EXPLORĂRI LINGVISTICE ÎN INGINERIA AUTOVEHICULELOR (XI)

A LINGUISTIC JOURNEY IN THE FIELD OF AUTOMOTIVE ENGINEERING (XI)

Prof. univ. dr. ing.
Ion PREDA[1]
pion@unitbv.ro

Prof. univ. dr. ing.
Adrian-Constantin CLENCI[2]
adrian.clenci@upit.ro

[1] Departamentul de Autovehicule și Transporturi, Universitatea Transilvania din Brașov, Str. Politehnicii, Nr.1, 500024 BRAȘOV, România
[2] Departamentul de Autovehicule și Transporturi, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, Centrul Universitar Pitești, Str. Târgul din Vale, Nr. 1, 110040 PITEȘTI, România

Termenii pe care-i aducem acum în discuție, *model*, *modelare* și *simulare*, împreună cu variante ale lor, sunt frecvent întâlniți în activitatea de cercetare-dezvoltare-inovare din domeniul ingineriei autovehiculului. Interesul pentru acești termeni este generat de particularitatea activității de cercetare științifică care implică, aproape totdeauna, și activități de modelare și simulare a realității investigate.

În dicționarul explicativ online al limbii române [1] se găsesc numeroase definiții ale termenului *model*. Dintre acestea reținem pentru moment două: *„Sistem teoretic sau material cu ajutorul căruia pot fi studiate indirect proprietățile și transformările altui sistem, mai complex, cu care primul sistem prezintă o analogie"* și *„Sistem ideal (logic-matematic) sau material cu ajutorul căruia pot fi studiate, prin analogie, proprietățile și transformările unui alt sistem mai complex."*

În Wikipedia [2] se găsește următoarea definiție pentru *model științific*: *„O reprezentare prin alte mijloace a unei situații reale, bazată pe conceptualizare, alcătuită în vederea obținerii unor rezultate aproximative sau a unei clasificări valabile în majoritatea cazurilor posibile. Modelele științifice pot avea diverse grade de fidelitate față de situația de la care se pornește, studiul fiind unul neexhaustiv (nu se urmărește verificarea tuturor cazurilor posibile). Modelul științific se servește de legi formale, prin care sunt descrise caracteristicile situației reale cu cea mai mare influență asupra rezultatelor. Astfel de modele sunt realizate uneori și din imposibilitatea de a reproduce în laborator problema studiată. Este aplicat în toate ramurile științei (naturale, formale, sociale), dar și în ansamblurile de clasificări, ale disciplinelor non-științifice."* Așadar, *modelul științific* încearcă să surprindă cât mai mult și cât mai bine trăsăturile realității investigate, cu alte cuvinte, particularitățile fenomenului fizic investigat. Totuși, acesta nu poate reproduce întocmai realitatea, gradul de apropiere depinzând de multe aspecte, dintre care enumerăm acum doar ipotezele simplificatoare și limitările generate de posibilitățile existente de calcul.

Dintre diferitele posibilități de tratare a subiectului nostru, autorii au mizat pe varianta prezentării cronologice. Termenii selectați reprezintă, totodată, un pretext pentru a vă invita într-o călătorie în timp și în evoluția unor concepte.

Probabil că una dintre trăsăturile care ne definesc ca specie constă în abilitatea oamenilor de a concepe, realiza și utiliza modele. Încă de când se naște, omul ia contact cu lumea din care face parte. Este martor al multor fenomene, unele naturale, altele generate de interacțiunile sale cu natura și cu semenii. Este în firea omului dorința de a înțelege fenomenele specifice acestei lumi, iar pentru a-și potoli această curiozitate, omul a creat dintotdeauna modele.

Fig. 1. Picturi rupestre ca prime forme ale modelelor (stânga – Spania; dreapta – România)

Fig. 2. Gânditorul de la Hamangia (mileniile IV-II î.Hr.), alături de Cumințenia Pământului de Brâncuși (1907)

O primă formă a modelelor a constat în realizarea de desene, o dovadă în acest sens fiind picturile rupestre (în figura 1 sunt prezentate picturi rupestre din Altamira, Spania și din Peștera Coliboaia din Bihor, care au circa 35000 de ani vechime).

Așadar, *modelele* sunt reprezentări, simplificări, abstractizări, conceptualizări și interpretări ale realității [3][4]. Aceste trăsături ale modelelor (forme stilizate și simplificate, cu evidențieri ale unor părți ale corpului, etc.) le găsim încă de la desenele sau figurinele antice, precum cele prezentate anterior, dar, desigur, sunt păstrate și în opere de artă moderne (e.g., statueta lui Brâncuși, figura 2, dreapta). Simultan cu evoluția tehnicii s-au dezvoltat foarte mult două forme particulare de modele: schița și desenul tehnic. Dacă *schița* (figura 3) surprinde aspecte esențiale în doar câteva linii, *desenul tehnic* este realizat pe baza unui „limbaj" acceptat universal și conține toate informațiile

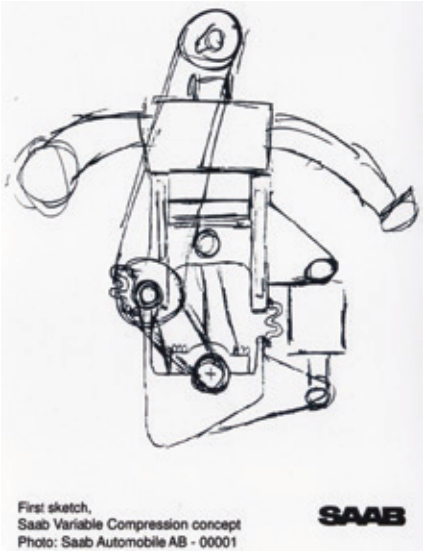

Fig. 3. Schița ca exemplu de reprezentare a unui concept (în figură, prima schiță ce a sugerat ideea sistemului de comprimare variabilă al Saab [5])

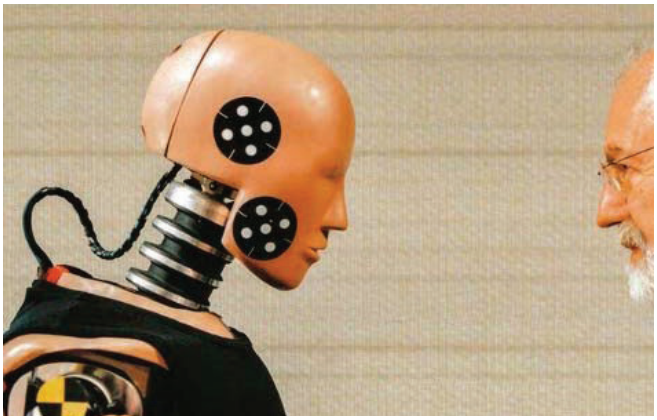

Fig. 4. Un model (manechin) și creatorul său

necesare realizării unei piese sau unui ansamblu (figura 5, stânga). De obicei, acesta este construit la o anumită scară cu valoare standardizată și se numește *desen la scară*.

Un desen tehnic special folosit în industria auto îl reprezintă *marele plan*, care este de obicei un desen tehnic la scara 1:1 și conține principalele informații privind aspectul, amplasarea componentelor și dimensiunile principale ale unui întreg autovehicul. El este folosit adesea de proiectanți în discuțiile tehnice referitoare la dezvoltarea produsului.

Modele fizice (modele materiale) spațiale, la dimensiunile reale sau la scară redusă, sunt utilizate adesea în dezvoltarea unor autovehicule noi întrucât realizarea lor este mai puțin costisitoare decât producerea vehiculului real. Acestea pot fi folosite în diferite scopuri precum evaluarea confortului și ergonomiei sau pentru estimarea aerodinamicii.

Un astfel de model spațial este și *modelul de turnare*, folosit pentru realizarea unor piese turnate. Aici se pot aminti și termenii *formă* sau *matriță* (ceea ce rezultă după utilizarea unui model spațial), *model fuzibil*, un model utilizat doar la realizarea prin turnare a unei singure piese, sau *modelor*, o persoană care realizează modele.

Continuând enumerarea termenilor care au apărut în urma utilizărilor modelelor fizice spațiale trebuie amintite și cuvintele *machetă* (un model, de obicei la scară redusă, folosit nu numai în scopuri tehnice, dar și ca ornament sau chiar jucărie) sau *model funcțional* (care, în cazul unui autovehicul, ar trebui să aibă aproape aceleași funcțiuni ca cel real, dar fără a fi realizat în condițiile și cu tehnologiile corespunzătoare fabricației de serie).

Pe de altă parte, *manechinele de testare* (eng. *test dummy*), figura 4, sunt *modele* ale ființelor umane, cu proprietăți mecanice asemănătoare cu acestea, prevăzute cu senzori pentru a măsura accelerații sau forțe, fiind folosite intens în studierea efectelor pe care accidentele de circulație le pot avea asupra oamenilor. Unele dintre ele sunt standardizate, precum cele denumite Hybrid III, și sunt folosite în testele de ciocnire (eng. *crash tests*) pentru a putea face comparații între calitățile de siguranță pasivă ale diferitelor tipuri de autovehicule.

Așa cum s-a menționat, o categorie foarte importantă de modele o constituie *modelele științifice*, care sunt utilizate pentru o mai bună înțelegere a lumii, a realității care face obiectul curiozității omului. În corelație cu acestea, trebuie introdus termenul de *simulare*, care reprezintă procesul de utilizare logică a modelelor (care, evident, trebuie mai întâi create) pentru a înțelege, a stabili cum funcționează lumea reală. Se poate spune și că prin simulări cercetătorii mizează pe predicții. Interesant este că realitatea surprinsă cu ajutorul modelelor poate fi atât cea existentă (tangibilă sau îndepărtată, precum Luna), cât și una virtuală (care nu există, dar ar putea exista).

Cu toate că modelele științifice au existat cu mult înaintea calculatoarelor, evoluția extraordinară din ultimele zeci de ani a acestora din urmă a stimulat utilizarea tot mai frecventă a modelelor și simulărilor utilizate în cercetarea științifică sau în dezvoltarea unor produse noi. Deși la început calculatoarele analogice erau utilizate cu precădere pentru realizarea simulărilor, în scurt timp, rolul acestora a fost preluat de calculatoarele numerice (eng. *digital computer*; fr. *ordinateur*), deoarece acestea s-au dovedit mult mai versatile, mai adaptabile la schimbarea rapidă a procesului simulat. Astfel, dezvoltarea concomitentă

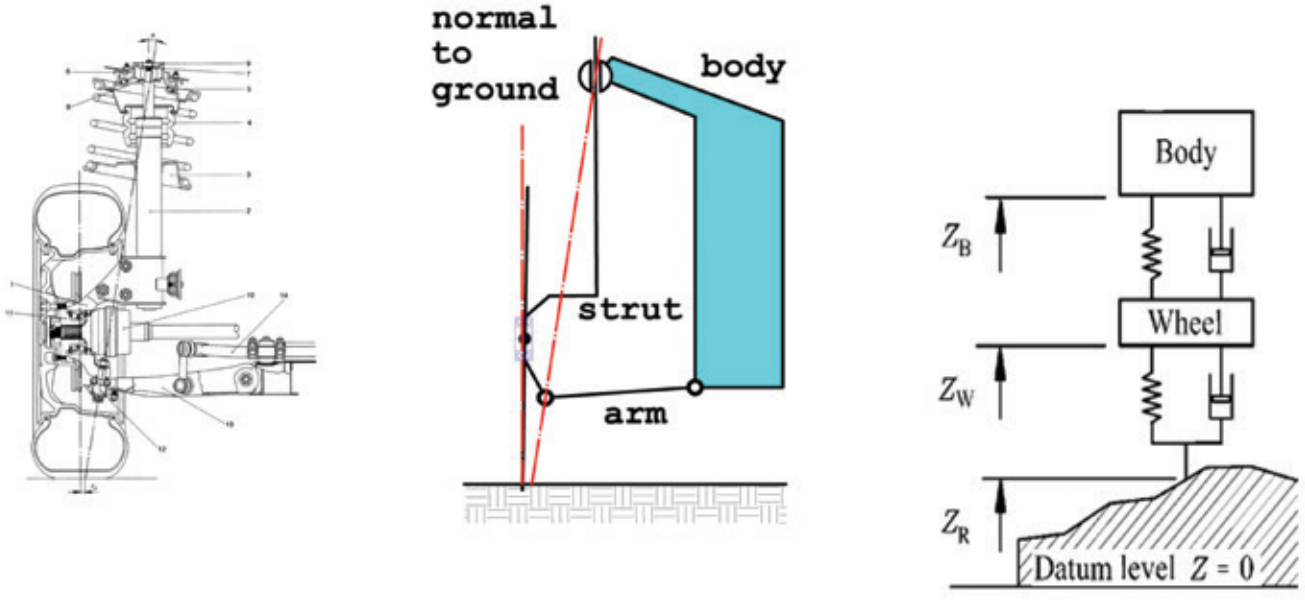

Fig. 5. Sistem mecanic real și două modele dinamice de complexități diferite – suspensia MacPherson, [6]

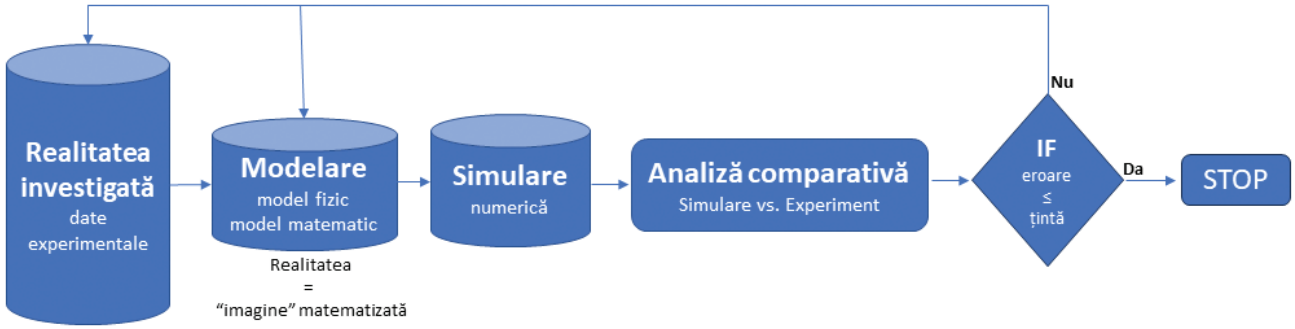

Fig. 6. Sugestie de calibrare și validare a modelului folosit

calculator-modelare-simulare a dus la o explozie a cunoașterii științifice.

Revenind la modelele științifice utilizate în domeniul ingineriei autovehiculelor, trebuie menționat că acestea acoperă majoritatea domeniilor științei (mecanică, hidraulică, electromagnetism, chimie etc.). În cazul studiului unui fenomen mecanic cum ar fi deplasarea unui autovehicul, *modelarea* (activitatea de realizare a modelului) presupune în general două etape: conceperea unui model dinamic (un caz particular de model fizic) și obținerea modelului matematic corespunzător.

Modelul dinamic reprezintă un alt ansamblu (real sau imaginar) de componente mecanice, mai simplu și, prin aceasta, mai ușor de analizat și de înțeles, care va înlocui ansamblul studiat, [7]. Ca exemplu, în figura 5 se poate vedea modelul dinamic din mijloc care ar putea înlocui suspensia reală prezentată în partea din stânga (aici trebuie să remarcăm că, de fapt, și în stânga figurii este tot un model: un desen tehnic). Este evident că s-a realizat o simplificare (numărul componentelor modelului este mult redus), dar asemănarea dintre realitate (desenul de ansamblu din stânga) și modelul dinamic realizat continuă să existe. Continuându-se cu abstractizarea[1], se poate obține modelul cel mai întâlnit pentru simularea (studiul) funcționării suspensiei unei roți, prezentat în partea dreaptă a figurii 5. Un exemplu de abstractizare care apare la realizarea modelelor dinamice constă în a atribui corpurilor doar o singură sau câteva proprietăți fizice (roata, caroseria – doar masă, arcul – doar rigiditate, amortizorul – doar amortizare, pneul - doar rigiditate și amortizare), [7]. Ar mai putea fi spus că în partea stângă a figurii percepem un ansamblu spațial (deși avem, de fapt, o reprezentare plană), în mijloc, unul plan, iar în dreapta, unul care funcționează pe o singură direcție, cea de săltare (deși are reprezentare plană).

Modelul matematic constă în sistemul de ecuații, diferențiale și, eventual, algebrice, care descrie matematic funcționarea sistemului considerat (de ex. unul dintre cele două modele dinamice din figura 5). Ecuațiile diferențiale se obțin prin aplicarea legilor dinamicii, iar cele algebrice descriu legăturile dintre mișcările corpurilor.

Diferența dintre modelul dinamic și cel matematic este evidentă, deși, adesea, se vorbește despre unul, dar se prezintă celălalt. De asemenea, se poate presupune că un model dinamic (un model fizic, în general) mai complex va conduce la un model matematic mai dificil de rezolvat. Preferarea modelelor cât mai simple (dar nu mai simple decât este necesar studierii fenomenului) nu apare doar din această cauză, ci și pentru că necesită mai puține date de intrare, iar interpretarea rezultatelor va fi mai facilă.

Din cele prezentate aici se poate deduce că *nu există un model unic sau o rețetă general valabilă pentru descrierea (modelarea) unui fenomen sau sistem*. Așadar, realizarea modelelor fizice necesită multă creativitate și ar putea fi considerată aproape o artă. Din fericire, realizarea multor modele matematice se poate face în prezent în mod automat, prin utilizarea calculatoarelor și a unor algoritmi (creații umane) extraordinar de performanți.

Întrucât modelul fizic (și dinamic, în particular) nu este identic cu ansamblul studiat, se poate presupune (și se constată aproape întotdeauna) că rezultatele simulării nu vor fi identice cu cele obținute experimental. De aceea, după simulare, rezultatele trebuie adaptate și interpretate pentru a putea afla cum funcționează sistemul real. De exemplu, în figura 5, forța arcului suspensiei obținută cu modelul din dreapta va fi diferită (mai mică) decât forța arcului real, în poziția din partea stângă a figurii, pe când forța care solicită pneul va fi identică atât în model, cât și în realitate.

În plus, în situația în care sunt disponibile investigații experimentale, pentru a atinge un nivel acceptabil de apropiere, modelul trebuie să fie *calibrat*[2] folosind date experimentale, i.e., (1) condițiile inițiale, respectiv cele de graniță sunt preluate din setul de date experimentale și (2) anumite date de intrare ce se aleg în mod subiectiv de către cercetător pot fi modificate până când se obține o apropiere acceptabilă a rezultatelor simulării față de experiment. În acest sens, figura 6 ilustrează iterațiile specifice acestui proces de calibrare și validare a modelului folosit.

Revenind la realitatea investigată experimental, trebuie să reamintim cititorilor noștri că, în ciuda eforturilor, adevărul este inaccesibil omului (în particular, valoarea mărimii fizice măsurate), întrucât aceasta este o estimare dependentă de caracteristicile sistemului de măsură (e.g., acuratețe, precizie, ce sunt judecate prin metode statistice). Acesta este și motivul pentru care în iterațiile sugerate în figura 6 este pus în discuție însuși procesul de măsurare (din simplul motiv că, uneori, instrumentele de măsură folosite pot influența procesul studiat sau revelează o altă „realitate").

După cum s-a arătat, realizarea modelelor științifice presupune utilizarea unui mare număr de ipoteze simplificatoare. Ignorarea lor sau utilizarea modelelor pentru alte condiții decât cele pentru care au fost concepute va duce la interpretarea greșită a rezultatelor și la concluzii eronate.

1. Cf. DEX: operație a gândirii prin care se desprind și se reține unele dintre caracteristicile și relațiile esențiale ale obiectului cercetării.

2. Calibrarea unui model (engl. model calibration) înseamnă găsirea unui set unic de parametri ai modelului care furnizează o bună descriere a comportamentului sistemului; acești parametri pot fi obținuți prin confruntarea predicțiilor modelului cu rezultate obținute prin măsurători efectuate asupra sistemului (NB. Această semnificație nu există în DEX, deși termenul în sine este introdus).

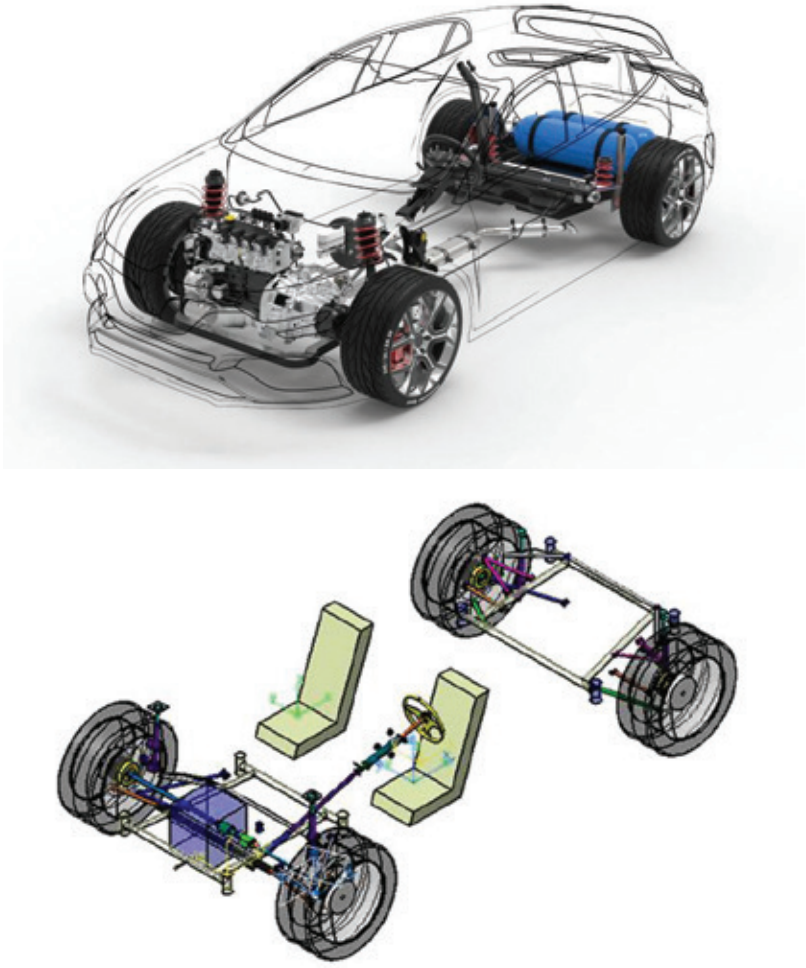

Fig. 7. Modele moderne folosite la dezvoltarea noilor autovehicule: stânga – model CAD renderizat, [12]; dreapta – model MBS, [13]

Merită subliniată aici și nevoia de a surprinde corect, în activitatea de modelare și simulare, *fluxurile de cauzalitate*[3]. Spre exemplu, pentru estimarea performanțelor unui autovehicul, sunt utilizate în mod curent simulările așa numitelor cicluri de conducere (e.g., NEDC, WLTC[4]). În această situație, pentru cazul unei analize standard (convenționale), se impune ca viteza vehiculului să aibă o variație prescrisă în timp, v=f(t). O astfel de analiză este însă *cvasistaționară*, cu alte cuvinte comportamentul tranzitoriu al vehiculului nu este în întregime luat în considerare, *direcția fluxului de cauzalitate fiind nenaturală*. În opoziție cu cele prezentate anterior, se găsește modelarea cu luarea în considerare a conducătorului (*driver controlled model*). Diferența constă în faptul că, în această situație, „conducătorul" încearcă să realizeze viteza necesară parcurgerii ciclului de conducere considerat, prin alegerea unei poziții corespunzătoare a pedalei de accelerație. Un astfel de model realizează o reală *analiză tranzitorie*. De fapt, în acest caz, condițiile de funcționare la un anumit moment în timp sunt dependente și de cele precedente, de *„istoricul"* de funcționare, pe când, în cazul *modelării/simulării cvasistaționare*, aceste condiții sunt dependente totdeauna doar de cele înregistrate în acel moment, cu alte cuvinte de *„prezentul"* simulării și nu de *„istoricul"* acesteia. Analizele tranzitorii folosesc *metode de integrare* pentru a putea fi capabile de urmărirea procesului în domeniul timp, spre deosebire de cele cvasistaționare, care necesită, la fiecare instanță temporală, t+Δt, numai calcule pur *algebrice*. Se menționează aici că modelele cvasistaționare pot fi analizate și în afara domeniului timp. În principal, este vorba despre domeniul *viteză-accelerație*.

Așadar, simularea funcționării sistemului constă în obținerea mărimilor de interes (e.g., pentru suspensia din figura 5, acestea ar putea fi accelerații, viteze, deplasări sau forțe). Avantajul extraordinar al simulării este reprezentat în primul rând de posibilitatea studierii comportamentului unui sistem fără ca acesta să existe cu adevărat (de exemplu, s-ar putea testa un autovehicul înainte ca el să se fi fabricat; cu alte cuvinte se pot face predicții despre comportamentul viitorului produs în cele mai diferite condiții).

Datorită celor trei funcțiuni de bază ale calculatoarelor, memorare, procesare și comunicare a informațiilor, utilizarea lor este strâns legată de activitatea de modelare în inginerie, în particular în cea a autovehiculelor. Acest domeniu a fost și este cunoscut în continuare sub prescurtarea CAD (*computer aided design* – proiectare asistată de calculator – *conception assistée par ordinateur*[5]). În perioada de debut a răspândirii în masă a calculatoarelor, acestea aveau performanțe scăzute și, în mod evident, prima lor utilizare în proiectare a constat în realizarea asistată a desenelor tehnice (modele plane, bidimensionale), activitate cunoscută și în prezent sub denumirea *drafting*. Calculatorul nu doar a înlocuit procesul manual, dar a îmbunătățit și îmbogățit activitatea de proiectare: desenele erau realizate mai rapid, mai corect, puteau fi imprimate ori de câte ori mai trebuia o copie, puteau fi transmise la distanță aproape instantaneu și puteau fi gestionate mult mai ușor.

Pasul următor a venit firesc, realizarea de modele CAD. În aceste modele tridimensionale (3D) nu mai apar ambiguități, pentru că ele conțin absolut toată informația geometrică spațială a unei piese, [9] [10] [11], nu doar câteva secțiuni și vederi, ca în desenele tehnice tradiționale. Căutarea de soluții pentru realizarea acestor tipuri de modele a stimulat eforturile matematicienilor, inginerilor și informaticienilor, ale căror descoperiri erau cerute și aplicate imediat în practică. Așa se explică faptul că la începutul anilor 1990, majoritatea covârșitoare a teoriilor matematice folosite în modelarea CAD fuseseră descoperite în ultimii 20 ani [9]. Deși primele modele CAD cu solide au apărut doar după 1970, evoluția a fost formidabilă și continuă și în prezent într-un ritm amețitor[6]. Astfel au apărut noi noțiuni precum *parametrizare, captarea istoriei proiectării, rendering, sheet metal design* [9] [10] [11].

3. Definim cauzalitatea ca fiind „vectorul" de legătură între cauză și efect. În termeni matematici, reprezintă direcția de transport a mărimilor variabilelor între diferitele subsisteme ale unui sistem.

4. Engl. New-European Driving Cycle / Worldwide harmonized Light-duty Test Cycle.

5. Pentru a înțelege mai bine nuanțele termenilor „design", „conception", propunem cititorului să consulte articolul [8].

6. Un argument în susținerea afirmației: am întrebat o grupă de masteranzi ce știu despre planșetă de proiectare, dispozitiv ISIS, calc, trăgător sau Rotring; niciunul nu a știut despre ce e vorba.

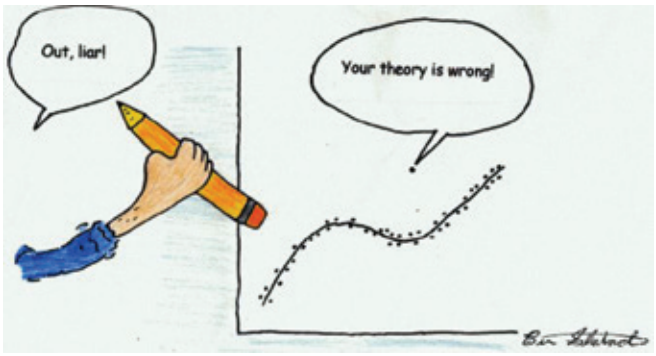

Fig. 8. Regresia matematică, joc de cuvinte, [14]

Creșterea performanțelor calculatoarelor a dus imediat la realizarea de ansambluri de componente[7]. Dacă în lumea reală două obiecte nu pot ocupa simultan același spațiu, în lumea virtuală acest lucru este posibil, ceea ce, la începuturile asamblărilor CAD, a reprezentat o problemă. Aceasta însă a fost rezolvată rapid prin apariția posibilității ca programele CAD să descopere *interferențe* (adică suprapuneri în spațiu) între două modele de piese. În prezent, există numeroase vehicule care sunt modelate CAD parțial sau în integralitate, precum cel prezentat în figura 7, stânga.

O altă utilizare foarte importantă a modelelor în inginerie, favorizată de dezvoltarea calculatoarelor, constă în folosirea intensă a două metode matematice: FEM (*finite element method* – metoda elementelor finite) și BEM (*boundary element method* – metoda elementelor de frontieră). Analizele realizate cu ajutorul celor două metode (FEA și BEA) se bazează pe un calcul care rezultă din descompunerea virtuală (proces cunoscut ca *discretizare*[8]) a piesei studiate într-un număr finit de elemente geometrice (volume, suprafețe, linii sau puncte, la FEA), respectiv de suprafețe exterioare (la BEA), care au forme simple și au fost bine studiate teoretic de multă vreme. Ambele metode pot fi utilizate în diferite domenii ale științei: rezistența materialelor (comportamentul structurilor materiale), mecanica fluidelor, termotehnică, electricitate și magnetism, acustică, etc. Numărul de astfel de volume sau suprafețe este finit, dar, pentru a se obține o aproximare satisfăcătoare a fenomenelor, acesta trebuie să fie suficient de mare. Astfel, dacă luăm în considerare analiza statică sau dinamică a unei piese sau a unui ansamblu din construcția unui autovehicul, calculatorul rezolvă sute de mii sau milioane de ecuații. Toate acestea sunt posibile ca urmare a dezvoltării metodelor numerice.

Doar acum 40 de ani, adică în perioada romantică a utilizării FEM, unii profesori „destoinici" (ai autorilor articolului) "descompuneau" o piesă în 6…7 componente cu forme mai simple, scriau ecuațiile care dădeau deformațiile, le rezolvau cu greu și apoi încercau interpretarea rezultatelor.

A face acest lucru astăzi cu un număr imens de ecuații este de neimaginat, dar este perfect fezabil cu ajutorul calculatoarelor moderne și a softurilor specializate. Pentru a scrie automat un număr așa de mare de ecuații, a le rezolva (știind că nici măcar aducerea lor în memoria internă nu este posibilă în totalitate) și pentru a interpreta rezultatele a fost nevoie ca niște oameni extrem de inteligenți să pună la punct algoritmi foarte performanți.

Pe lângă modelele CAD, FEA sau BEA, întâlnim azi în mod frecvent modele MBS. Acronimul MBS provine de la *multi-body system* și se traduce în limba română prin sistem multicorp. Și în cazul acestor modele (și analize), corpurile păstrează doar „esența" proprietăților lor fizice (inerție, rigiditate, amortizare) și legăturile dintre ele sunt definite de câteva tipuri de cuple (care impun restricții pentru mișcările relative). Modelul dinamic rezultat poate fi reprezentat simplificat (precum în figura 7, dreapta), ecuațiile de mișcare și de legătură (care descriu comportamentul sistemului mecanic) se scriu automat, iar rezultatele simulărilor pot fi prezentate tabelar, grafic sau ca animații în multiple feluri (simplificându-se astfel interpretarea lor).

Dar mai sunt multe alte tipuri de modele utilizate în studiul altor fenomene: cele pentru studiul fluidelor (CFD – *computational fluid dynamics*[9]), electricității și magnetismului, producerii și transferului de căldură etc.

În prezent, există programe de calculator care pot combina caracteristici ale mai multor tipuri de modele și analize: de exemplu, în timp ce majoritatea componentelor modelului sunt considerate corpuri rigide (aspect specific analizei MBS), la una sau la câteva piese pot fi studiate deformațiile (aspect specific FEA).

Așa cum s-a arătat, *modelele numerice* întâlnite astăzi în ingineria asistată pot fi de diferite feluri și complexități. Se vorbește în prezent de *modele 3D (în spațiu), 2D (în plan), 1D (lineare,* precum un element finit de tip grindă), dar și de modele *0D* (care nu au o reprezentare în spațiu, dar pot descrie un proces, precum transformarea energiei chimice a unui combustibil în energie mecanică într-un motor termic).

În activitatea de modelare a funcționării motorului termic, *modelele zerodimensionale* sunt *modelele termodinamice* ce permit o abordare simplificată a diferitelor fenomene complexe ce intervin în cilindru în timpul ciclului de funcționare. Ecuațiile folosite în cazul *modelării 0D* sunt cele specifice primului principiu al termodinamicii pentru sisteme deschise (ecuațiile de conservare a energiei, de conservare a masei, ecuația de stare a gazului perfect). Cel mai frecvent, aceste modele iau în considerare o singură zonă (cilindrul) și doar evoluția în timp a mărimilor termodinamice (e.g., presiune, temperatură). Evident, în această situație se asumă uniformitatea/omogenitatea acestor mărimi în această unică zonă. Mărind însă numărul de zone (e.g., două zone, cea a gazelor proaspete și cea a gazelor arse) și considerând și frontul de flacără ca o discontinuitate între cele două zone plus o geometrie a propagării sale (e.g., sferică), pertinența unei astfel de simulări crește, însă, în niciun caz, rezultatele nu pot ajunge la calitatea celor obținute cu *modele dimensionale*. Obiectivul utilizării unui model 0D este acela de a avea un instrument predictiv relativ simplu care să permită și abordarea de puncte de funcționare neexplorate experimental. Astfel, se evită experimente laborioase și, finalmente, se scurtează timpul de dezvoltare.

Un alt tip de model frecvent utilizat este *modelul empiric*, care nu se bazează pe teorii științifice, ci doar pe observații și experiențe. Acestea sunt folosite frecvent în inginerie, dar și în alte domenii (e.g., pentru prezicerea evoluțiilor economice globale sau meteorologice).

7. Evoluția schiță-desen tehnic-model CAD ne transformă și pe noi, oamenii. Este fantastic cum un inginer poate "citi" un desen tehnic: cum o mulțime de linii pe o foaie de hârtie, în fapt, poate fi considerată ca o piesă sau un ansamblu. Și nu doar de un singur inginer, ci de majoritatea inginerilor din lume. Și mai grozav este cum un (alt) inginer a putut "vedea" cu ochii minții sale acea piesă sau acel ansamblu și a putut apoi să o transpună în desenul tehnic corespunzător. Acum, un model CAD poate fi înțeles de oricine, pentru că este tridimensional și îl putem roti în orice poziție! Chiar așa? Nu cumva ecranul calculatorului (sau al telefonului) este tot un fel de foaie de hârtie (adică plană)? Nu cumva am evoluat noi atât de mult că nici nu mai facem diferența între plan și spațial, între virtual și real?

8. Discretizare este termenul matematic (neintrodus, încă, în DEX) folosit pentru aproximarea unui mediu continuu cu unul discontinuu, compus dintr-un număr finit de componente (a se vedea modelarea continuumului material compus dintr-o infinitate de puncte prin intermediul unei reprezentări discrete, caracterizată de un număr finit de puncte; prin aceasta se permite trecerea de la un sistem infinit de ecuații la unul cu un număr finit de ecuații, ce poate fi rezolvat cu ajutorul calculatoarelor).

9. Dinamica computațională a fluidelor sau Mecanica fluidelor abordată cu metode numerice.

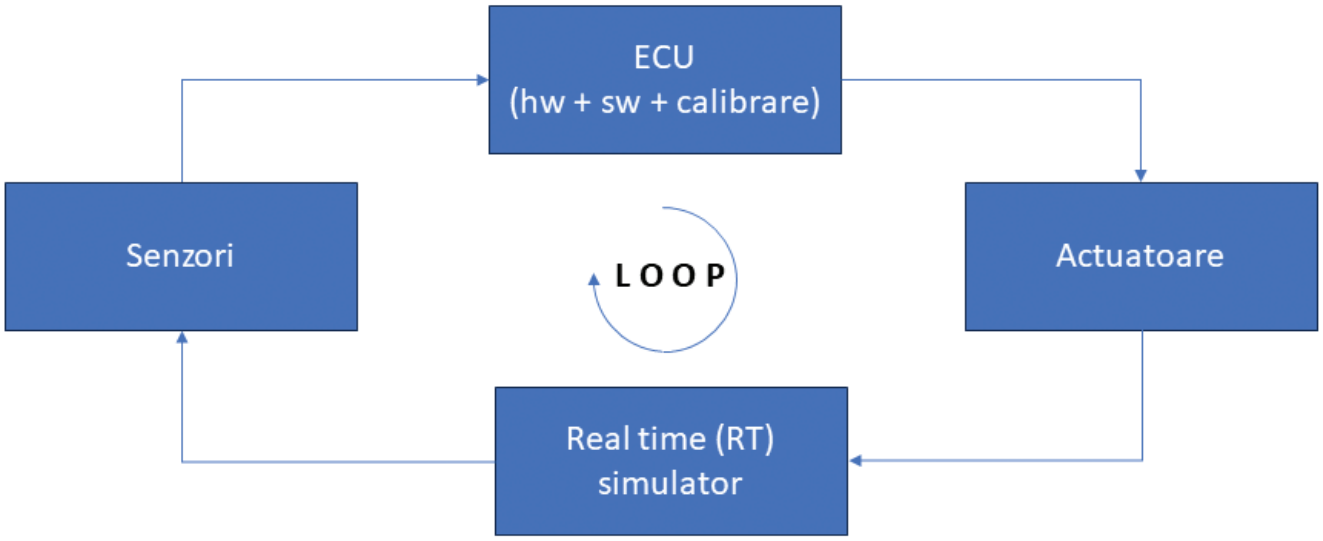

Fig. 9. Schema funcțională a unui sistem automat de control folosit într-un proces HIL

În acest moment considerăm util să reamintim cititorului *regresia matematică* (bazată pe diferite metode matematice, precum *metoda celor mai mici pătrate*), care permite obținerea unui model matematic empiric doar pe baza unor *date experimentale*, altfel spus, permite „ajustarea" datelor experimentale la o curbă teoretică, descrisă matematic, cu avantajele ce derivă de aici: *interpolare, extrapolare*. Dacă toate punctele se grupează în apropierea curbei, înseamnă că aceasta descrie destul de bine fenomenul. În cazul în care există puncte distanțate (*outliers* în engleză), pot fi două posibilități: fie curba nu corespunde, fie determinarea experimentală a punctelor a fost însoțită de erori grosolane (dar cine decide în ce caz ne aflăm?). Fără a mai comenta pe acest subiect al regresiei matematice, știind că o imagine înseamnă mai mult decât o mie de cuvinte, provocăm suplimentar cititorul cu imaginea din figura 8.

Aceste noi tipuri de *modele numerice* (sau *modele digitale*), prezentate anterior, sunt denumite așa deoarece toate tipurile de informații (text, numere, imagini, animații, etc.) sunt în totalitate reprezentate numeric (și apoi păstrate, prelucrate și transmise), adică la bază ele sunt doar niște înșiruiri de cifre (eng. *digits*), [9]. Acest mediu digital, care a apărut alături de lumea reală și care o însoțește și o îmbogățește, se numește *mediu virtual* sau *realitate virtuală* (VR – *virtual reality*). Se ajunge astfel la o altfel de lume decât cea reală care nu există, dar ar putea deveni. Practic, orice poate imagina inteligența umană poate „să ia viață", poate „să existe", poate fi prezentat altora, iar oamenii pot să interacționeze cu această nouă „realitate". Între inginerie și filmele de ficțiune diferențele se micșorează foarte mult. De exemplu, putem vedea motorul unui autoturism înainte ca el să fie construit, îl putem inspecta din orice unghi sau îl putem demonta și remonta virtual. Sau, vorbind de interacțiune, cu ajutorul unor ochelari speciali și al unor mănuși cu *sistem haptic*, putem lua un obiect 3D, existent doar în calculator, și putem să-l pipăim sau să-l deformăm (modelăm) după voie. Practic, realitatea virtuală poate avea utilizări aproape nelimitate.

Ca o glumă (și nu chiar), în programele de studii actuale găsim sintagma *inginerie virtuală*. Ce înseamnă asta, că ingineria ar putea fi, dar nu este? Sperăm că nu, ci că e doar o traducere forțată, *mot à mot*, a denumirii *virtual engineering*, care ar trebui tradusă *inginerie în mediu virtual*.

Un alt termen frecvent întâlnit astăzi este *realitatea augmentată*, adică acea îmbogățire a mediului nostru palpabil cu informații provenite dintr-o *realitate virtuală*. Două exemple comune astăzi: (1) când conducem o mașină modernă și folosim sistemul de navigație (bazat pe GPS), în câmpul vizual, plutind aparent deasupra străzii, o săgeată ne arată succesiv locurile în care trebuie să virăm; (2) la deplasarea înapoi, pe ecranul din bord vedem suprapuse atât imaginea instantanee furnizată de camera video din spate, cât și traiectoriile pe care se vor deplasa roțile sau „colțurile" mașinii în cazul în care păstrăm aceeași poziție a volanului.

Având atâtea posibilități de generare a modelelor digitale și de folosire a lor pentru a simula diferite procese, nu ar trebui să uităm să menționăm dezvoltarea pe care au luat-o în prezent *simulatoarele* (auto sau de alt tip), [15]. Ele pot fi utilizate pentru instruirea unui pilot (cu costuri mult mai mici și fără a-i pune viața în pericol) pe un vehicul (existent sau virtual) sau pentru testarea unui vehicul (din nou, existent sau virtual) în condiții de funcționare dintre cele mai diferite sau dificile.

Activitățile de simulare și testare reprezintă o parte importantă a dezvoltării unui nou autovehicul. În acest context, poate că nu este lipsit de interes să se menționeze aici și câțiva termeni, foarte des întâlniți în aceste activități: *Model-in-the-Loop* (MIL), *Software-in-the-Loop* (SIL), *Hardware-in-the-Loop* (HIL) – adică model, program, respectiv echipament în buclă de testare.

Se știe că autovehiculele actuale au în componență numeroase sisteme automate de control. Acestea au la bază structura « senzori – unitate electronică de control – actuatoare[10] », așa cum se poate vedea și în figura 9. O unitate electronică de control (ECU – *electronic control unit*) constă în hardware (un microcontroler), software (programul după care funcționează) și datele memorate, obținute în urma procesului de calibrare. Software-ul regăsit în ECU este un program executabil care a rezultat ca urmare a utilizării modelului matematic folosit pentru gestionarea proceselor fizice specifice care trebuie controlate.

În cadrul MIL, ECU încă nu există (nici microcontrolerul și nici

10. Termenul „actuator" este un neologism preluat din engleză, ce înseamnă „element de execuție"; el este utilizat frecvent în vorbirea curentă a specialiștilor în automatizări, probabil și pentru că este mai scurt; termenul se regăsește în DEX, dar definiția nu este tocmai corectă, pentru că nu actuatorul controlează, ci doar execută ce i se comandă (de către controler).

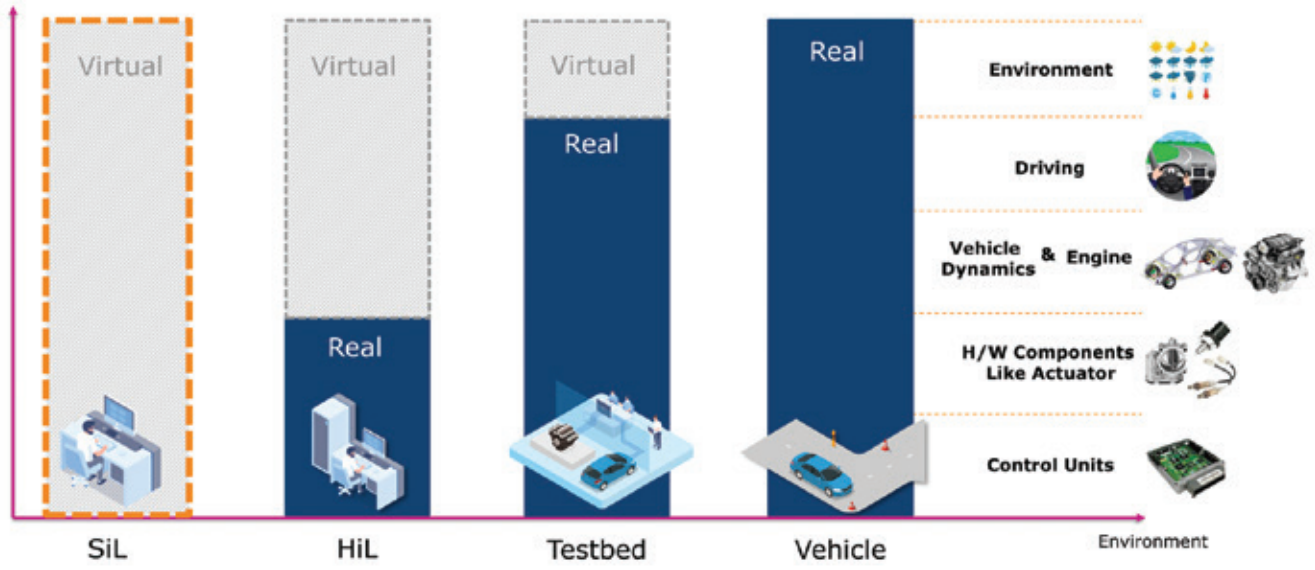

Fig. 10. Proporția real-virtual în cazul diferitelor tehnici de testare, [18]

software-ul); așadar, este vorba numai despre testarea corectitudinii modelului matematic care stă la baza algoritmului de control. Întregul proces de testare se face cu ajutorul unui calculator standard.

SIL (software/program în buclă de testare), indică tehnicile de verificare a unităților electronice de control, fără ca microcontrolerele (sau alte circuite integrate) să existe. Însă software-ul ce va fi introdus în ECU există și este introdus în buclă de testare, dar folosind echipament (hardware) standard (de exemplu, un PC), care simulează atât funcționarea vehiculului, cât și funcționarea circuitelor electronice dedicate de care nu se dispune încă. Prin rulări repetate, efectuate pentru a identifica posibile erori în condiții de funcționare dintre cele mai diverse (inclusiv situații în care ar apărea defecțiuni ale senzorilor sau actuatoarelor) se pot pune la punct programele cu care vor funcționa aceste componente electronice.

HIL (hardware/echipament în buclă de testare) se referă la testarea în laborator a unei componente reale (o piesă, un ansamblu), în cazul în care ECU există (atât microcontrolerul cât și software-ul) și este utilizat. Încercarea se efectuează pe un stand „inteligent" comandat de un calculator (numit și banc HIL), care poate simula condițiile de funcționare pentru acea componentă [16] [17]. Figura 9 ilustrează schematic mediul de testare HIL. La capitolul *hardware* (i.e., *echipament*) poate intra chiar și vehiculul în integralitatea sa. De aici, noțiunea de VIL (*Vehicle-in-the-Loop*), adică, vehicul în buclă de testare, care constă din încercarea unui vehicul real pe un stand de probă dinamometric, ce poate reproduce cu precizie condiții de funcționare stabilite, fie prin simularea funcționării vehiculului, fie prin utilizarea unor date obținute prin măsurări și înregistrări pe durata unor teste pe traseu. Actualmente, pentru reducerea și mai mult a costurilor, în mediile de testare HIL se poate simula chiar și funcționarea actuatoarelor, de ex. prin folosirea unor rezistențe electrice și modele fizice în programe dedicate. În felul acesta se câștigă timp și bani în dezvoltarea unui nou vehicul.

Ca o curiozitate, în anii 1990, pentru testarea recent apărutului sistem ABS (eng. *Anti-Lock Braking System*) în vederea implementării pe un autoturism american, s-au efectuat zeci de mii de probe pe traseu. Pot fi ușor imaginate costurile, eforturile umane și timpul necesar pentru realizarea lor. Din fericire, cu ajutorul simulatoarelor sau softurilor specializate existente azi, astfel de testări pot fi realizate mult mai ușor și mai rapid.

Un alt termen frecvent utilizat în mediul ingineriei este *cosimulare*, care se referă la procesul simulării mai multor componente (subsisteme) ale unui sistem ingineresc mai amplu prin utilizarea în colaborare a unor programe de calculator diferite. Scopul este de a analiza și evalua performanța globală a sistemului, așa cum rezultă din interacțiunile subsistemelor lor. Pentru exemplificare, un software simulează acțiunile șoferului, iar un altul răspunsul autovehiculului. Cele două programe își transferă reciproc date (primul primește comenzi și stabilește comportamentul autovehiculului, iar cel de-al doilea află mărimile de stare ale mașinii și schimbă comportamentul șoferului).

În foarte multe situații, simularea unui fenomen care prezintă interes se poate face în *timp real*, ceea ce înseamnă că atât viteza de execuție a calculatorului, cât și performanțele programului folosit sunt suficient de ridicate pentru ca simularea să se poată face în același timp cu fenomenul real [16] [17].

Conform celor discutate mai sus, în figura 10 este prezentată o imagine sugestivă care ilustrează evoluția introducerii simulărilor în activitatea de dezvoltare a unui vehicul, trecerea tot mai pronunțată de la sisteme reale de testare la unele virtuale. Testarea într-un laborator *(testbed)* care dispune de numeroase facilități și, în mod special, cea în mediu virtual au avantaje evidente în ce privește costul, complexitatea, repetabilitatea și timpul necesar studiului.

În prezent, lumea noastră este însoțită tot mai mult de *o componentă (o umbră) digitală*, care se insinuează în aproape toate domeniile, inclusiv în inginerie sau educație. Această nouă transformare (mai ales a industriei și a modului de organizare a economiei), tot mai rapidă, complexă și completă, este denumită *digitalizare,* [19].

În acest context, un nou concept apare tot mai frecvent în inginerie (și nu numai): *digital twin* (*geamăn digital*). Deși conceptul are origini ceva mai vechi, prima definiție practică a fost formulată de NASA în 2010, într-o tentativă de a îmbunătăți modul de simulare a unei nave spațiale [2].

Chiar dacă dezbaterile teoretice cu privire la această noțiune sunt intense și o definiție clară nu s-a cristalizat până în momentul de față, s-ar putea începe cu cea din Wikipedia [2]: *„digital twin este o reprezentare digitală a unui plănuit sau existent produs fizic, sistem sau proces din lumea reală (fratele real – physical twin) care servește ca echivalent digital al lui de nedistins efectiv*

pentru scopuri practice, cum ar fi simularea, integrarea, testarea, urmărirea și întreținerea".

Întrucât recurge la tehnologii de simulare, permițând adăugarea unor noi straturi de inteligență produselor sau proceselor reale, un *geamăn digital* oglindește sistemul fizic (real) într-o lume digitală, [20]. Digital twin a devenit, de prin 2017, o tendință tehnologică de top și reprezintă un element fundamental al digitalizării.

Studierea mai multor referințe bibliografice din domeniu ne-a permis să identificăm principalele aspecte legate de geamănul digital:

- Digital twin reprezintă evoluția logică a desenelor și specificațiilor unui produs, care au evoluat de la desenele tehnice făcute cu mâna, la proiectarea asistată de calculator (CAD) până la ingineria sistemelor bazată pe modele, cu legătură strictă la echivalentul fizic (real).
- Conceptul digital twin se referă la capacitatea de a reprezenta și optimiza virtual un produs sau proces din viața reală, [21].
- Digital twin este compus din modele numerice și date care descriu în timp real comportamentul echivalentului său fizic, [22].
- Se pare că majoritatea utilizărilor actuale nu îndeplinesc momentan principalele aspecte din definiții, astfel că mai degrabă s-ar putea vorbi despre *digital shadow (umbră digitală)*, [22].
- Pot fi realizați gemeni digitali care să însoțească o singură piesă (de ex. un pneu) sau un ansamblu (de la dimensiunile unui automobil la cele ale unei fabrici), împreună cu procesele asociate, [23].
- Încă de la primele utilizări, s-a dorit ca geamănul digital să reprezinte premisa de bază pentru gestionarea întregii vieți a produsului (PLM – *Product Lifecycle Management*) și să existe pe întregul parcurs al vieții (concepție, realizare, utilizare, întreținere și retragere) a entității fizice pe care o reprezintă, [2]. Un geamăn digital poate să existe (și adesea chiar există) înainte să îi fie alăturată și o entitate fizică.
- Un geamăn digital al unei entități existente poate fi utilizat în timp real și sincronizat în mod regulat cu sistemul fizic corespunzător [20].
- Deși simulările și gemenii digitali utilizează deopotrivă modele digitale pentru a reproduce diferitele procese ale unui sistem, un geamăn digital este mai mult decât o simulare, de fapt un întreg mediu virtual, care îl face mult mai bogat, mai util pentru studiu. Dacă o simulare este destinată în mod normal pentru studiul unui proces particular, un geamăn digital poate rula el însuși oricâte simulări utile cu scopul studiului unor procese multiple, [24].
- Obiectul care este studiat este prevăzut cu diferiți senzori care urmăresc aspecte vitale ale funcționării. Acești senzori furnizează date despre diferite aspecte ale comportamentului și performanțelor funcționale. Datele obținute sunt apoi transferate unui sistem de prelucrare și aplicate copiei digitale. Odată informat cu aceste date, modelul virtual poate fi utilizat pentru a rula simulări, a studia aspecte legate de performanțe și a genera posibile îmbunătățiri, [24].
- Dacă un produs este prevăzut cu senzori și cu posibilitatea de comunicare (permise tot mai mult datorită miniaturizării și scăderii prețurilor), geamănul digital al acestuia este capabil să perceapă atât starea proprie a fratelui său real, cât și pe cea a mediului în care funcționează. Aceasta înseamnă că un astfel de produs inteligent (de ex. un automobil) are abilitatea de a își monitoriza, prevedea și controla propriul comportament.

Model-based design – MBD, adică *proiectarea bazată pe modele*, este o altă noțiune frecvent întâlnită în ingineria modernă. Acest nou mod de abordare plasează modelele virtuale în centrul procesului de dezvoltare pentru a îmbunătăți furnizarea de produse inginerești. MBD combină conceptele de modelare și automatizare pentru a accelera exploatarea noilor proiecte și execută testări cu ajutorul modelării și simulării cu rapiditate și în mod repetabil, [23]. Câteva avantaje ale MBD constau în: eliminarea pașilor manuali și reducerea erorilor umane prin automatizarea programării, verificării și modului de întocmire a rapoartelor; crearea unei urme digitale care asigură *trasabilitatea* (posibilitatea de a permite regăsirea istoricului, a utilizării sau a localizării), de la cerințe și arhitectură a sistemului și până la proiectarea componentelor și încercări; efectuarea întreținerii preventive, detectării defecțiunilor și optimizării funcționării sistemului prin utilizarea de modele, precum gemenii digitali.

Metavers (cuvântul încă nu apare în DEX, eng. *metaverse*) este un termen colectiv pentru *lumi digitale și interactive*, [25] și poate fi definit ca o colecție de spații și medii virtuale care, prin intermediul internetului, sunt interconectate și accesibile unor utilizatori de oriunde. El dă o *experiență interactivă și imersivă*[11] totală care îi permite utilizatorului să creeze, exploreze și interacționeze cu obiecte digitale și alți utilizatori în timp real, [26]. Metaversul poate fi văzut ca un univers paralel, extins, care coexistă cu cel fizic (real), dar care are regulile și structurile sale proprii. El este stadiul cel mai avansat al tehnologiei informației, incluzând realitatea virtuală, realitatea augmentată, blockchain[12] sau inteligența artificială.

Termenul a fost inventat în 1992 de către autorul de science-fiction Neal Stephenson, care își imagina o realitate virtuală cu ajutorul căreia interacționau milioane de utilizatori. Această denumire a fost apoi popularizată în literatura și cinematografia de ficțiune și în jocurile video. Momentan, metaversul nu a atins nivelul indicat în definiția anterioară, dar primele „lumi" și medii de tip metavers (*proto-metaversuri*) există deja în jocuri online și alte domenii.

Una dintre trăsăturile cheie ale metaversului este abilitatea de a crea și particulariza *avataruri*, care sunt reprezentări digitale (modele) ale utilizatorului ce pot fi personalizate pentru a arăta exact ca el sau oricum altfel dorește acesta. Avatarurile dau utilizatorilor posibilitatea să interacționeze cu ceilalți în mediu virtual și ele sunt o parte importantă a experienței metavers [15].

În prezent, metaversul depășește însă zona de divertisment, pătrunzând tot mai mult în lumea tehnologiei și a educației. Se intenționează ca metaversul să devină unealta viitoarei generații a Internetului (Web 3.0), care va funcționa în timp real, sincron și tridimensional, dar probabil doar peste circa 20 de ani, deoarece întreaga infrastructură va trebui regândită.

Preluată de cercetători și dezvoltatori, *ideea metaversului* a fost extinsă, clarificată și perfecționată, astfel încât astăzi se referă la o rețea de lumi și spații virtuale interconectate care sunt populate de utilizatori din întreaga lume reală. Acest nou concept are potențialul de a transforma felul în care oamenii interacționează între ei sau cu diferite componente digitale.

Căutând avantaje în lumile digitale 3D atotcuprinzătoare și integratoare, industria auto este printre cele mai interesate de dezvoltarea metaversului și primele utilizatoare și dezvoltatoare ale sale. De fapt, primele proiecte pentru activități de colaborare în medii digitale, noi abordări în producție și proiectare (precum conlucrarea inginerilor și designerilor într-un studio de proiectare virtual) sau idei inovative pentru vânzări și marketing (precum zile ale presei, prezentări de produse sau teste de conducere virtuale) au apărut aici, [25].

11. Care dă senzația că utilizatorul face parte din acel mediu, putând interacționa cu acesta.
12. Tehnologie de stocare și transmitere a informațiilor, care se bazează pe principiul distribuirii și securității, fiind o bază de date digitală, descentralizată și transparentă, care înregistrează tranzacții și evenimente în mod permanent, securizând stocarea și tranzacțiile între criptomonede.

În final, ar mai trebui adăugat că se estimează că metaversul va avea un impact semnificativ în educația viitorului. Mediile virtuale pot oferi elevilor și studenților o experiență de învățare interactivă și mult mai angajantă, dându-le posibilitatea de a explora concepte și scenarii complexe într-un mediu controlat și sigur, [26]. În plus, clase și biblioteci virtuale pot da acces la resurse educaționale și experiențe care nu pot fi disponibile în lumea reală. Utilizarea tehnologiilor de realitate virtuală sau augmentată vor putea oferi de asemenea noi oportunități pentru învățarea prin experimente, vor stimula imaginația și dezvoltarea aptitudinilor.

Următorul paragraf a fost preluat cuvânt cu cuvânt din introducerea la cartea [9], publicată în 1998: *„Deși perfecționate, uneltele nu gândesc în locul nostru, ci doar pot să amplifice puterea noastră de înțelegere și de creație. Lumea de astăzi este o lume a informației și a comunicării: oamenii vor să afle multe și vor să-și împărtășească ideile și cunoștințele. Calculatoarele ne pot ajuta să comunicăm, dar și să păstrăm în siguranță, să regăsim și apoi să valorificăm informațiile de care dispunem. Avem atât de multe lucruri de învățat, de făcut, de organizat. Să ne grăbim, nu mai putem pierde nici o clipă!"*

Deși au trecut mulți ani de atunci, această concluzie rămâne valabilă și azi, chiar dacă „uneltele" au început „să gândească". Într-adevăr, se pare că suntem în zorii erei inteligenței artificiale (*AI – artificial intelligence*), a cărei primă caracteristică ar fi absența blocurilor decizionale (*if… then*) din program. *Inteligența artificială* este asociată cu tehnici specifice de *machine learning* (învățare automată), *deep learning* (învățare profundă), *supervised și unsupervised learning* (învățare supravegheată sau nu pentru a învăța „mașina" să funcționeze cu date etichetate sau nu). „Mașina", după ce a efectuat un *training* (a fost *antrenată*) și a făcut predicții bune, continuă să învețe. Exact ca oamenii. Iar calitatea predicțiilor depinde de calitatea trainingului. Tot exact ca la oameni, nu-i așa? O altă particularitate a inteligenței artificiale este, însă, că omul nu are acces la modul în care aceasta a reușit să facă predicția[13], ceea ce ar putea însemna că odată cu inteligența artificială, știința se va baza din ce în ce mai mult pe modele empirice, fără fundament teoretic, [27].

Fiindcă povestea noastră se apropie de sfârșit, ne vin în minte câteva întrebări. Oare la ce reflecta Gânditorul din figura 2? Oare cum arăta „metaversul" său? Știa el de unde vine și unde se duce? Își imagina el cum va fi lumea noastră de azi? Urmărind firul epopeii modelelor se poate observa o evoluție exponențială. Dacă pentru a se ajunge de la primele desene scrijelite pe pereții peșterilor au trebuit 40000 de ani până la realizarea de desene tehnice cu ajutorul calculatorului, de la acest punct și până la metavers au trecut doar câteva zeci de ani. Saltul este amețitor! Unde se va ajunge peste 10 sau 20 de ani? Nu știm. Limita este doar imaginația noastră (și poate nici ea). Însă, dincolo de avantajele evidente ale dezvoltării tehnologiei informației, considerăm că e bine să reflectăm intens și la întrebarea următoare: în ce măsură toată această nouă tehnologie ne controlează viețile și care sunt efectele acestei coabitări *om-mașină inteligentă* asupra umanității de azi și de mâine?

13. Referitor la predicții obținute prin simulări computerizate, o lectură plăcută și provocatoare este romanul Origini scris de Dan Brown; apar aici discuții despre evoluția umanității, despre faptul că, științific vorbind, „omul nu poate vedea suficient de departe în trecut pentru a ști cum a început procesul (Big Bang-ul) și că tot ce poate face este să observe că procesul (evoluția) are loc". În esență, romanul sugerează că la întrebările firești ale omului (De unde venim?, Cine/ce suntem?, Unde ne ducem? Sau: „care ne sunt originile?", „care este destinul nostru?"), răspunsurile pot fi aflate grație simulărilor realizate cu super-calculatoare (**„simulările computerizate sunt niște mașini ale timpului virtuale"; „modelarea pe computer este un fel de mașină a timpului și ne permite, într-adevăr, să privim în viitor..."**). În roman se face referire și la experimentul Miller-Urey [2], al cărui obiectiv a fost **simularea creației**, altfel spus, găsirea originilor chimice ale vieții.

REFERENCES:

[1] DEXonline, *Dicționare explicative ale limbii române, https://dexonline.ro*

[2] „Wikipedia." https://ro.wikipedia.org/ (accessed 2023)

[3]Calude, C. Paun, G. *Modelul matematic - instrument și punct de vedere*. Editura științifică și enciclopedică, București, 1982.

[4]Preda, I. *Model Based Algorithm for the Study of the Vehicle Suspension*. Jurnal of Applied Mechanics and Materials Vol. 823 „Current Solutions in Mechanical Engineering" p. 247-252, 2016. ISBN-13: 978-3-03835-566-3

[5]https://www.pinterest.com/pin/422916221241171886/

[6]Preda, I. *Independent Suspension - The Equivalence of Model and Vehicle Parameters*, in Proceedings of the European Automotive Congress EAEC-ESFA 2015, Springer International Publishing, 2016, ch. 60, pp. 651-664.

[7]Untaru, M. Poțincu, G. Stoicescu, A. Pereș, G. Tabacu, I. *Dinamica autovehiculelor pe roți*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.

[8]Clenci, A., Zaharia, C., Cîțu, L. Matrozi, A. Boncescu, S. *Explorări lingvistice în Ingineria Autovehiculelor (VIII)*, Ingineria Automobilului no. 59/iunie 2021, pp. 5-6, 2023, http://siar.ro/wp-content/uploads/2021/06/rIA59.pdf

[9] Preda, I. *Inginerie asistată pentru autovehicule*. Editura Universității Transilvania din Brașov, 1998.

[10]Talabă, D. *Bazele CAD. Proiectare asistată de calculator*. Editura Universității Transilvania, Brașov, 2000.

[11]Clenci, A. Vieru, I. Tabacu, Ș. *Modelarea parametrică a sistemelor mecanice utilizând aplicația Pro Engineer*. Editura Universității din Pitești, 2007.

[12]*„Demonstrator rutier alimentat cu metan"* – proiect diplomă susținut la Universitatea din Pitești, specializarea Autovehicule Rutiere, 2020, candidați: Matar, A., Grecu, M., Moiceanu, O.; îndrumător: prof. habil. dr. ing. Clenci, A.

[13]Dumitru, A. Preda, I. Mogan, G.L. *Aspects Concerning Modeling and Simulation of a Car Suspension with Multi-Body Dynamics and Finite Element Analysis Software Packages*, CONAT 2016 International Automotive Congress, Brașov

[14] Rousseeuw, P. *Robust Statistics*. 2019 https://cseweb.ucsd.edu/~slovett/workshops/robust-statistics-2019/slides/donoho-univariate.pdf

[15] Voinea, G.D. Gîrbacia, F. Postelnicu, C.C. Duguleană, M. Antonya, C. Șoica, A. Stănescu, R.C. *Study of Social Presence While Interacting in Metaverse with an Augmented Avatar during Autonomous Driving*. Appl. Sci. 2022, 12, 11804.

[16]Preda, I. Piso, P. and Coandă, S. *Simularea dinamicii longitudinale a vehiculului în timp real*. CAR 1994 Automotive Conference, Pitești, România, 1994.

[17]Zaharia, C. Tabacu, I. Clenci, A. Podevin, P. Descombes, G. *Etude par simulation numerique de l'influence des moments de changement des vitesses sur les performances dynamiques et d'economie*. Ingineria Automobilului, nr. 2/februarie 2007, http://siar.ro/wp-content/uploads/2019/01/rIA_2_2007_1-ro.pdf

[18]Kanya, S. *AVL SiL Solution*. Presentation at National University of Science and Technology POLITEHNICA Bucharest, 26th of July 2023.

[19] Clenci, A. Cîțu, L. Matrozi, A. and Boncescu, S. *Explorări lingvistice în Ingineria Autovehiculelor (X)*, Ingineria Automobilului, no. 65/decembrie 2022, pp. 11-12, http://siar.ro/wp-content/uploads/2022/12/rIA65.pdf

[20] Spiryagin, M. Edelmann, J. Klinger, F. Cole, C. *Vehicle system dynamics in digital twin studies in rail and road domains*, Vehicle System Dynamics, vol. 61, no. 7, pp. 1735-1784, 2023, doi: 10.1080/00423114.2023.2188228.

[21] Nae, L. *Ce înseamnă Digital Twin*? 2016 https://www.digitaltwin.ro/comunitate/ce-inseamna-digital-twin/

[22]Van der Auweraer, H. *Nuances in the digital twin concept. Opinions*? Question on ResearchGate, 2021

[23] Molera, L. M. *Digital Twins and the Evolution of Model-based Design*. 2021. https://blogs.mathworks.com/deep-learning/2021/10/18/digital-twins-and-the-evolution-of-model-based-design/

[24] IBM *How does a digital twin work*? https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin, accesat 2023

[25]Köllner,C.*Here'sHowtheMetaverseisAffectingtheAutomotiveIndustry*.2023.https://www.springerprofessional.de /en/companies---institutions/mobility-concepts/here-s-how-the-metaverse-is-affecting-the-automotive-industry/24607722

[26] Budania, A. *Metaverse and its impact on industry*. 2023.

[27] Stan, M. University of Chicago, USA - Conferința *„Rolul calculatoarelor în Știință, Tehnologie și Societate"*, Universitatea din Pitești, 6 iunie 2023, https://www.youtube.com/watch?v=h8n---ixZE0