govern, a càrrec de la secretària general, Sra. Ana B. Cortinas.

Laudatio del padrí, Dr. Antonio Huerta.

Acte solemne d'investidura del Dr. Jaume Peraire com a doctor *honoris causa*
per la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech.

Discurs del nou doctor *honoris causa*, Dr. Jaume Peraire.

Paraules del rector, Dr. Daniel Crespo.

Gaudeamus igitur, himne universitari. Harmonització de Joan Casulleras

Gaudeamus igitur iuvenes
dum sumus, (bis)
post iucundam iuventutem,
post molestam senectutem
nos habebit humus (bis)

Ubi sunt qui ante nos
in mundo fuere (bis)
adeas ad inferos,
transeas ad superos
hos sivis videre (bis)

Vivat academia,
vivant profesores, (bis)
vivat membrum quolibet,
vivant membra quaelibet
semper sint in flore (bis)

Elogi dels mèrits del Dr. Jaume Peraire

Dr. Antonio Huerta
Catedràtic de Matemàtica Aplicada. Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech
Director d'ICREA, Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats
President de la International Association for Computational Mechanics

Rector Magnífic de la Universitat Politècnica de Catalunya, autoritats, claustre de professors, col·legues, amics vinguts de fora de Barcelona, apreciats estudiants, senyores i senyors, professor Peraire.

És per a mi un plaer i un honor complir el protocol de pronunciar la tradicional *laudatio*, la lloa dels mèrits, amb motiu de la concessió del títol de doctor *honoris causa* al professor Jaume Peraire. He de reconèixer que estic aclaparat i alhora encantat de poder expressar el reconeixement de la UPC, i el meu propi, a un acadèmic de gran prestigi. Vaig tenir la sort de conèixer-lo fa més de quaranta anys i és un privilegi comptar encara avui amb la seva amistat.

Un doctorat *honoris causa* és un doctorat "per causa d'honor". És, per tant, el reconeixement més gran en vida a qui ha destacat per la seva feina, virtut, mèrits i accions, i no és doctor per la universitat que li concedeix el títol.

Avui és un dia especialment important per a la UPC i totes les entitats que han donat suport a aquesta candidatura perquè rebem com a doctor *honoris causa* un antic alumne que, a més de tenir una trajectòria acadèmica excepcional, no ha oblidat mai la seva *alma mater*, ja que ha donat suport a la nostra comunitat universitària i l'ha ajudada sempre que se li ha demanat. Es diu que ningú no és profeta a casa seva. Sempre és més fàcil guardonar l'estranger, l'estrany, com més llunyà sigui, millor. Això ens evita comparacions que ens poden posar en evidència. Avui no complim aquesta dita: el professor Jaume Peraire torna a la seva universitat, a la seva terra, per rebre el reconeixement que es mereixen els seus mèrits aclaparadors.

El professor Peraire ostenta la càtedra H. N. Slater d'Aeronàutica i Astronàutica al Massachusetts Institute of Technology (MIT). Això del nom propi en la denominació de la càtedra indica que és una *endowed chair*, tradició que, malauradament, ens és aliena però que es remunta al 1502, quan la mare d'Enric VII va establir la càtedra de teologia Lady Margaret a la Universitat d'Oxford. Aquest tipus de mecenatge ha esdevingut una de les millors inversions, ja que dona un prestigi permanent. Les universitats escullen molt escrupolosament les persones que ostenten aquestes càtedres, atès que ofereixen una oportunitat única per empoderar-les per a la creació de coneixement sota la tutela d'acadèmics de renom mundial. Parlant del MIT i de la seva estratègia per destacar i donar suport als millors, m'agradaria recordar que la missió del MIT és simplement a**vançar en el coneixement i educar l'alumnat** en ciència, tecnologia i altres àrees del saber **per servir** millor la nació i el món al segle XXI. Després, en els objectius insisteix en aquests tres punts: **educació, recerca i coneixement i servei**.

Vull aprofitar aquesta ocasió per transmetre als més joves la passió que el professor Peraire posa en tots els aspectes del seu treball. La passió per aprendre prové de la curiositat per conèixer i està associada al plaer d'educar. Tot això requereix una nítida vocació de servei, però compensa amb escreix la dedicació necessària, les renúncies i l'esforç invertit. Tots aquests ingredients són necessaris per contribuir, amb la feina pròpia, a ampliar la frontera del coneixement (aprenent i produint ciència excel·lent i rellevant) i, a més, a aplicar aquests avenços per educar i construir una societat millor i més justa.

Reprenguem els tres punts de la missió i objectius del MIT: educació, recerca i coneixement i vocació de servei.

Educació

La formació universitària del professor Peraire es va iniciar aquí, en una jove Escola de Camins que trencava amb els cànons de l'època. Professors doctors amb experiència en recerca i dedicació a temps complet a la universitat: la plaça universitària no era la cirereta que decorava i culminava una carrera a l'Administració o en la pràctica professional, sinó una carrera en si mateixa. Una escola que també es va centrar en l'educació i va liderar les altres escoles de tot Espanya amb un pla d'estudis de sis anys molt treballat i debatut, que evitava la simple recollida d'informació i es focalitzava en la formació, que dotava els estudiants d'eines intel·lectuals per exercir la seva professió. No tot es va fer bé, però els que van modelar el caràcter de l'Escola en aquell període sí que van saber transmetre una part d'aquesta passió i la curiositat de què parlava abans. Aprofito per donar-los-en les gràcies.

Finalitzats els sis anys a l'Escola l'any 1983, el professor Peraire es va traslladar a la Universitat de Swansea, on va treballar en la tesi doctoral amb els professors Olgierd Zienkiewicz i Kenneth Morgan. Olgierd Zienkiewicz era un enginyer civil dedicat als mètodes numèrics i un dels pares dels elements finits, mentre que Kenneth Morgan és un matemàtic dedicat als mètodes numèrics i un dels pioners dels elements finits en fluids. De tots dos el professor Peraire va saber aprendre moltes de les facetes de la polièdrica vida acadèmica i allà va començar la carrera com a professor. L'any 1989 fa el salt formal de l'enginyeria civil a l'aeronàutica i el fa escollint un dels millors departaments d'Europa, el de l'Imperial College. Després, el 1992, va anar al MIT. En tots aquests llocs va aprendre i educar, i hi va deixar una reguera d'amistats i deixebles.

El professor Peraire sap com oferir la millor base sobre la qual l'alumnat pugui construir el seu futur. Això és, una formació que busca desenvolupar en cada persona el domini dels fonaments, la versatilitat mental, la motivació per aprendre i la confiança en si mateixa. Per això no ha dubtat a liderar programes de formació pioners com el programa de màster interdisciplinari en Computació per al Disseny i l'Optimització al MIT. El programa és altament competitiu i ja ha estat adoptat com a model per altres programes de nova creació a tot el món. O com la Singapore-MIT Alliance, de la qual ha estat promotor i director, i, més concretament, del seu programa de computació d'alt rendiment per a sistemes d'enginyeria (*high performance computation for engineered systems*, HPCES), tant per obtenir el títol de màster com el de doctorat. Això ha implicat, entre altres coses, el desenvolupament d'assignatures a distància amb material docent específic que segueixen simultàniament estudiants del MIT i de la NUS (Universitat Nacional de Singapur). Encara s'ofereix el curs cada tardor als estudiants del MIT i s'hi utilitzen materials desenvolupats al començament.

Recerca i coneixement

El professor Peraire va ser pioner en l'ús de mètodes de malla no estructurada i de malla adaptativa per a la simulació numèrica de problemes d'aigües somes, i de fluxos no viscosos (equacions d'Euler) i viscosos (equacions de Navier-Stokes compressibles i incompressibles). Dit així sona àrid, i ho és, i a més

sembla difícil, que també n'és, sobretot quan s'aplica a configuracions completes de vehicles i, encara més difícil, s'havia de convèncer la indústria aeronàutica que els elements finits amb malles no estructurades i adaptatives era una alternativa millor a allò que empraven. És a dir, que deixessin de fer servir els codis de diferències finites en què tenien experiència i en els quals havien format el personal, i comencessin a fer servir el que ell proposava. Ho va aconseguir. Va escriure la versió inicial del codi de càlcul de dinàmica de fluids FLITE, que és el principal codi de malla no estructurada que s'utilitza actualment a BAE Systems. Va escriure el codi FELISA per a l'aerodinàmica de reentrada, que es fa servir a la NASA i que es va distribuir a diverses empreses dels EUA. Les simulacions de flux fent servir el codi de FELISA van ser utilitzades àmpliament pel Langley Research Center de la NASA durant la investigació de l'accident del transbordador *Columbia*.

Com és fàcil imaginar, tot això ha implicat tocar moltes tecles (en tots els sentits). Només en comentaré breument dues: els mètodes de resolució i el desenvolupament de generadors de malles.

Pel que fa als mètodes, a més de treballar força en el desenvolupament d'algorismes i mètodes d'elements finits, com he comentat, també ho va fer en mètodes de volums finits basats en arestes per fer servir malles no estructurades (*edge-based unstructured mesh finite volume methods*), mètodes d'interfície immersa per a la interacció fluid-estructura (*immersed interface methods for fluid-structure interaction*), tècniques de captura de xoc, mètodes d'ordre reduït per a problemes no lineals i tècniques de control òptimes aplicades al control de flux i el disseny de formes. I me'n deixo unes quantes per no ser exhaustiu.

Pel que fa a la generació de malles, va desenvolupar una biblioteca per a tetraedres que permetessin discretitzacions adequades per a fluids i estructures directament des de les especificacions de CAD. Aquesta biblioteca està llicenciada a través de l'oficina de llicències del MIT i Visual Kinematics, i s'utilitza en diversos paquets d'elements finits comercials.

Després va obrir una altra línia: la fiabilitat, credibilitat, dels càlculs. Un responsable d'Airbus d'aquella època ho descrivia perfectament. Deia que les generacions d'enginyeres i enginyers que sortien de les escoles ja s'havien format en elements finits i, per tant, se'n creien els resultats. Les generacions anteriors no se'n refiaven tant i, en conseqüència, abans de passar els números feien comprovacions de convergència. Els d'ara, deia, ja no fan els càlculs de convergència: d'una banda, no qüestionen el que els dona l'ordinador i, a més, cada cop posem les màquines al límit de la capacitat i això no incita a verificar la convergència. Amb aquesta motivació, Peraire va treballar en cotes, fites d'error (límits superiors i inferiors de l'error), obtingudes com un postprocés de les solucions aproximades la precisió de les quals es volia avaluar. Bé, "solucions" és molt genèric; més pròpiament, va proposar diversos algorismes d'optimització convexa per avaluar les cotes del que denominem quantitats d'interès de les solucions d'equacions diferencials en derivades parcials. Aquestes cotes són exactes, és a dir, es pot demostrar que aquests límits inferiors i superiors ho són respecte de la solució exacta de l'equació diferencial en derivades parcials subjacents, de manera que es proporciona una eina de verificació i certificació del programari i del seu *output* molt potent.

De manera natural, tot aquest bagatge li ha permès desenvolupar un marc de fiabilitat múltiple per a la simulació i el disseny del vol amb aleteig. Mitjançant l'ús de models amb costos i nivells de fidelitat diferents, es fa possible una àmplia exploració de l'espai de disseny per als drons. Aquestes propostes són l'eina central per analitzar els vols inspirats biològicament. De fet, aquest marc s'ha utilitzat per fer els primers estudis paramètrics i simulacions detallades del vol dels ratpenats en un projecte conjunt de diverses universitats nord-americanes.

El seu treball més recent sobre els mètodes de Galerkin discontinus d'alt ordre s'ha centrat en el desenvolupament de mètodes híbrids i mixtos que proporcionen aproximacions de la solució (primal) i el seu gradient amb una precisió òptima per a sistemes d'equacions de la física matemàtica. Aquests mètodes híbrids són adoptats pels grups que treballen en el desenvolupament d'aproximacions d'alt ordre per a les equacions de dinàmica de gasos, mecànica de sòlids, propagació d'ones i aplicacions electromagnètiques.

Podria continuar i, si em deixen una pissarra i un guix, els contaria amb molta més passió els detalls que han fet úniques i originals les seves aportacions. Però temo que això avui no toca. D'altra banda, no vull acabar aquesta secció sense comentar el respecte que té la nostra comunitat acadèmica pel professor Peraire, els premis que ha rebut són nombrosos. Així i tot, crec que val la pena ressaltar les cartes de suport que ha rebut la proposta d'aquest doctorat *honoris causa* dels presidents d'associacions del Regne Unit, França, Espanya i els EUA.

Vocació de servei

Deixo moltes coses al tinter, però no seria just descriure la trajectòria del professor Peraire sense parlar, encara que sigui de manera molt breu, del seu clar compromís amb la societat i la seva vocació de servei. Totes les institucions per on ha passat tenen constància d'aquesta virtut, associada a la seva actitud i caràcter.

Per exemple, va agafar les regnes del Departament d'Aeronàutica i Astronàutica del MIT el 2011, un moment que no era fàcil, encara estàvem sota els cops de cua de la Gran Recessió (la crisi econòmica i financera), i va liderar la renovació i modernització del Departament. Un exemple entre molts ha estat la seva capacitat per posar d'acord la indústria, donants filantròpics i l'administració del MIT per dur a terme la renovació del túnel de vent dels germans Wright (Wright Brothers Wind Tunnel). Aquesta icònica infraestructura s'havia inaugurat el 1938 i s'ha fet servir per dissenyar avions, però també per a aplicacions molt diverses, com ara estudiar antenes terrestres, l'aeroelasticitat d'aeronaus i estructures terrestres, l'equipació d'esquí, vestits espacials, bicicletes, motocicletes, entrades a estacions de metro, veles de vaixells, turbines eòliques i automòbils solars, i, més recentment, per dissenyar un avió comercial net, silenciós i supereficient.

També cal ressaltar la seva relació amb la nostra comunitat, que li ha merescut la medalla Ildefons Cerdà del Col·legi d'Enginyers de Camins, Canals i Ports o el Premi SEMNI Olgierd Zienkiewicz de la Societat Espanyola de Mecànica i Enginyeria Computacionals. No ha defugit mai ajudar-nos, al contrari, ha acollit un gran nombre d'estudiants, doctors i professors de la UPC que ara estan en aquesta o altres universitats o en centres de recerca de l'entorn UPC. Ha estat el director del programa MIT-Spain dins del MISTI: MIT International Science and Technology Initiatives. Cal recordar que el programa MIT-Spain treballa de la mà amb una xarxa de corporacions de primer nivell, universitats i instituts de recerca. Organitzen pràctiques per a estudiants del MIT a l'estranger i faciliten les col·laboracions de recerca entre el professorat del MIT i els homòlegs espanyols. També vull aprofitar per ressaltar la seva ajuda perquè la UPC s'incorporés a la iniciativa CDIO: Conceive Design Implement Operate. Tornem a l'educació amb aquest marc educatiu que se centra en els fonaments de l'enginyeria establerts en el context de concebre, dissenyar, implementar i operar sistemes i productes del món real. Els col·laboradors de la iniciativa CDIO l'han adoptat com a marc de la planificació curricular i l'avaluació basada en resultats.

Vull acabar aquesta semblança del professor Peraire, estimat Jaume, dient que és un bon home, divertit, curiós i un estimat amic que exerceix de català a qualsevol lloc del món.

Per tot això, sol·licito al rector i altres autoritats acadèmiques del Claustre que es procedeixi a investir l'Excel·lentíssim Senyor Professor Jaume Peraire amb el grau de doctor *honoris causa* per la Universitat Politècnica de Catalunya.

Discurs del nou doctor *honoris causa*, Dr. Jaume Peraire

Gràcies a tothom per ser aquí. Per a mi aquest doctorat *honoris causa* és especialment significatiu per dos motius. L'un és que me l'atorga una institució molt respectada que reuneix una quantitat immensa de talent i que ha tingut un gran impacte en el desenvolupament social i econòmic de Catalunya. L'altre, de caràcter més sentimental, és que, a més a més, la UPC és la meva *alma mater*, un lloc on tinc molts amics i companys. Havent crescut a pocs quilòmetres d'aquí, el reconeixement que rebo avui de la UPC és molt més del que m'hauria pogut imaginar. Normalment, quan algú rep aquestes distincions és senyal que té bones amistats, i jo certament en tinc. Us vull donar les gràcies a tothom: la gent de l'Escola de Camins, l'Escola de Telecomunicacions, les escoles d'Enginyeria Aeroespacial de Terrassa i Castelldefels, el LACAN, el CIMNE, el BSC i la UPC en general. Si soc aquí avui és gràcies a moltes persones que m'han donat suport i han tingut un impacte en la meva vida. De vegades, aquest suport ha estat instrumental. D'altres, tenia forma de consell o de paraules d'ànim, o simplement consistia a fer-me sentir com a casa quan era lluny de casa. Vull esmentar Eugenio Oñate i Xavier Oliver, que em van ajudar des del primer dia; Antonio Huerta, un antic company de grau que ara és company de professió i, el que és més important, un amic estimat. Antonio, Pedro Díez i d'altres m'han acollit generosament en les nombroses visites que he fet al llarg dels anys a la UPC. Durant la meva estada a Gal·les i més tard a Londres, vaig tenir la gran sort de trobar gent meravellosa. La llista de professors, mentors, companys, estudiants i amics és massa llarga per mencionar-los tots aquí, però no vull deixar d'esmentar Olek Zienkiewicz i Ken Morgan. Els vaig conèixer poc després d'arribar a Gal·les. Em van fer sentir part de les seves famílies des del començament i m'han donat suport al llarg de tota la meva carrera. Finalment, seria una manca de consideració per part meva si no parlés de la família tan meravellosa que tinc, que sempre m'ha donat suport i m'ha animat en les meves aventures. Vull expressar la meva gratitud als meus pares, que ja no hi són; la meva dona, Anna; els meus fills; les meves germanes, i la resta de família. Gràcies. Ja sabeu com n'heu estat i com en continueu essent, d'importants, a la meva vida.

Em van dir que aquest discurs no havia de tenir cap format específic. Per això vaig pensar que parlaria d'alguns temes que trobo fascinants i que espero que us semblaran interessants. Aprofito l'avinentesa per exposar-vos un relat personal d'alguns dels reptes i les oportunitats de l'enginyeria aeroespacial. Al capdavall, em considero enginyer aeroespacial, tot i que estic molt orgullós de la meva formació inicial a la UPC com a enginyer civil. L'enginyeria aeroespacial és la branca de l'enginyeria relacionada amb el disseny, el desenvolupament, la producció i l'operació d'avions,

naus espacials i sistemes i equips de suport. Al meu entendre, aquesta descripció àmpliament acceptada no aconsegueix transmetre l'impacte social tan gran que té l'enginyeria aeroespacial ni el paper crític que representa per al futur de la humanitat.

La indústria aeroespacial ha contribuït i continua contribuint d'una manera essencial a l'activitat econòmica mundial, la recerca i la innovació. Costa d'imaginar el món actual sense l'empremta de l'enginyeria aeroespacial. Hauríem hagut de trobar mitjans de transport alternatius, més lents i probablement més costosos; tampoc no hi hauria satèl·lits que permetessin les comunicacions, els GPS o la previsió del temps.

L'any 2011 em van nomenar cap del Departament d'Aeronàutica i Astronàutica del MIT. Dins del MIT, el Departament d'AeroAstro –com en diem habitualment– és un dels departaments petits més grans (després del d'Enginyeria Mecànica i el d'Enginyeria Elèctrica i Ciències de la Computació) de l'Escola d'Enginyeria. Però, el que és més important, és l'únic departament integrat verticalment a l'Escola. A diferència d'altres departaments que s'organitzen al voltant de grans grups disciplinaris, l'AeroAstro és molt més interdisciplinari i pretén tenir competències en tots els aspectes rellevants per a l'empresa aeroespacial: des de l'aerodinàmica fins al control del trànsit aeri, els satèl·lits, les estructures espacials, la fabricació, els coets, l'autonomia, l'impacte mediambiental del transport aeri i el comportament del cos humà a l'espai. A part, aquestes competències van canviant amb el temps a mesura que la indústria aeroespacial evoluciona. El Departament té una llarga història de 100 anys: té el programa de postgrau més antic del país i té relació amb molts pioners i referents d'aquest camp. Ha tingut un paper fonamental en tots els desenvolupaments aeroespacials rellevants dels Estats Units, com ara les famílies d'avions Douglas i Boeing, el programa Apollo, el telescopi Hubble, l'exploració de Mart i l'Estació Espacial. Tot això ho dic perquè una de les funcions cardinals del cap del Departament és entendre cap a on es mou el sector aeroespacial i anticipar-se als avenços tecnològics i educatius que es necessitaran els propers 10-20 anys per tal de poder fer inversions en recerca i formació, incloent-hi la contractació de professorat i la construcció d'instal·lacions.

Transport aeri

Permeteu-me que comenci pel transport aeri. En la meva opinió, el sistema actual de transport aeri és un dels èxits més destacables de l'enginyeria. Em refereixo a l'aviació comercial i no a l'aviació general, que inclou aeronaus privades i recreatives. Actualment, la flota mundial d'avions comercials és d'unes 35 000 naus, transporta prop de 5 000 milions de passatgers a l'any i facilita un 30-40 % del valor del comerç mundial. L'avió modern constitueix una fita extraordinària de l'enginyeria. Un cop que surt de la fàbrica, passarà entre un 30 % i un 60 % dels seus 30 anys de vida a l'aire. Té uns motors que estan dissenyats per funcionar més de 40 000 hores (4,5 anys) sense revisions importants; la potència que subministra un únic motor de reacció, que pot superar els 20 MW, és equivalent a la que consumeixen unes 20 000 llars. A més a més, ofereix una seguretat i una fiabilitat excel·lents. En els darrers 50 anys, el risc d'accident mortal s'ha reduït per 12: de 6 a 0,5 per milió de vols. En comparació amb altres mitjans de transport, és una xifra molt baixa; el risc d'accident per quilòmetre viatjat amb ferrocarril és 12 vegades més gran i amb cotxe, 60 vegades més gran.

Permeteu-me que ara us parli d'algunes de les possibilitats i els reptes d'aquest sistema extraordinari. S'espera que la demanda de viatges aeris es dupliqui a mitjans d'aquest segle. I és que aquesta demanda s'ha anat duplicant cada 15-20 anys des de fa força temps. L'increment en la demanda vindrà principalment dels països en desenvolupament, ja que no hi ha cap alternativa per recórrer grans distàncies en un període de temps raonable. A part, s'espera que a les zones densament poblades creixi la necessitat de mobilitat aèria urbana. A les ciutats més congestionades, el transport aeri serà molt probablement una opció, fins i tot per a trajectes curts que normalment es cobreixen amb cotxe o ferrocarril. Els analistes calculen que, en menys de 20 anys, el mercat de la mobilitat aèria urbana tindrà un valor estimat d'uns 500 000 milions de dòlars anuals. De fet, ja hi ha

unes 70 empreses a tot el món que intenten desenvolupar vehicles competitius amb uns requisits d'enlairament i aterratge reduïts per capturar aquest mercat.

Aquesta ànsia aparentment insaciable pels viatges aeris presenta reptes importants. La infraestructura actual està –o aviat ho estarà– al màxim de la seva capacitat en moltes regions del món, cosa que provoca congestions freqüents que afecten tota la xarxa. Ara mateix sembla inevitable que, en un futur proper, l'augment del trànsit comportarà una escassetat important de capacitat i molts vols no coberts. A més a més, la flota de vehicles aeris no tripulats està augmentant de manera exponencial i la pressió per integrar-los al sistema actual de gestió del trànsit aeri agreuja la congestió i planteja grans problemes de seguretat.

Per si no n'hi hagués prou, encara no hem parlat del gran repte, que és, evidentment, l'impacte del transport aeri sobre el canvi climàtic. El transport aeri només és responsable del 5 % de totes les emissions antropogèniques de gasos amb efecte d'hivernacle. Tanmateix, és el que presenta un creixement més ràpid. A part, si es tenen en compte les diferents activitats humanes que depenen dels combustibles fòssils, el transport aeri és probablement l'activitat en què és més difícil substituir aquests combustibles per alternatives més ecològiques. Actualment no hi ha alternatives als hidrocarburs si tenim en compte l'energia per unitat de massa i l'energia per unitat de volum. Aquestes dues mètriques són vitals per determinar els límits de l'abast d'una aeronau i la càrrega útil. Des d'un punt de vista tècnic, és molt més fàcil reduir l'ús de combustibles fòssils en operacions terrestres, com ara la generació d'energia i el transport de superfície, i espero que això passarà en el futur.

No obstant això, penso que, en un horitzó de menys de 20 anys, serà necessari trobar solucions que no contribueixin globalment a les emissions de gasos amb efecte d'hivernacle si volem veure créixer l'oferta per satisfer la demanda. Això planteja un repte enorme que només es pot abordar amb les noves tecnologies. Sembla que no hi ha cap fórmula màgica. Les solucions probablement vindran dels avenços en diversos àmbits, com ara nous materials lleugers, un millor coneixement dels impactes ambientals de l'aviació, dissenys avançats amb propulsió distribuïda i fonts d'energia alternatives com els combustibles d'aviació sostenibles (SAF), l'hidrogen i l'electrificació. D'entre les opcions disponibles, els que impliquen fer menys canvis a la infraestructura existent són els combustibles d'aviació obtinguts a partir de biomassa. En canvi, l'hidrogen i la propulsió elèctrica requereixen uns canvis radicals als vehicles i la infraestructura actuals. L'electrificació sembla una opció molt adequada per als mercats de transport regional i de rodalies, i espero que es desenvoluparan solucions amb vehicles aeris elèctrics per atendre la demanda de mobilitat urbana.

En resum, seran necessaris canvis estructurals en un sistema que és tradicionalment molt conservador. Les inversions de capital són importants, els riscos tecnològics són elevats i els processos de certificació són cars, llargs i tediosos. Això no obstant, la indústria aeroespacial és una indústria amb un historial extens d'innovació, que desafia contínuament els límits del que és possible. A tall d'exemple: malgrat que les diferències entre la línia exterior d'un Boeing 707 de la dècada del 1950 i la d'un avió modern de Boeing o Airbus són aparentment mínimes, les emissions s'han reduït un 80 %. Ampliant l'espai de disseny amb nous models de gestió del trànsit aeri, noves tecnologies i fonts alternatives d'energia verda, assolir un sistema de transport aeri sense emissions en un període de 20 anys sembla factible.

Accés espacial i satèl·lits

Ara m'agradaria alçar la vista i parlar de l'espai. L'espai és la nova frontera que ens separa de l'exploració de nous mons i ofereix un ventall interminable d'oportunitats que només sembla limitat per la nostra imaginació: exploració robòtica del sistema solar, exploració de l'espai profund amb telescopis o innovadores naus tripulades i assentaments en altres planetes. Amb tota seguretat, moltes d'aquestes activitats seran una realitat en el futur, però avui em vull centrar en un aspecte de l'espai potser menys glamurós però que, malgrat tot, té un gran impacte

en les nostres vides. Us vull parlar de satèl·lits i de la infraestructura que cal per llançar-los. Els satèl·lits s'utilitzen per a les comunicacions, les previsions meteorològiques, la navegació (GPS), l'observació de la Terra, l'astronomia, les aplicacions de vigilància i defensa, la ciència i l'educació, entre d'altres; és una llista que creix dia a dia.

Fins ara, s'han posat en òrbita prop de 9 000 satèl·lits. Uns 1 500 satèl·lits es troben en òrbites geosíncrones, que són òrbites amb un radi d'uns 40 000 km (unes 6,5 vegades el radi de la Terra) i un període igual a un dia. La resta es troben en òrbites d'altitud inferior, que poden arribar a ser tan baixes com 200 km sobre la Terra, i períodes de rotació propers als 90 minuts.

Es calcula que hi ha una setantena de països amb almenys un satèl·lit en òrbita. Aquesta democratització de l'espai contrasta amb el fet que només onze països han demostrat la capacitat de llançar un coet que pugui posar un satèl·lit en òrbita. I només tres països han demostrat la capacitat de posar una càpsula en òrbita i fer-la tornar a la Terra, cosa que ens dona una idea de com de difícil és anar a l'espai. Per assolir una òrbita terrestre baixa, el coet ha de poder portar el satèl·lit a una altitud mínima de 200 km i a una velocitat de 30 000 km/h. Els límits físics impliquen que, fins i tot fent servir coets multietapa, la càrrega útil se situa normalment entre l'1 % i el 4 % de la massa total, una xifra que baixa fins al 0,5-1,5 % per a òrbites geosíncrones. El coet SpaceX Falcon 1, per exemple, fa 21 m d'alçada i 1,7 m de diàmetre, pesa 26 t i és capaç de portar una càrrega útil de només 200 kg a l'òrbita terrestre baixa.

El creixement futur dels satèl·lits comercials no és clar, hi ha molts factors en joc. El que sí que és clar és que la miniaturització dels components electrònics i òptics ha permès reduir de manera dràstica la mida i el pes dels satèl·lits necessaris per a una missió concreta. A més a més, les millores tecnològiques han permès reduir el cost de posada en òrbita per quilogram. Durant anys, aquest cost era d'uns 20 000 USD/kg, però ha anat disminuint els darrers anys. En alguns dels últims llançaments, aquest cost va ser inferior als 1 000 USD/kg. La reutilització dels vehicles de llançament, tal com proposa l'empresa SpaceX, suposarà un punt d'inflexió i comportarà encara més reduccions de costos. Per il·lustrar aquest punt, podem comparar per exemple el cost d'un coet Falcon 9 en un viatge a l'estació espacial amb un vol de llarga distància entre Nova York i Hong Kong. Veiem que, si bé el cost dels vehicles i el del combustible són comparables, l'aeronau s'amortitza en un període de 25-30 anys, que inclou milers de viatges. En canvi, el coet sense reutilització només es fa servir una vegada i després és rebutjat. Amb la reutilització dels vehicles de llançament, és molt possible que puguem veure baixar el cost de llançament fins als 10-100 USD/kg en el futur.

És probable que hi continuï havent reduccions en els costos per accedir a l'espai que permetran el desenvolupament de noves aplicacions amb satèl·lits. Actualment s'estan considerant constel·lacions de centenars o fins i tot milers de satèl·lits. Cada dia augmenta el nombre d'empreses amb noves aplicacions que entren al mercat de satèl·lits comercials. Aquestes aplicacions inclouen camps radicalment nous com ara la fabricació i la mineria a l'espai.

Hi ha un factor important que amenaça aquest futur prometedor: el perill que suposa la brossa espacial per als satèl·lits. Aquesta brossa ha estat generada per proves antisatèl·lit fetes en el passat, col·lisions de satèl·lits i satèl·lits fora de servei. Un petit fragment de la mida d'una pilota de golf a velocitats orbitals té prou energia per destruir actius que costen centenars de milions de dòlars.

L'any 1978, el científic de la NASA Donald Kessler va descriure un escenari en què la densitat de la brossa espacial a l'òrbita terrestre era prou alta perquè la col·lisió entre objectes pogués causar una cascada en què cada col·lisió generava més fragments, cosa que feia augmentar la probabilitat de més col·lisions. És el que es coneix com a síndrome de Kessler. No sabem com de prop som d'aquest escenari crític, però és evident que la

brossa espacial representa un repte important per al qual encara no s'han demostrat solucions viables.

Ciència i enginyeria aeroespacial computacional

No voldria acabar sense fer algunes observacions sobre la ciència i l'enginyeria computacionals (CSE) i l'impacte que tenen en matèria aeroespacial. Com molts de vosaltres sabeu, la modelització i la simulació per ordinador de sistemes físics són algunes de les meves passions i han estat al centre de la meva carrera investigadora. He estat testimoni de la transició de la CSE de ser una àrea prometedora de recerca a tenir una presència dominant en tots els aspectes de l'enginyeria, amb un impacte gairebé impossible de quantificar i que sovint no es té prou present. La potència impressionant de la CSE actual es deu als avenços que s'han fet al llarg de 50 anys tant en hardware com en algorismes informàtics. Recentment, la miniaturització i el cost reduït de l'electrònica han provocat una explosió en la disponibilitat de dades, que ha obert el camp de les simulacions basades en dades. Aquí, l'adquisició i la simulació de dades es fan de manera simultània per produir noves capacitats predictives i de presa de decisions amb nivells de precisió sense precedents.

Tot el que es pugui dir sobre l'impacte de la CSE en l'àmbit aeroespacial és poc. La CSE ha permès el disseny, el desenvolupament, la producció i l'operació dels sistemes aeroespacials que he descrit anteriorment i molts d'altres. Però el més important és que és una eina essencial per poder continuar progressant. També serà indispensable per avançar en nous àmbits emergents, com l'autonomia o la comprensió i mitigació dels impactes ambientals de l'aviació.

Permeteu-me exposar tres exemples de l'àmbit aeroespacial que atreuen un esforç de recerca important i en què la computació té un paper crític.

El primer és la simulació de fluxos hipersònics. Són els fluxos d'alta energia que hi ha al voltant de vehicles que volen a velocitats entre 5 i 20 vegades la velocitat del so. Els fluxos hipersònics són rellevants per a l'accés a l'espai, la reutilització de coets i potser algun dia per a aplicacions de transport civil. Amb la potència de les ones de xoc, la temperatura de l'aire pot assolir valors de 5 000 K o més, que és superior a la temperatura de fusió de qualsevol material utilitzat per protegir la superfície d'una nau espacial. A aquestes temperatures, l'aire es dissocia i s'ionitza, i té un comportament molt diferent del de l'aire en les condicions del nivell del mar. Depenent dels materials de la nau espacial, les reaccions d'oxidació entre l'aire ionitzat i els materials poden ser molt agressives i donar lloc a una erosió ràpida. El principal repte a l'hora de dissenyar vehicles hipersònics és que no és factible reproduir aquestes condicions de flux que impliquen densitats baixes i temperatures molt elevades en túnels de vent. Les úniques fonts d'informació que hi ha són les dades de les proves de vol, que són molt costoses i complexes, i les simulacions numèriques. Per donar-vos una idea de la complexitat del problema i de tot el que encara no sabem, us parlaré d'un experiment de vol que va dur a terme DARPA recentment: l'HTV-2 Falcon. L'HTV-2 Falcon és un vehicle no tripulat impulsat per un coet dissenyat per planar per l'atmosfera terrestre a uns 18 000 km/h, és a dir que recorreria la distància entre Nova York i Los Ángeles en uns 13 minuts. El primer vol només va durar 9 minuts abans que el vehicle es desintegrés en l'aire. La investigació de l'accident assenyalava l'existència d'ones de xoc que van fer que s'arrenqués la pell del vehicle, ja que eren 100 vegades més fortes que les que estava dissenyat per suportar. S'ha fet evident que es necessitaran capacitats de predicció més sofisticades i precises que tinguin en compte els múltiples efectes físics que no es tenien en compte abans. Actualment s'està desenvolupant una nova generació de simulacions de fluxos hipersònics que incorpora càlculs de mecànica quàntica i dinàmica molecular per tenir en compte els efectes químics a l'aire i les interaccions amb els materials de les naus espacials.

Una altra aplicació que cada cop atreu més l'atenció en la indústria aeroespacial són els bessons digitals. Un bessó digital és

una rèplica virtual que reflecteix amb precisió el comportament d'un objecte físic, com ara un motor de reacció. L'objecte físic està equipat amb sensors que generen dades sobre diferents aspectes del seu rendiment, com ara la producció d'energia o la temperatura de combustió. Aleshores, el model digital assimila aquestes dades, que es poden utilitzar per executar simulacions que permetin estudiar problemes de comportament i suggerir accions per millorar el rendiment i la seguretat del sistema i minimitzar els costos. Es poden construir bessons digitals per a components, vehicles sencers, processos de fabricació i fins i tot sistemes de vehicles. Vull esmentar també Destination Earth, la iniciativa ambiciosa de la UE per desenvolupar un bessó digital de l'ecosistema de la Terra. Aquest model podria resultar essencial per complir els objectius d'impacte climàtic els propers anys, incloent-hi els que estan relacionats amb el sector aeroespacial.

Finalment, m'agradaria concloure el discurs parlant dels sistemes autònoms en el transport aeri. L'autonomia i la integració de sistemes autònoms i persones que treballin de manera coordinada són requisits previs per al futur dels vehicles aeris no tripulats (UAV) i les solucions de mobilitat aèria urbana. Malgrat tots els èxits assolits en matèria d'autonomia, els sistemes actuals encara no compleixen les exigències de seguretat i fiabilitat per a les aplicacions aeroespacials. L'objectiu final és que els sistemes autònoms comparteixin l'espai aeri amb avions convencionals i que els vehicles aeris no tripulats superin l'anomenat test de Turing o el joc de la imitació. A la dècada de 1950, Alan Turing va proposar un test per determinar la capacitat d'una màquina de mostrar un comportament intel·ligent de debò. Es podria idear un concepte similar per a avions autònoms. El test se superaria quan un observador remot d'un UAV que volés en un entorn complex, incloent-hi l'enlairament i l'aterratge, fos incapaç de diferenciar si el vehicle es pilotava en remot o si es pilotava a si mateix i prenia les pròpies decisions en funció de les entrades que rebia. L'augment dels nivells d'autonomia exigeix augmentar la capacitat d'adquisició, processament i càlcul de dades mitjançant sistemes integrats i centralitzats. Caldran nous algorismes per a simulacions basades en dades, l'aprenentatge automàtic i la presa de decisions per tal de poder fer front als reptes del futur.

I amb això acabo la meva presentació. Com podeu veure, no he intentat fer un repàs exhaustiu de l'àmbit aeroespacial, sinó que he presentat uns quants temes que m'interessen i que espero que també us hagin semblat interessants. Tot i que he parlat dels importants obstacles i preocupacions que tenim al davant, especialment els que tenen a veure amb el medi ambient, en parlo amb il·lusió per la tecnologia i la innovació que suposaran les seves solucions.

Gràcies.

Orden del acto de investidura

Bienvenida del rector de la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech, Dr. Daniel Crespo.

Lectura del Acuerdo del Consejo de Gobierno, a cargo de la secretaria general, Sra. Ana B. Cortinas.

Laudatio del padrino, Dr. Antonio Huerta.

Acto solemne de investidura del Dr. Jaume Peraire como doctor *honoris causa*
por la Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech.

Discurso del nuevo doctor *honoris causa*, Dr. Jaume Peraire.

Palabras del rector, Dr. Daniel Crespo.

Gaudeamus igitur, himno universitario. Armonización de Joan Casulleras

---

Gaudeamus igitur iuvenes
dum sumus, (bis)
post iucundam iuventutem,
post molestam senectutem
nos habebit humus (bis)

Ubi sunt qui ante nos
in mundo fuere (bis)
adeas ad inferos,
transeas ad superos
hos sivis videre (bis)

Vivat academia,
vivant profesores, (bis)
vivat membrum quolibet,
vivant membra quaelibet
semper sint in flore (bis)

Elogio de los méritos del Dr. Jaume Peraire

Dr. Antonio Huerta
Catedrático de Matemática Aplicada. Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech
Director de ICREA, Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats
Presidente de la International Association for Computational Mechanics

Rector Magnífico de la Universitat Politècnica de Catalunya, autoridades, claustro de profesores, colegas, muy queridos amigos llegados de fuera de Barcelona, apreciados estudiantes, señoras y señores, profesor Peraire.

Es para mí un placer y un honor cumplir con el protocolo de pronunciar la tradicional *laudatio*, el elogio de los méritos, con motivo de la concesión del título de doctor *honoris causa* al profesor Jaume Peraire. Debo reconocer que estoy abrumado y encantado de poder expresar el reconocimiento de la UPC, y el mío propio, a un académico de gran prestigio. Tuve la suerte de conocerlo hace más de cuarenta años y es un privilegio contar aún hoy con su amistad.

Un doctorado *honoris causa* es un doctorado "por causa de honor". Es, por lo tanto, el mayor reconocimiento en vida a quienes han destacado en su labor por su trabajo, virtud, méritos y acciones, y no son doctores por la universidad que les concede el título.

Hoy es un día especialmente importante para la UPC y todas aquellas entidades que han apoyado esta candidatura porque recibimos como doctor *honoris causa* a un antiguo alumno que, además de poseer una trayectoria académica excepcional, nunca ha olvidado su *alma máter*, apoyando y ayudando a nuestra comunidad universitaria siempre que se le ha solicitado. Se dice que nadie es profeta en su tierra. Siempre es más fácil galardonar al extranjero, cuanto más lejano sea, mejor. Eso nos evita comparaciones que nos ponen en evidencia. Hoy contradecimos ese dicho: el profesor Jaume Peraire regresa a su universidad, a su tierra, para recibir el reconocimiento que merecen sus admirables méritos.

El profesor Peraire ostenta la cátedra H. N. Slater de Aeronáutica y Astronáutica en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). El nombre propio en la denominación de la cátedra indica que es una *endowed chair*, tradición que por desgracia nos es ajena pero que se remonta a 1502, cuando la madre de Enrique VII estableció la cátedra de teología Lady Margaret en la Universidad de Oxford. Este tipo de mecenazgo se ha convertido en una de las mejores inversiones, ya que comportan un prestigio permanente. Las universidades eligen muy cuidadosamente a las personas que ocupan estas cátedras, ya que ofrecen una oportunidad única para impulsar la creación de conocimiento, bajo la tutela de académicos de renombre mundial. Hablando del MIT y de su estrategia para destacar y apoyar a los mejores, me gustaría recordar que su misión es simplemente **avanzar en el conocimiento y educar al alumnado** en ciencia, tecnología y otras áreas del saber **para servir** mejor a la nación y al mundo en el siglo XXI. Más tarde, en los objetivos insiste en esos tres puntos: **educación, investigación y conocimiento y servicio**.

Deseo aprovechar esta ocasión para transmitir a los más jóvenes la pasión que el profesor Peraire pone en todos los aspectos de su trabajo. La pasión por aprender proviene de la curiosidad por conocer y está asociada al placer de educar. Todo ello requiere una nítida vocación de servicio, pero compensa con creces la necesaria dedicación, las renuncias y el esfuerzo invertido. Todos estos ingredientes son necesarios para contribuir, con el trabajo propio, a ampliar la frontera del conocimiento (aprendiendo y produciendo ciencia excelente y relevante) y, además, a aplicar esos avances a la educación y la construcción de una sociedad mejor y más justa.

Retomemos los tres puntos de la misión y objetivos del MIT: educación, investigación y conocimiento y vocación de servicio.

Educación

Empecemos por la suya. La formación universitaria del profesor Peraire se inició aquí, en una joven Escuela de Caminos que rompía con los cánones de la época. Profesores doctores con experiencia en investigación y dedicación a tiempo completo a la universidad: la plaza universitaria no era la guinda que decoraba y culminaba una carrera en la Administración o en la práctica profesional, sino una carrera en sí misma. Una escuela que también se centró en la educación liderando a las demás escuelas de toda España con un plan de estudios de seis años muy trabajado y debatido, que evitaba el mero acopio de información y se centraba en la formación, que dotaba a los estudiantes de herramientas intelectuales para ejercer su profesión. No todo se hizo bien, pero los que conformaron el carácter de la Escuela en ese periodo sí supieron transmitir parte de esa pasión y la curiosidad de la que hablaba antes. Aprovecho la ocasión para darles las gracias.

Finalizados los seis años en la Escuela en 1983, el profesor Peraire se trasladó a la Universidad de Swansea, donde trabajó en su tesis doctoral con los profesores Olgierd Zienkiewicz y Kenneth Morgan. Olgierd Zienkiewicz era un ingeniero civil dedicado a los métodos numéricos y uno de los padres de los elementos finitos, mientras que Kenneth Morgan es un matemático dedicado a los métodos numéricos y uno de los pioneros de los elementos finitos en fluidos. De ambos el profesor Peraire supo aprender muchas de las facetas de la poliédrica vida académica y allí empezó su carrera como profesor. En 1989 da el salto formal de la ingeniería civil a la aeronáutica y lo hace escogiendo uno de los mejores departamentos de Europa, el del Imperial College. Más tarde, en 1992 va al MIT. En todos esos lugares aprendió y educó, y en ellos tiene un sinfín de amistades y discípulos.

El profesor Peraire sabe de qué modo ofrecer la mejor base sobre la que el alumnado pueda construir su futuro. Esta es una formación que busque desarrollar en cada persona el dominio de los fundamentos, la versatilidad mental, la motivación para aprender y la confianza en sí misma. Por eso no ha dudado en liderar programas de formación pioneros como el programa de máster interdisciplinar en Computación para el Diseño y la Optimización en el MIT. El programa es altamente competitivo y ya ha sido adoptado como modelo por otros programas de nueva creación en todo el mundo. O como la Singapore-MIT Alliance, de la cual ha sido promotor y director, y, más concretamente, de su programa de computación de alto rendimiento para sistemas de ingeniería (*high performance computation for engineered systems*, HPCES), tanto para obtener el título de máster como el de doctorado. Esto ha implicado, entre otras cosas, el desarrollo de asignaturas a distancia con material docente especí,co que siguen simultáneamente estudiantes del MIT y de la NUS (Universidad Nacional de Singapur). Todavía se ofrece el curso cada otoño a los estudiantes del MIT utilizando materiales desarrollados en su inicio.

Investigación y conocimiento

El profesor Peraire fue pionero en el uso de métodos de malla no estructurada y de malla adaptativa para la simulación numérica de problemas de aguas someras, flujos no viscosos (ecuaciones de Euler) y viscosos (ecuaciones de Navier-Stokes compresibles

e incompresibles). Dicho así suena árido, y lo es, y además parece difícil, que también. Sobretodo cuando se aplica a configuraciones completas de vehículos y, más difícil todavía, se tenía que convencer a la industria aeronáutica de que los elementos finitos con mallas no estructuradas y adaptativas era una alternativa mejor a lo que estaban empleando. Es decir, que dejaran de usar los códigos de diferencias finitas en los que tenían experiencia y en los habían formado al personal para pasar a emplear lo que él proponía. Lo consiguió. Escribió la versión inicial del código de cálculo de dinámica de fluidos FLITE, que es el principal código de malla no estructurada que se está utilizando actualmente en BAE Systems. Escribió el código FELISA para la aerodinámica de reentrada, que se usa en la NASA y que se distribuyó a varias empresas de los EE. UU. Las simulaciones de flujo utilizando el código de FELISA fueron ampliamente utilizadas por el Langley Research Center de la NASA durante la investigación del accidente del transbordador *Columbia*.

Como puede imaginarse, todo esto ha implicado tocar muchas teclas (en todos los sentidos). Sólo comentaré brevemente dos de ellas: los métodos de resolución y el desarrollo de generadores de mallas.

En lo que se refiere a los métodos, además de trabajar ampliamente en el desarrollo de algoritmos y métodos de elementos finitos, como he comentado, también lo hizo en métodos de volúmenes finitos basados en aristas para usar mallas no estructuradas (*edge-based unstructured mesh finite volume methods*), métodos de interfaz inmersa para la interacción fluido-estructura (*immersed interface methods for fluid-structure interaction*), técnicas de captura de choque, métodos de orden reducido para problemas no lineales y técnicas de control óptimas aplicadas al control de flujo y diseño de formas. Y me dejo otras para no ser exhaustivo.

En generación de mallas desarrolló una biblioteca para tetraedros que permitieran discretizaciones adecuadas para fluidos y estructuras directamente desde las especificaciones de CAD. Esta biblioteca está licenciada a través de la oficina de licencias del MIT y Visual Kinematics, y se está utilizando en varios paquetes de elementos finitos comerciales.

Más tarde abrió otra línea: la fiabilidad, credibilidad, de los cálculos. Un responsable de Airbus de aquella época lo describía perfectamente. Decía que las generaciones de ingenieras e ingenieros que salían de las escuelas ya se habían formado en elementos finitos y por lo tanto se creían los resultados. Las generaciones anteriores no se fiaban tanto y, por consiguiente, antes de pasar los números realizaban comprobaciones de convergencia. Los de ahora, decía, ya no realizan los cálculos de convergencia: por una parte, no cuestionan lo que les da el ordenador y, además, cada vez ponemos las máquinas al límite de su capacidad y eso no da lugar a verificar la convergencia. Con esta motivación, Peraire trabajó en cotas de error (límites superiores e inferiores del error), obtenidas como un postproceso de las soluciones aproximadas cuya precisión se deseaba evaluar. Bueno, "soluciones" es muy genérico; más propiamente, propuso varios algoritmos de optimización convexos para evaluar las cotas de cantidades de interés de las soluciones de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Estas cotas son exactas, es decir, se puede demostrar que estos límites inferior y superior lo son respecto de la solución exacta de la ecuación diferencial en derivadas parciales subyacentes, con lo que se proporcionaba una herramienta de verificación y certificación del software y de su *output* muy potente.

De manera natural todo este bagaje le ha permitido desarrollar un marco de fiabilidad múltiple para la simulación y diseño del vuelo por aleteo. Mediante el uso de modelos con distintos costes y niveles de fidelidad, se hace posible una amplia exploración del espacio de diseño para los drones. Estas propuestas son la herramienta central para el análisis de vuelos inspirados biológicamente. De hecho, este marco se ha utilizado para realizar los primeros estudios paramétricos y simulaciones detalladas del vuelo de los murciélagos en un proyecto conjunto de varias universidades norteamericanas.

Su trabajo más reciente sobre los métodos de Galerkin discontinuos de alto orden se ha centrado en el desarrollo de métodos híbridos y mixtos que proporcionan aproximaciones de la solución (primal) y su gradiente con precisión óptima para sistemas de ecuaciones de la física matemática. Estos métodos híbridos están siendo adoptados por los grupos que trabajan en el desarrollo de aproximaciones de alto orden para las ecuaciones de dinámica de gases, mecánica de sólidos, propagación de ondas y aplicaciones electromagnéticas.

Podría seguir y, si me dan una pizarra y tiza, les contaría con mucha más pasión los detalles por los que sus aportaciones son únicas y originales. Pero me temo que eso hoy no toca. Por otro lado, no quiero acabar esta sección sin comentar el respeto que tiene nuestra comunidad académica al profesor Peraire, los premios que ha recibido son numerosos. Pero creo que vale la pena resaltar las cartas de apoyo que ha recibido la propuesta de este doctorado *honoris causa* de los presidentes de asociaciones del Reino Unido, Francia, España y los EE. UU.

Vocación de servicio

Dejo muchas cosas en el tintero, pero no sería justo describir la trayectoria del profesor Peraire sin hablar, aunque sea de forma muy breve, de su claro compromiso con la sociedad y su vocación de servicio. Todas las instituciones por donde ha pasado tienen constancia de esta virtud, asociada a su actitud y su carácter.

Por ejemplo, tomó las riendas del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica del MIT en 2011, un momento que no era fácil, todavía estábamos bajo los coletazos de la Gran Recesión (la crisis económica y financiera), y lideró la renovación y modernización de dicho Departamento. Un ejemplo de entre muchos ha sido su capacidad para poner de acuerdo a la industria, a donantes filantrópicos y a la administración del MIT para llevar a cabo la renovación del túnel de viento de los hermanos Wright (Wright Brothers Wind Tunnel). Esta icónica infraestructura había sido inaugurada en 1938 y se ha empleado para diseñar aviones, pero también para aplicaciones muy diversas, como estudiar antenas terrestres, la aeroelasticidad de aeronaves y estructuras terrestres, la equipación de esquí, trajes espaciales, bicicletas, motocicletas, entradas a estaciones de metro, velas de barcos, turbinas eólicas y automóviles solares, y, más recientemente, para diseñar un avión comercial limpio, silencioso y supereficiente.

También cabe resaltar su relación con nuestra comunidad, que le ha merecido la medalla Ildefons Cerdà del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Cataluña o el Premio SEMNI Olgierd Zienkiewicz de la Sociedad Española de Mecánica e Ingeniería Computacionales. Nunca ha rehuido ayudarnos, al contrario, ha acogido a un gran número de estudiantes, doctores y profesores de la UPC que ahora están en esta u otras universidades o en centros de investigación del entorno UPC. Ha sido el director del programa MIT-Spain dentro del MISTI: MIT International Science and Technology Initiatives. Cabe recordar que el programa MIT-Spain trabaja de la mano con una red de corporaciones de primer nivel, universidades e institutos de investigación. Organizan prácticas para estudiantes del MIT en el extranjero y facilitan las colaboraciones de investigación entre el profesorado del MIT y sus homólogos españoles. Quiero aprovechar la ocasión para resaltar su ayuda para que la UPC se incorporara a la iniciativa CDIO: Conceive Design Implement Operate. Volvemos a la educación con este marco educativo que se centra en los fundamentos de la ingeniería establecidos en el contexto de concebir, diseñar, implementar y operar sistemas y productos del mundo real. Los colaboradores de la iniciativa CDIO la han adoptado como marco de su planificación curricular y la evaluación basada en resultados.

Quiero acabar esta semblanza del profesor Peraire, estimado Jaume, diciendo que es un buen hombre, divertido, curioso y un querido amigo que ejerce de catalán en cualquier lugar del mundo.

Por todo lo expuesto, solicito al rector y demás autoridades académicas del Claustro que se proceda a investir al Excelentísimo Señor Profesor Don Jaume Peraire con el grado de doctor *honoris causa* por la Universitat Politècnica de Catalunya.

Discurso del nuevo doctor *honoris causa*, Dr. Jaume Peraire

Gracias a todos por estar aquí. Para mí este doctorado *honoris causa* es especialmente significativo por dos motivos. Uno es que me lo otorga una institución muy respetada que reúne una inmensa cantidad de talento y que ha tenido un gran impacto en el desarrollo social y económico de Cataluña. El otro, de carácter más sentimental, es que, además, la UPC es mi *alma mater*, un lugar en el que tengo muchos amigos y compañeros. Habiendo crecido a pocos kilómetros de aquí, el reconocimiento que hoy recibo de la UPC es mucho más de lo que habría podido imaginar. Normalmente, cuando alguien recibe estas distinciones es señal de que tiene buenas amistades, y yo ciertamente las tengo. Quiero dar las gracias a todos: a la gente de la Escuela de Caminos, la Escuela de Telecomunicaciones, las escuelas de Ingeniería Aeroespacial de Terrassa y Castelldefels, el LACAN, el CIMNE, el BSC y la UPC en general. Si estoy aquí hoy es gracias a muchas personas que me han apoyado y han tenido un impacto en mi vida. A veces, el apoyo ha sido instrumental. Otras, venía en forma de consejo o de palabras de ánimo, o simplemente consistía en hacerme sentir como en casa cuando estaba lejos de la mía. Deseo mencionar a Eugenio Oñate y Xavier Oliver, que me ayudaron desde el primer día; Antonio Huerta, un antiguo compañero de grado que es ahora compañero de profesión y, lo más importante, un amigo querido. Antonio, Pedro Díez y otros me han acogido generosamente en mis numerosas visitas a la UPC a lo largo de los años. Durante mi estancia en Gales y más tarde en Londres, tuve la suerte de encontrar gente maravillosa. La lista de profesores, mentores, compañeros, estudiantes y amigos es demasiado larga como para mencionarlos a todos aquí, pero no quisiera dejar de mencionar a Olek Zienkiewicz y Ken Morgan. Los conocí poco después de mi llegada a Gales. Me hicieron sentir parte de sus familias desde el principio y me han apoyado a lo largo de toda mi carrera. Por último, sería una falta de consideración por mi parte si no hablara de mi maravillosa familia, que siempre me ha apoyado y me ha animado en mis aventuras. Quiero expresar mi gratitud a mis padres, que ya no están; a mi mujer, Anna; a mis hijos; a mis hermanas, y al resto de la familia. Gracias. Ya sabéis lo importantes que habéis sido y seguís siendo en mi vida.

Me dijeron que este discurso no necesitaba tener ningún formato específico. Es por ello por lo que pensé en hablar de algunos temas que me resultan fascinantes y que espero que os parezcan interesantes. Aprovecharé la ocasión para exponeros un relato personal de algunos de los retos y oportunidades de la ingeniería aeroespacial. Al fin y al cabo, me considero ingeniero aeroespacial, aunque estoy muy orgulloso de mi formación

inicial en la UPC como ingeniero civil. La ingeniería aeroespacial es la rama de la ingeniería relacionada con el diseño, el desarrollo, la producción y la operación de aviones, naves espaciales y sistemas y equipos de apoyo. En mi opinión, esta descripción ampliamente aceptada no logra transmitir el gran impacto social de la ingeniería aeroespacial ni el papel crítico que desempeña para el futuro de la humanidad.

La industria aeroespacial ha contribuido y sigue contribuyendo de forma esencial a la actividad económica mundial, la investigación y la innovación. Cuesta imaginar el mundo actual sin la huella de la ingeniería aeroespacial. Habríamos tenido que encontrar medios de transporte alternativos, más lentos y probablemente más costosos; tampoco habría satélites que permitieran las comunicaciones, los GPS o la previsión del tiempo.

En 2011 fui nombrado director del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica del MIT. Dentro del MIT, el Departamento de AeroAstro –como lo llamamos habitualmente– es uno de los departamentos pequeños de mayor tamaño (después del de Ingeniería Mecánica y el de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación) de la Escuela de Ingeniería. Pero, lo que es más importante, es el único departamento integrado verticalmente en la Escuela. A diferencia de otros departamentos que se organizan en torno a grandes grupos disciplinarios, AeroAstro es mucho más interdisciplinar y busca tener competencias en todos los aspectos relevantes para la empresa aeroespacial: desde la aerodinámica hasta el control del tráfico aéreo, los satélites, las estructuras espaciales, la fabricación, los cohetes, la autonomía, el impacto medioambiental del transporte aéreo y el comportamiento del cuerpo humano en el espacio. Además, estas competencias van cambiando con el tiempo a medida que la industria aeroespacial evoluciona. El Departamento cuenta con una larga historia de 100 años: tiene el programa de posgrado más antiguo del país y está relacionado con muchos pioneros y referentes de este campo. Ha jugado un papel fundamental en todos los desarrollos aeroespaciales relevantes de Estados Unidos, como las familias de aviones Douglas y Boeing, el programa Apollo, el telescopio Hubble, la exploración de Marte y la Estación Espacial. Digo todo esto porque una de las funciones cardinales del director del Departamento es entender hacia dónde se mueve el sector aeroespacial y anticiparse a los avances tecnológicos y educativos que se necesitarán en los próximos 10-20 años para poder realizar inversiones en investigación y formación, incluyendo la contratación de profesorado y la construcción de instalaciones.

Transporte aéreo

Permitidme que empiece por el transporte aéreo. En mi opinión, el sistema actual de transporte aéreo es uno de los logros más destacables de la ingeniería. Me refiero a la aviación comercial y no a la aviación general, que incluye aeronaves privadas y recreativas. Actualmente, la flota mundial de aviones comerciales es de unas 35 000 naves, transporta cerca de 5 000 millones de pasajeros al año y facilita un 30-40 % del valor del comercio mundial. El avión moderno constituye un hito extraordinario de la ingeniería. Una vez que sale de la fábrica, pasará entre un 30 % y un 60 % de sus 30 años de vida en el aire. Posee unos motores diseñados para funcionar más de 40 000 horas (4,5 años) sin revisiones importantes; la potencia que suministra un único motor de reacción, que puede superar los 20 MW, es equivalente a la que consumen unos 20 000 hogares. Además, ofrece una excelente seguridad y fiabilidad. En los últimos 50 años, el riesgo de accidente mortal se ha reducido por 12: de 6 a 0,5 por millón de vuelos. En comparación con otros medios de transporte, es una cifra muy baja; el riesgo de accidente por kilómetro viajado en ferrocarril es 12 veces mayor y en coche, 60 veces mayor.

Permitidme que ahora os hable de algunas de las posibilidades y los retos de este extraordinario sistema. Se espera que la demanda de viajes aéreos se duplique a mediados de siglo. Y es que esta demanda se ha ido duplicando cada 15-20 años desde hace bastante tiempo. El incremento en la demanda vendrá prin-

cipalmente de los países en desarrollo, ya que no disponen de alternativas para recorrer grandes distancias en un período de tiempo razonable. Se espera, además, que en las zonas densamente pobladas la necesidad de movilidad aérea urbana crezca. En las ciudades más congestionadas, el transporte aéreo será muy probablemente una opción, incluso para trayectos cortos que normalmente se cubren en coche o ferrocarril. Los analistas calculan que, en menos de 20 años, el mercado de movilidad aérea urbana tendrá un valor estimado de unos 500 000 millones de dólares anuales. De hecho, existen ya unas 70 empresas en todo el mundo que intentan desarrollar vehículos competitivos con unos requisitos de despegue y aterrizaje reducidos para capturar ese mercado.

Esta ansia aparentemente insaciable por los viajes aéreos presenta importantes retos. La infraestructura actual está –o pronto lo estará– al máximo de su capacidad en muchas regiones del mundo, lo que provoca congestiones frecuentes que afectan a toda la red. Ahora mismo parece inevitable que, en un futuro próximo, el aumento del tráfico traerá consigo una importante escasez de capacidad y muchos vuelos no cubiertos. Además, la flota de vehículos aéreos no tripulados está aumentando de forma exponencial y la presión para integrarlos en el sistema actual de gestión del tráfico aéreo agrava la congestión y plantea grandes problemas de seguridad.

Por si fuera poco, todavía no hemos hablado del gran reto, que es, evidentemente, el impacto del transporte aéreo sobre el cambio climático. El transporte aéreo solo es responsable del 5 % de todas las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. Sin embargo, es el que presenta un crecimiento más rápido. Aparte, si se consideran las distintas actividades humanas que dependen de los combustibles fósiles, el transporte aéreo es probablemente la actividad en la que resulta más difícil sustituir dichos combustibles por alternativas más ecológicas. Actualmente no existen alternativas a los hidrocarburos en cuanto a energía por unidad de masa y energía por unidad de volumen. Estas dos métricas son vitales para determinar los límites del alcance de una aeronave y su carga útil. Desde un punto de vista técnico, es mucho más fácil reducir el uso de combustibles fósiles en operaciones terrestres, tales como la generación de energía y el transporte de superficie, y anticipo que esto ocurrirá en el futuro.

Sin embargo, creo que, en un horizonte de menos de 20 años, será necesario encontrar soluciones que no contribuyan globalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero si queremos ver crecer la oferta para satisfacer la demanda. Ello plantea un enorme reto que solo puede abordarse con las nuevas tecnologías. Parece que no existe una fórmula mágica. Las soluciones probablemente vendrán de los avances en varios ámbitos, como nuevos materiales ligeros, una mejor comprensión de los impactos ambientales de la aviación, diseños avanzados con energía distribuida y fuentes de energía alternativas como los combustibles de aviación sostenibles (SAF), el hidrógeno y la electrificación. De entre las opciones disponibles, los que implican realizar menos cambios en la infraestructura existente son los combustibles de aviación obtenidos a partir de biomasa. En cambio, el hidrógeno y la propulsión eléctrica exigen realizar cambios radicales en los vehículos y la infraestructura actuales. La electrificación parece ser una opción muy adecuada para los mercados de transporte regional y de cercanías, y espero que se desarrollarán soluciones con vehículos aéreos eléctricos para atender la demanda de movilidad urbana.

En resumen, serán necesarios cambios estructurales en un sistema que es tradicionalmente muy conservador. Las inversiones de capital son importantes, los riesgos tecnológicos son elevados y los procesos de certificación son caros, largos y tediosos. Sin embargo, la industria aeroespacial es una industria con un extenso historial de innovación, que desafía continuamente los límites de lo posible. A modo de ejemplo: aunque las diferencias entre la línea exterior de un Boeing 707 de la década de 1950 y la de un avión moderno de Boeing o Airbus son apa-

rentemente mínimas, las emisiones se han reducido un 80 %. Ampliando el espacio de diseño con nuevos modelos de gestión del tráfico aéreo, nuevas tecnologías y fuentes alternativas de energía verde, alcanzar un sistema de transporte aéreo sin emisiones en un período de 20 años parece factible.

Acceso espacial y satélites

Ahora me gustaría levantar la mirada y hablar del espacio. El espacio es la nueva frontera que nos separa de la exploración de nuevos mundos y ofrece un abanico interminable de oportunidades que solo parece limitado por nuestra imaginación: exploración robótica del sistema solar, exploración del espacio profundo con telescopios o innovadoras naves tripuladas y asentamientos en otros planetas. Con toda seguridad, muchas de estas actividades serán una realidad en el futuro, pero hoy me quiero centrar en un aspecto del espacio tal vez menos glamuroso pero que no obstante tiene un gran impacto en nuestras vidas. Quiero hablaros de satélites y de la infraestructura necesaria para lanzarlos. Los satélites se utilizan para las comunicaciones, las previsiones meteorológicas, la navegación (GPS), la observación de la Tierra, la astronomía, las aplicaciones de vigilancia y defensa, la ciencia y la educación, entre otros; es una lista que crece día a día.

Hasta ahora, se han puesto en órbita cerca de 9 000 satélites. Unos 1 500 satélites se encuentran en órbitas geosíncronas, que son órbitas con un radio de unos 40 000 km (unas 6,5 veces el radio de la Tierra) y un período igual a un día. El resto se encuentran en órbitas de altitud inferior, que pueden llegar a ser tan bajas como 200 km sobre la Tierra, y períodos de rotación cercanos a los 90 minutos.

Se calcula que son unos setenta los países que cuentan con al menos un satélite en órbita. Esta democratización del espacio contrasta con que solo once países han demostrado la capacidad de lanzar un cohete que pueda poner un satélite en órbita. Y solo tres países han demostrado la capacidad de poner una cápsula en órbita y hacerla volver a la Tierra, lo que nos da una idea de lo difícil que es ir al espacio. Para alcanzar una órbita terrestre baja, el cohete debe poder llevar el satélite a una altitud mínima de 200 km y a una velocidad de 30 000 km/h. Los límites físicos implican que, incluso utilizando un cohete multietapa, la carga útil se sitúa normalmente entre el 1 % y el 4 % de la masa total, una cifra que se reduce hasta el 0,5-1,5 % para órbitas geosíncronas. El cohete SpaceX Falcon 1, por ejemplo, mide 21 m de altura y 1,7 m de diámetro, pesa 26 t y es capaz de llevar una carga útil de solo 200 kg a la órbita terrestre baja.

El crecimiento futuro de los satélites comerciales no está claro, hay muchos factores en juego. Lo que sí está claro es que la miniaturización de los componentes electrónicos y ópticos ha permitido reducir de forma drástica el tamaño y el peso de los satélites necesarios para una misión concreta. Además, las mejoras tecnológicas han permitido reducir el coste de puesta en órbita por kilogramo. Durante años, este coste era de unos 20 000 USD/kg, pero ha ido disminuyendo en los últimos años. En algunos de los últimos lanzamientos, este ha sido inferior a los 1 000 USD/kg. La reutilización de los vehículos de lanzamiento, tal y como propone la empresa SpaceX, supondrá un punto de inflexión y comportará aún más reducciones de costes. Para ilustrar este punto, podemos comparar, por ejemplo, el coste de un cohete Falcon 9 en un viaje a la estación espacial con un vuelo de larga distancia entre Nueva York y Hong Kong. Vemos que, si bien el coste de los vehículos y el del combustible son comparables, la aeronave se amortiza en un período de 25-30 años, que incluye miles de viajes. En cambio, el cohete sin reutilización, solo realiza un vuelo y luego es desechado. Con la reutilización de los vehículos de lanzamiento, es muy posible que podamos ver el coste de lanzamiento bajar hasta los 10-100 USD/kg en el futuro.

Es probable que siga habiendo reducciones en los costes para acceder al espacio que permitirán el desarrollo de nuevas aplicaciones. Actualmente se están considerando constelaciones de cientos o incluso miles de satélites. Cada día aumenta el número de empresas con nuevas aplicaciones que entran en el

mercado de satélites comerciales. Estas aplicaciones incluyen campos radicalmente nuevos tales como la fabricación y la minería en el espacio.

Existe un factor importante que amenaza a este futuro prometedor: el peligro que supone la basura espacial para los satélites. Esta basura ha sido generada por pruebas antisatélite efectuadas en el pasado, colisiones de satélites y satélites fuera de servicio. Un pequeño fragmento del tamaño de una pelota de golf a velocidades orbitales tiene energía suficiente para destruir activos que cuestan cientos de millones de dólares.

En 1978, el científico de la NASA Donald Kessler describió un escenario en el que la densidad de la basura espacial en la órbita terrestre era lo suficientemente alta como para que la colisión entre objetos pudiera dar lugar a una cascada en la que cada colisión generaba más fragmentos, lo que aumentaba la probabilidad de más colisiones. Es lo que se conoce como síndrome de Kessler. No sabemos cuán cerca estamos de ese escenario crítico, pero es evidente que la basura espacial representa un reto importante para el que todavía no se han demostrado soluciones viables.

Ciencia e ingeniería aeroespacial computacional

No quisiera terminar sin realizar algunas observaciones sobre la ciencia y la ingeniería computacionales (CSE) y su impacto en materia aeroespacial. Como muchos de vosotros sabéis, la modelización y la simulación por ordenador de sistemas físicos son unas de mis pasiones y han estado en el centro de mi carrera investigadora. He sido testigo de la transición de la CSE de ser un área prometedora de investigación a tener una presencia dominante en todos los aspectos de la ingeniería, con un impacto casi imposible de cuantificar y que a menudo se subestima. La impresionante potencia de la CSE actual se debe a los avances realizados a lo largo de 50 años tanto en hardware como en algoritmos informáticos. Recientemente, la miniaturización y el coste reducido de la electrónica han provocado una explosión en la disponibilidad de datos, lo que ha abierto el campo de las simulaciones basadas en datos. Aquí, la adquisición y la simulación de datos se realizan de forma simultánea para producir nuevas capacidades predictivas y de toma de decisiones con niveles de precisión sin precedentes.

Todo lo que pueda decirse sobre el impacto de la CSE en el ámbito aeroespacial se queda corto. La CSE ha permitido el diseño, el desarrollo, la producción y la operación de los sistemas aeroespaciales que he descrito anteriormente y muchos otros. Pero lo más importante es que es una herramienta esencial para seguir progresando. También será indispensable para avanzar en nuevos ámbitos emergentes, como la autonomía o la comprensión y mitigación de los impactos ambientales de la aviación.

Permitidme exponer tres ejemplos del ámbito aeroespacial que atraen un importante esfuerzo de investigación y en los que la computación está jugando un papel crítico.

El primero es la simulación de flujos hipersónicos. Son flujos de alta energía que se encuentran alrededor de vehículos que vuelan a velocidades entre 5 y 20 veces la velocidad del sonido. Los flujos hipersónicos son relevantes para el acceso al espacio, la reutilización de cohetes y tal vez algún día para aplicaciones de transporte civil. Con la potencia de las ondas de choque, la temperatura del aire puede alcanzar valores de 5 000 K o más, que es superior a la temperatura de fusión de cualquier material utilizado para proteger la superficie de una nave espacial. A esas temperaturas, el aire se disocia y se ioniza, y muestra un comportamiento muy diferente al del aire en las condiciones del nivel del mar. Dependiendo de los materiales de la nave espacial, las reacciones de oxidación entre el aire ionizado y los materiales pueden resultar muy agresivas y dar lugar a una erosión rápida. El principal reto a la hora de diseñar vehículos hipersónicos es que no es factible reproducir estas condiciones de flujo que implican bajas densidades y temperaturas muy elevadas en túneles de viento. Las únicas fuentes de información existentes son los datos de las pruebas de vuelo, que son muy costosas y complejas, y las simulaciones numéricas. Para daros una

idea de la complejidad del problema y de todo lo que todavía no sabemos, os hablaré de un experimento de vuelo que llevó a cabo DARPA recientemente: el HTV-2 Falcon. El HTV-2 Falcon es un vehículo no tripulado impulsado por un cohete diseñado para planear por la atmósfera terrestre a unos 18 000 km/h, es decir que recorrería la distancia entre Nueva York y Los Ángeles en unos 13 minutos. El primer vuelo solo duró 9 minutos antes de que el vehículo se desintegrara en el aire. La investigación del accidente señalaba la existencia de ondas de choque que arrancaron la piel del vehículo, ya que eran 100 veces más fuertes que las que estaba diseñado para soportar. Se ha evidenciado que se necesitarán capacidades de predicción más sofisticadas y precisas que tengan en cuenta los múltiples efectos físicos que no se tenían en cuenta antes. Actualmente se está desarrollando una nueva generación de simulaciones de flujos hipersónicos que incorpora cálculos de mecánica cuántica y dinámica molecular para tener en cuenta los efectos químicos en el aire y las interacciones con los materiales de las naves espaciales.

Otra aplicación que cada vez atrae más la atención en la industria aeroespacial son los gemelos digitales. Un gemelo digital es una réplica virtual que refleja con precisión el comportamiento de un objeto físico, como un motor de reacción. El objeto físico está equipado con sensores que generan datos sobre distintos aspectos de su rendimiento, tales como la producción de energía o la temperatura de combustión. Entonces, el modelo digital asimila esos datos, que pueden utilizarse para ejecutar simulaciones que permitan estudiar problemas de comportamiento y sugerir acciones para mejorar el rendimiento y la seguridad del sistema y minimizar los costes. Se pueden construir gemelos digitales para componentes, vehículos enteros, procesos de fabricación y hasta sistemas de vehículos. Quiero mencionar también Destination Earth, la ambiciosa iniciativa de la UE para desarrollar un gemelo digital del ecosistema de la Tierra. Este modelo podría resultar esencial para cumplir con los objetivos de impacto climático en los próximos años, incluidos los relacionados con el sector aeroespacial.

Por último, me gustaría concluir mi discurso hablando de los sistemas autónomos en el transporte aéreo. La autonomía y la integración de sistemas autónomos y personas que trabajen de forma coordinada son requisitos previos para el futuro de los vehículos aéreos no tripulados (UAV) y las soluciones de movilidad aérea urbana. A pesar de todos los logros alcanzados en materia de autonomía, los sistemas actuales todavía no cumplen las exigencias de seguridad y fiabilidad para las aplicaciones aeroespaciales. El objetivo final es que los sistemas autónomos compartan el espacio aéreo con aviones convencionales y que los vehículos aéreos no tripulados superen el llamado test de Turing o el juego de la imitación. En la década de 1950, Alan Turing propuso un test para determinar la capacidad de una máquina de mostrar un comportamiento inteligente de verdad. Podría idearse un concepto similar para aviones autónomos. El test se superaría cuando un observador remoto de un UAV que volara en un entorno complejo, incluyendo el despegue y el aterrizaje, fuera incapaz de diferenciar si el vehículo se pilotaba en remoto o si se pilotaba a sí mismo y tomaba sus propias decisiones en función de las entradas recibidas. El aumento de los niveles de autonomía exige aumentar la capacidad de adquisición, procesamiento y cálculo de datos mediante sistemas integrados y centralizados. Se necesitarán nuevos algoritmos para simulaciones basadas en datos, el aprendizaje automático y la toma de decisiones para poder hacer frente a los retos del futuro.

Y con esto termino mi presentación. Como podéis ver, no he intentado hacer un repaso exhaustivo del ámbito aeroespacial, sino que he presentado varios temas que me interesan y que espero que también os hayan resultado interesantes. Aunque he hablado de los importantes obstáculos y preocupaciones que tenemos delante, especialmente aquellos que tienen que ver con el medio ambiente, hablo con ilusión por la tecnología y la innovación que supondrán sus soluciones.

Gracias.

Order of the award ceremony

Welcome from the rector of the Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech, Prof. Daniel Crespo.

Reading of the Governing Council's decision by the general secretary, Ms Ana B. Cortinas.

Oration for Prof. Jaume Peraire by the sponsor, Prof. Antonio Huerta.

Conferral of the honorary doctorate in Prof. Jaume Peraire by the Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech.

Acceptance speech by Prof. Jaume Peraire.

Speech by the rector, Prof. Daniel Crespo.

Gaudeamus igitur, universitary hymn. Arranged by Joan Casulleras

---

Gaudeamus igitur iuvenes
dum sumus, (bis)
post iucundam iuventutem,
post molestam senectutem
nos habebit humus (bis)

Ubi sunt qui ante nos
in mundo fuere (bis)
adeas ad inferos,
transeas ad superos
hos sivis videre (bis)

Vivat academia,
vivant profesores, (bis)
vivat membrum quolibet,
vivant membra quaelibet
semper sint in flore (bis)

Oration for Prof. Jaume Peraire

Prof. Antonio Huerta
Professor of Applied Mathematics. Universitat Politècnica de Catalunya · BarcelonaTech
Director of the Catalan Institution for Research and Advanced Studies (ICREA)
President of the International Association for Computational Mechanics

Rector of the Universitat Politècnica de Catalunya, authorities, colleagues, friends who have come to Barcelona for the occasion, esteemed students, ladies and gentlemen, and, of course, Professor Peraire.

It is a pleasure and an honour to comply with the convention entrusted to me of articulating the traditional oration to praise the merits of Professor Peraire on the occasion of this ceremony. Today we award him the title of doctor *honoris causa* of the UPC. I must confess that I am both overwhelmed and delighted to be able to express the recognition of the UPC, and, of course, my own, to such a prominent scholar. I was lucky enough to meet him more than forty years ago, and it is a privilege to benefit from his friendship still today.

A doctorate *honoris causa* is awarded as a token of esteem and respect, it is a doctorate "for cause of honour." It is therefore the highest recognition in life to those who have stood out in their career for their work, virtue, merits and actions, and who are not doctors by the university that bestows the degree.

Today is particularly important for the UPC and all the institutions supporting his candidature. This is an honorary doctorate conferred on a former student who has built up an exceptional academic career and, in spite of this, has never forgotten his alma mater, supporting and helping our academic community unconditionally whenever we requested it. It is said in the Bible that no prophet is accepted in his hometown. It is always easier to reward the foreigner, the stranger; this precludes comparisons that might not be too generous for us. Today we contradict the saying: Professor Jaume Peraire has returned to his university, to his homeland, to receive a recognition in accordance with his outstanding achievements.

Professor Peraire is the H. N. Slater Professor of Aeronautics and Astronautics at the Massachusetts Institute of Technology (MIT). The name preceding the title indicates that this is an endowed chair. A tradition that, unfortunately, is alien to us here but that dates back to 1502, when Lady Margaret Beaufort, mother of King Henry VII, founded the Lady Margaret Professorship of Divinity at the University of Oxford. Endowed chairs are today one of the most prestigious and permanent investments that can be made in a university. They are a key aspect in attracting and retaining superior faculty. Endowed positions offer an unequalled instrument to empower research and constitute a unique opportunity for students to study under the guidance of world-renowned scholars. Of course, MIT follows this strategy to select and reward its best faculty. Since we refer to the MIT

strategy, I would like to recall the mission of MIT "to **advance knowledge** and **educate students** in science, technology, and other areas of scholarship that will best **serve** the nation and the world in the 21st century."[1] Then, its objectives insist on these three points: **education, research and scholarship**, and **service**.

I also wish to take this opportunity to convey to the young people in the audience the passion that Professor Peraire brings into every aspect of his work. Both the passion to learn, which comes from the curiosity to know, "the need to know"[2], and the pleasure to educate require a clear commitment to excellence, service and leadership. And they clearly counterbalance and outgrow all the dedication, sacrifices and efforts required. All these ingredients are absolutely necessary to contribute, with your own work, to extend the frontier of knowledge (learning and creating excellent and relevant science) and to apply these advances in educating the new generation in order to build a better and fairer society.

Let's go back to the three points of MIT's mission and objectives: education, research and scholarship, and service.

Education

Professor Peraire's university education began here, at an emerging Escola de Camins that broke with the historial practice of other Spanish engineering schools. Faculty had PhDs, research experience and worked full-time at university; a university position was no longer the "icing on the cake" of a career in the administration or professional practice, it was a career in itself. The Escola de Camins focused on education, and it guided other schools in Spain with a six-year programme that was extensively worked on and fiercely debated by students and faculty. They aimed at avoiding a simple recollection of information, but rather focused on educating students with intellectual tools and the fundamentals in order to practice and lead the profession. Not everything was done well, but those who shaped the character of the Escola de Camins in that period were able to transmit some of this passion and curiosity I talked about before. I thank them for it.

Having finished his six years at the Escola de Camins in 1983, Professor Peraire moved to Swansea University, where he worked on his doctoral thesis with professors Olgierd Zienkiewicz and Kenneth Morgan. Olgierd Zienkiewicz was a civil engineer devoted to numerical methods and a founder of the finite element method, while Kenneth Morgan is a mathematician devoted to numerical methods and one of the pioneers of finite elements in fluids. Professor Peraire was clever enough to learn from them the essence and many subtleties of the multifaceted academic life, and there he began his teaching career. In 1989 he made the formal transition from civil to aeronautical engineering, and he did so by choosing one of the best departments in Europe, the one at Imperial College. Later, in 1992, he moved to MIT. In every place he learnt and he taught, and more important, he nurtured many friends and disciples.

Professor Peraire knows how to offer students the best foundation on which to build their future, that is, an education that seeks to develop in each person a proficiency in fundamentals, versatility of mind, motivation for learning, and self-confidence. He did not hesitate to lead pioneering education programmes, such as the interdisciplinary master's degree in Computation for Design & Optimization (CDO) at MIT –the degree is highly competitive and has already been adopted as a model for other new programmes all over the world– and the Singapore-MIT Alliance, which he promoted and directed, developing also its High-Performance Computation for Engineered Systems (HPCES) programme, which includes a master and doctoral degrees. Of course, all of this necessitated, among other things, the development of distance courses with specific teaching materials that were followed simultaneously by students at MIT and the NUS (National University of Singapore). The programme is still

1 https://policies.mit.edu/policies-procedures/10-institute/11-mission-and-objectives
2 ICREA's motto

taught every autumn to MIT students, and materials developed by Professor Peraire are still used.

Research and scholarship

Professor Peraire pioneered the use of unstructured and adaptive mesh strategies for numerical simulation of shallow water, non-viscous flow (Euler equations) and viscous flow (compressible and incompressible Navier-Stokes equations) problems. Expressed like this, it may sound arduous, and yes, it is, and it also may sound difficult, and yes, it is. It becomes even worse when applied to complete vehicle configurations and, even more so, when the aeronautics industry had to be persuaded that unstructured and adaptive finite element meshes were a better option that what they were using. In other words, the advanced aeronautic industry had to be convinced that they had to replace the finite difference methods in which they had experience and had trained their staff for years in order to use the strategies advocated by Professor Peraire. He did it, he convinced them. He wrote the initial version of the computational fluid dynamics code FLITE, which is the main unstructured mesh code used by BAE Systems. He wrote the FELISA code for re-entry aerodynamics that is used by NASA and that was distributed to various companies in the US. Flow simulations using the FELISA code were widely used by NASA's Langley Research Center during the investigation into the *Columbia* space shuttle accident.

As you can imagine, all of this implied many facets and aspects of a complex problem. I will briefly comment on just two aspects: *solvers* and *mesh generators*.

As far as the solvers are concerned, in addition to developing new algorithms and finite element methods, he also worked on edge-based unstructured mesh finite volume methods, immersed interface methods for fluid-structure interaction, shock-capturing methods, reduced order methods for non-linear problems and optimal control techniques applied to flow control and shape design, and this is not an exhaustive list.

As for mesh generation, he developed a library for tetrahedrons that allowed appropriate discretisations for fluids and structures directly from CAD specifications. The library is licensed through the MIT license office and Visual Kinematics, and it is used in many finite element software packages.

Then he opened up another line: reliability and credibility of calculations. Someone at Airbus described it perfectly at that time. He explained that the new cohorts of engineers coming out of academia were already trained in finite elements and therefore believed those computations. Previous generations had not been so trusting and, as a result, before handing out the results they ran convergence tests. Today, he said, they no longer perform convergence tests: on the one hand, they do not question the computer output and, on the other, we keep pushing machines to the limit of capacity, and this does not help in verify convergence. With this motivation in mind, Peraire worked on error bounds (upper and lower limits of the errors), which were obtained postprocessing the approximate solutions whose accuracy was to be determined. Well, "solutions" is very vague; more accurately, he proposed several convex optimisation algorithms to compute bounds of quantities of interest for the solutions of partial differential equations. These bounds are exact, that is, it can be proven that these lower and upper limits bound the exact solution of the underlying partial differential equation. This provides a very powerful tool in order to verify and certify both software and its output.

Consequently, this background allowed him to develop a multi-fidelity framework for the simulation and design of flapping flight, which is the central analysis tool used in an Air Force-sponsored MURI (Multidisciplinary University Research Initiative) project on biologically-inspired flight. By using models that have different costs and fidelity levels, an extensive exploration of the design space for drones becomes possible. This framework has been used to do the first parametric studies and detailed simulations of bat flight.

His most recent work on high-order discontinuous Galerkin methods has focused on developing hybridised and mixed methods that provide approximations of the (primal) solution and its gradient with optimal accuracy for systems of equations in mathematical physics. Hybridised methods are being adopted by several groups working on developing high-order approximations for gas dynamics equations, solid mechanics, wave propagation and electromagnetic applications.

I could go on and, if you gave me a blackboard and a piece of chalk, I would tell you, with a lot more passion, every detail that makes Peraire's contributions unique and original. But I am afraid this is not my role here. Nevertheless, I do not want to end this section without mentioning a few significant tokens of respect and appreciation demonstrated by our community towards Professor Peraire. The awards he has received are numerous. But I think it is worth highlighting the letters of support that the proposal for this honorary doctorate has received from many people, in particular, the presidents of scientific associations in computational engineering in the United Kingdom, France, Spain and the USA.

Service

Obviously, this is non-exhaustive description all of Professor Peraire's merits, but it simply would be unfair not to mention, albeit very briefly, his undeniable commitment and definite vocation to serve society. Every institution he has been involved in is well aware of this inherent virtue of his standpoint and personality.

For example, he took the responsibility of becoming the head of the MIT Department of Aeronautics and Astronautics in 2011. The timing was not the easiest, still in the wake of the Great Recession (the economic and financial crisis). Nevertheless, he led the Department's renewal and modernisation. One example among many was his ability to bring together industry, philanthropic donors and the MIT administration to carry out the renovation of the Wright Brothers Wind Tunnel. This iconic infrastructure was inaugurated in 1938 and was used to design aircrafts but also to assess the aerodynamic properties of everything from terrestrial antennas, aeroelasticity of aircraft and ground structures, Olympic ski gear, space suits, bicycles, motorcycles, subway station entrances, boat sails, wind turbines and solar cars, and, more recently, to design a clean, quiet and super-efficient commercial aircraft.

I must also call attention to his relationship with our community, which has bestowed him the Ildefons Cerdà Medal from the College of Civil Engineers and the Olgierd Zienkiewicz SEMNI Award from the Spanish Society of Computational Mechanics and Computational Engineering. He has never shied away from helping us; on the contrary, he has welcomed a large number of UPC students, PhD graduates and professors who are now at the UPC or other universities or research centers. He was the director of the MIT-Spain programme within MISTI, the MIT International Science and Technology Initiatives. It is worth remembering that the MIT-Spain programme works hand in hand with a network of world-class corporations, universities and research institutes. They organise placements for MIT students abroad and facilitate research collaborations between MIT faculty and their Spanish counterparts. I would also like to take this opportunity to spotlight his support to the UPC in order that we could join the CDIO (Conceive Design Implement Operate) initiative. We come back to education with this educational framework that focuses on the fundamentals of engineering established in the context of conceiving, designing, implementing and operating real-world systems and products. The collaborators of the CDIO initiative have adopted it as a framework for curricular planning and results-based assessment.

I want to end this portrait of Professor Peraire, dear Jaume, by saying that he is a good man who is funny, curious and a dear friend who portrays himself as a Catalan anywhere in the world.

For all of the above, I ask that the rector and other academic authorities of the Senate proceed to invest Professor Jaume Peraire with an honorary doctoral degree from the Universitat Politècnica de Catalunya.

Acceptance speech by Prof. Jaume Peraire

Thank you all for being here. This honorary doctorate is particularly meaningful to me for two reasons. The first is that it is given by a highly respected institution that concentrates a formidable amount of talent and has had a major impact on Catalonia's social and economic development. The second is of a more sentimental nature, because the UPC is also my alma mater and a place where I have many friends and colleagues. As somebody who grew up only a few miles away from here, being recognised by the UPC today is much more than I could have ever imagined. It is usually the case that receiving such distinctions requires that one has good friends, and I certainly have them. Thanks to you all, to the folks in the civil engineering school, the telecommunications school, the aerospace schools in Terrassa and Castelldefels, LACAN, the CIMNE, the BSC and the UPC at large. I owe being here today to many people who supported me and had an impact on my life. Sometimes, this support was instrumental; sometimes, it came as advice, encouragement or simply by making me feel at home away from home. I want to mention Eugenio Oñate and Xavier Oliver, who helped me from the very early days; Antonio Huerta, an undergraduate classmate and later a colleague and, more importantly, a dear friend. Antonio, Pedro Diez and others have generously hosted my numerous visits to the UPC over the years. During my time in Wales and later in London, I had the fortune to run into wonderful people. The list of teachers, mentors, colleagues, students and friends is too long to mention here, but I want to mention Olek Zienkiewicz and Ken Morgan, whom I met early on when I arrived in Wales. They made me feel part of their families from the moment I met them and supported me throughout my career. Finally, it would be remiss of me not to mention that I have been blessed with a wonderful family that has always supported and encouraged my adventures. I want to acknowledge my parents, who are no longer with us, my wife Anna and my sons, sisters and extended families. Thank you. You know how important you have been and continue to be in my life.

I was told that there was no particular format for this speech. Therefore, I thought I would talk about some topics that I find fascinating and that I hope you will find of interest. I want to take this opportunity to present you with a personal account of some of the challenges and opportunities in aerospace engineering. After all, I consider myself an aerospace engineer, although I am indeed very proud of my early UPC education as a civil engineer. Aerospace engineering is the primary field of engineering concerned with the design, development, production and operation of aircraft, spacecraft and related systems and equipment. In my opinion, this broadly accepted description fails to capture the enormous societal impact of aerospace engineering and its critical role in the future of humanity.

The aerospace industry has been and continues to be an essential contributor to global economic activity, research and innova-

tion. It isn't easy to imagine today's world without the imprint of aerospace engineering. All of us would need to find alternative, slower and likely more costly forms of transport; there would be no satellites to enable communications, GPS or weather forecasting.

In 2011, I became the head of the Department of Aeronautics and Astronautics at MIT. At MIT, the AeroAstro department, as we usually refer to it, is one of the larger small departments (after the departments of Mechanical Engineering and Electrical Engineering and Computer Science) in the School of Engineering. But more importantly, it is the only vertically integrated department in the School. Unlike other departments that are organised around large disciplinary groups, AeroAstro is much more interdisciplinary and aims to have competencies in all aspects relevant to the aerospace enterprise —from aerodynamics to air traffic control, satellites, space structures, manufacturing, rockets, autonomy, the environmental impacts of air transportation and human performance in space. In addition, these competencies change over time as the aerospace industry evolves. The Department has a rich 100-year history —it has the oldest graduate programme in the nation, and it has been associated with many pioneers and leaders in the field. It has played instrumental roles in every significant aerospace development in the United States, such as the Douglas and Boeing families of aircraft, the Apollo programme, the Hubble telescope, Mars exploration and the Space Station. I am saying all this because one of the most critical roles of the Department's head is to understand where the aerospace field is headed and to anticipate the advances in technology and education that will be needed in the next 10'20 years so that we can make investments in research and education, including hiring new faculty and building new facilities.

Air Transportation

Let me start with air transportation. In my opinion, the current air transportation system is one of the most remarkable engineering accomplishments. Here, I refer to commercial aviation, not including general aviation, which encompasses private and recreational aircraft. The world's commercial air transportation system currently consists of about 35 000 aircraft, transports nearly 5 billion passengers a year and facilitates about 30–40% of the global trade by value. The modern aircraft is an extraordinary feat of engineering. After a plane leaves the factory, it will spend about 30–60% of its 30-year life in the air. Its engines are designed to operate over 40 000 hours (4.5 years) without significant overhauls, and the power delivered by a single jet engine, which can be in excess of 20 MW, is equivalent to that consumed by about 20 000 households. In addition, it offers excellent safety and reliability. In the last 50 years, the risk of a fatal accident decreased by a factor of 12, from 6 to 0.5 per million flights. Compared to other means of transport, this number is very low; the risk of an accident per kilometre travelled by rail is 12 times higher and by car 60 times higher.

Let me now turn to some of this remarkable system's prospects and challenges. We expect that the demand for air travel will double by the middle of this century. Demand has been doubling every 15-20 years for quite some time now. This demand will come mainly from the developing world, as there is no alternative to travel large distances in a reasonable amount of time. In addition, in densely populated areas, we expect that the need for increased urban air mobility will grow. With more congested cities, air transportation will likely become an option even for short distances typically serviced by car or rail. Analysts predict an estimated urban air mobility market of about USD 500B a year in less than 20 years. In fact, there are already about 70 companies worldwide trying to develop competitive vehicles with reduced take-off and landing requirements to capture that market.

This seemingly insatiable appetite for air travel presents significant challenges. The current infrastructure is, or soon will be, at capacity in many regions of the world, causing frequent conges-

tion that propagates across the network. It now seems unavoidable that, in the near future, increasing traffic levels will lead to significant future capacity shortages and many unaccommodated flights. In addition, the fleet of unmanned aerial vehicles is growing exponentially, and the pressure to integrate such vehicles into the current air traffic management system exacerbates congestion and poses major safety concerns.

If this was not enough, we have not yet mentioned the major challenge. This is, of course, the impact of air transportation on climate change. Air transportation is only responsible for about 5% of all anthropogenic greenhouse gas emissions. However, it is the fastest-growing contributor. In addition, if one considers the various human activities that rely on fossil fuels, air transportation is the activity in which replacing these fuels with greener alternatives is probably the hardest. At present, there are no alternatives to hydrocarbons in terms of energy per unit mass and energy per unit volume. These two metrics are critical when the limits of an aircraft's range and useful payload are being determined. From a technical standpoint, it is much easier to reduce the use of fossil fuels in land-based operations such as power generation and surface transportation, and I expect this will happen in the future.

Nevertheless, I expect that, in less than a 20-year horizon, a net-zero carbon operation will become a requirement if we are to see the sector grow to meet the demand. This poses a tremendous challenge that can only be addressed with new technologies. There seems to be no magic bullet. The solutions will likely come from several advances in new lightweight materials, a better understanding of the environmental impacts of aviation, advanced designs with distributed power and alternative energy sources such as SAFs (sustainable aviation fuels), hydrogen and electrification. From the available options, new aviation fuels produced from biomass are the ones that require the fewest changes to the existing infrastructure. In contrast, hydrogen and electric propulsion require radical changes to the current vehicles and infrastructure. Electrification seems well suited for the local and regional commuter markets, and I expect we will develop solutions using electric air vehicles to address urban mobility demand.

In summary, we are looking at significant structural changes in the future to a system that is conservative by its very nature. Capital investments are significant, the technological risks are high and the certification processes are expensive, long and tedious. Nevertheless, the aerospace industry has a strong track record of innovation and continuously pushing the boundaries of what is possible. Just a data point: despite the seemingly minor external differences between the outer line of a Boeing 707 of the 1950s and a modern Boeing or Airbus aircraft, emissions have been reduced by 80%. By expanding the design space with new air traffic management strategies, new technologies and alternative green energy sources, the net-zero emission scenario seems attainable within a 20-year time frame.

Space Access and Satellites

Now, I would like to look upwards and talk about space. Space is the new frontier for humans to cross to explore new worlds and offers tremendous possibilities only limited by our imagination: robotic exploration of the solar system, telescopic exploration of deep space or crewed innovative spacecraft and settlements on planets. We will surely see much of this happening in the years to come, but today I want to focus my remarks on an aspect of space that is perhaps less glamorous but still very impactful on our lives. I want to talk about satellites and the infrastructure required to launch them. Satellites are used for communications, weather forecasts, navigation (GPS), Earth observation, astronomy, surveillance and defence applications, science and education, and the list keeps growing every day.

To date, nearly 9 000 satellites have been launched into orbit. About 1 500 satellites are in geosynchronous orbits, which are orbits with a radius of about 40 000 km (about 6.5 times the

Earth's radius) and a period equal to one day. The rest are in lower altitude orbits at altitudes as low as 200 km above the Earth and rotational periods close to 90 minutes.

It is estimated that there are about 70 countries that own at least one orbiting satellite. This democratisation of space contrasts with the fact that only 11 countries have demonstrated the capability to launch a rocket that can put a satellite in orbit. And only three countries have demonstrated the capability to put a capsule in orbit and return it to Earth, giving us an idea of how hard it is to go to space. For low Earth orbit, the rocket needs to be able to deliver the satellite at a minimum altitude of 200 km and a speed of 30 000 km/h. Physical limits imply that, even with staging, the useful payload of a rocket is typically between 1% and 4% of its total mass, and this figure drops to 0.5-1.5% for geosynchronous orbits. The SpaceX Falcon 1 rocket, for instance, is 21 m tall and 1.7 m in diameter, weighs 26 t and is capable of delivering a payload of only 200 kg to low Earth orbit.

The future growth of commercial satellites is unclear, with many factors at play. What is clear is that the miniaturisation of electronic and optical components has enabled drastic reductions in the size and weight of the satellites required for a specific mission. In addition, improvements in technology have resulted in reductions in the launch cost per kilogramme to orbit. This cost was about USD 20 000/kg for several years, but this cost has been declining in recent years. In some recent launches, this cost was below USD 1 000/kg. Here, the reusability of launch vehicles, as advocated by SpaceX, will be a game-changer and will lead to even further cost reductions. To illustrate this point we can compare, for instance, the cost of a Falcon 9 rocket on a mission to the space station with a long-haul flight from New York to Hong Kong. It turns out that, while the cost of the vehicles and the cost of the fuel are comparable between the two, the aircraft is amortised over a 25-30-year timeframe involving thousands of trips. In contrast, the non-reusable rocket is discarded after one flight. With the full reusability of the launch vehicles, it is very possible we could see the launch cost drop to USD 10-100/kg in the future.

Increases in affordability to access space are likely to continue and will enable the development of new applications. There are currently constellations of hundreds or even thousands of small to medium-size low Earth orbit satellites under consideration. The number of companies with new applications entering the commercial satellite domain grows daily. These applications include radically new fields such as manufacturing and mining in space.

There is a significant concern to counter this promising future: the hazard to satellites caused by space debris. This debris has been generated by past anti-satellite tests, satellite collisions and satellites no longer in service. A small fragment the size of a golf ball at orbital speeds has enough energy to destroy assets that can cost hundreds of millions of dollars.

In 1978, NASA scientist Donald Kessler described a scenario in which the density of space debris in low Earth orbit is high enough that collisions between objects could cause a cascade in which a crash generates multiple fragments, increasing the likelihood of additional collisions, the so-called Kessler syndrome. We do not know how close we are to this critical scenario, but it is clear that space debris represents a significant challenge for which no viable solutions have yet been demonstrated.

Computational Aerospace Science and Engineering

I do not want to end without making some observations about computational science and engineering (CS&E) and its impact on aerospace. As many of you know, modelling and computer simulation of physical systems are some of my passions and have been at the centre of my research career. I have witnessed CS&E's transition from being a promising area of research to becoming pervasive in all aspects of engineering, with an impact that is almost impossible to quantify and is often taken for granted. The formidable power of CS&E today has been enabled by 50 years of advances in both computer hardware and algorithms. Recently, the miniaturisation and affordability of electronics have led to an explosion in the availability of data, which

has opened up the field of data-driven simulations. Here, data acquisition and simulations are conducted simultaneously to produce new predictive and decision-making capabilities with unprecedented levels of accuracy.

The impact of CS&E in aerospace cannot be overstated. CS&E has enabled the design, development, manufacturing and operation of the aerospace systems I described earlier and many others. But more importantly, it is an essential part of the solution moving forward. It will also be indispensable to advance in new emerging areas such as autonomy or the understanding and mitigation of the environmental impacts of aviation.

Let me mention three aerospace examples that are attracting significant research effort, in which computation pushes the boundary of what is possible.

The first is the simulation of hypersonic flows. These are very energetic flows involving vehicles flying at speeds 5‘20 times the speed of sound. Hypersonic flows are relevant for access to space, rocket reusability and perhaps one day for civil transport applications. With the powerful shock waves, the air temperatures can reach values of 5 000 K and beyond, higher than the melting temperature of any material used to protect the spacecraft’s surface. At these temperatures, air dissociates and ionises, and its behaviour is very different from that of air in sea-level conditions. Depending on the spacecraft’s materials, oxidation reactions between the ionised air and the materials can be very aggressive, and quick erosion occurs. The main challenge in designing hypersonic vehicles is that reproducing these flow conditions involving low densities and very high temperatures in wind tunnels is not feasible. The only sources of information are flight test data, which are very costly and challenging, and numerical simulations. To give you a sense of how complex this problem is and how much we still do not know, I want to mention a fairly recent flight experiment conducted by DARPA, the HTV-2 Falcon. The HTV-2 Falcon is a rocket-launched unmanned aircraft that glides through the Earth’s atmosphere at about 18 000 km/h and would make New York’s distance to Los Angeles in about 13 minutes. The first flight only lasted for 9 minutes, at which point the vehicle disintegrated in the air. The accident investigation pointed to the existence of shock waves associated with peeling skin that were 100 times stronger than the vehicle was designed to withstand. It has become apparent that more sophisticated and accurate prediction capabilities will be required that account for the multiple physical effects neglected in the past. A new generation of hypersonic flow simulations is being developed today that incorporates quantum mechanics and molecular dynamics calculations to account for the chemical effects in the air and the interactions with spacecraft materials.

Another application gaining attention in the aerospace industry is that of digital twins. A digital twin is a virtual model that accurately reflects the behaviour of a physical object, such as a jet engine. The physical object is equipped with sensors that produce data about different aspects of its performance, such as energy output or combustor temperature. The digital model then assimilates this data, which can then be used to run simulations to study behavioural issues and suggest actions to improve safety and system performance, and minimise costs. Digital twins can be built for components, complete vehicles, manufacturing processes and even systems of vehicles. I want to mention the EU’s ambitious Destination Earth initiative to develop a digital twin of Earth’s ecosystem. Such a model could become essential to accomplishing climate impact targets in the coming years, including those related to aerospace.

Finally, I would like to close by mentioning autonomous systems in air transportation. Autonomy and the integration of autonomous systems and humans working in a coordinated manner are prerequisites for the future of unmanned aerial vehicles (UAVs) and urban air mobility solutions. Despite many successes in autonomy, current systems still fall short in meeting safety and reliability demands for aerospace applications. The ultimate goal is for autonomous systems to share the airspace with conventional aircraft and for UAVs to satisfy the so-called Tu-

ring test, or imitation game. In the 1950s, Alan Turing proposed a test to determine a machine's ability to exhibit truly intelligent behaviour. One could devise a similar concept for autonomous aircraft. Such a test would be passed when a remote observer of a UAV flying in a complex environment, including landing and taking off, would be unable to differentiate if it was remotely piloted or if it was piloting itself and making its own decisions based on the inputs received. Increasing levels of autonomy demand increasing capacity for data acquisition, processing and computation using both on-board and centralised systems. New algorithms for data-driven simulations, machine learning and decision making will be required to meet the challenges ahead.

This brings me to the end of my presentation. As you can see, I did not attempt to give an exhaustive review of the field of aerospace but rather to present some topics that are interesting to me and I hope were interesting for you. Though I have spoken of the significant obstacles and concerns that lie ahead, especially those related to the planet's health, I speak of these challenges with excitement about the technology and innovation their solutions will bring.

Thank you.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH