

Utilizarea nivelurilor de pregătire tehnologică în dezvoltarea unui UAS

Using Technology Readiness Levels (TRLs) in UAS development

Cpt.cdor.instr.sup.drd. Cătălin BALMUȘ*

*Universitatea Națională de Apărare „Carol I”

e-mail: cata_afa@yahoo.com

Abstract

În lumea dinamică a tehnologiei aeronautice, dezvoltarea de sisteme de aeronave fără echipaj la bord (UAS) reprezintă un domeniu în continuă expansiune și inovație. Progresul tehnologic în acest sector poate fi măsurat prin intermediul Scalei Nivelurilor de Pregătire Tehnologică (Technology Readiness Levels – TRL), care oferă un cadru standardizat pentru evaluarea maturității tehnologice a unui produs sau sistem. Scala TRL este utilizată pe larg în industrie și cercetare pentru a ghida dezvoltarea sistematică a tehnologiilor noi, de la concept și cercetare inițială până la implementarea operațională și comercializare. Această scală poate fi utilizată cu succes și în procesul de cercetare, dezvoltare și implementare al unui sistem de aeronave fără echipaj la bord.

In the dynamic world of aeronautical technology, the development of uncrewed aircraft systems (UAS) is an area of continuous expansion and innovation. Technological progress in this sector can be measured by the Technology Readiness Levels (TRL) Scale, which provides a standardized framework for assessing the technological maturity of a product or system. The TRL scale is widely used in industry and research to guide the systematic development of new technologies from concept and initial research to operational implementation and commercialization. This scale can also be successfully used in the research, development, and deployment of an uncrewed aircraft system.

Cuvinte-cheie:

niveluri de pregătire tehnologică; TRL; dezvoltare tehnologică; UAS.

Keywords:

technology readiness levels; TRL; technological development; UAS.

Info articol

Primit: 8 iulie 2024; Evaluat: 18 august 2024; Acceptat: 10 septembrie 2024; Disponibil online: 15 octombrie 2024

Citare: Balmuș, C. 2024. „Utilizarea nivelurilor de pregătire tehnologică în dezvoltarea unui UAS”.

Buletinul Universității Naționale de Apărare „Carol I”, 13(3): 33-41. <https://doi.org/10.53477/2065-8281-24-20>



© Editura Universității Naționale de Apărare „Carol I”

Articol cu acces deschis distribuit în conformitate cu termenii și condițiile licenței Creative Commons Attribution ([CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/))

Creşterea economică și noile tehnologii sunt tot mai legate de consumul tot mai diminuat de energie și de impactul redus asupra mediului, în contextul în care se pune accent pe interdisciplinaritatea dintre cercetare, educație și comercializarea tehnologiilor. Dezvoltarea durabilă și inovarea tehnologică sunt esențiale pentru a răspunde provocărilor globale actuale, de la schimbările climatice la epuizarea resurselor naturale. În acest context, procesul de transformare a unei idei inovatoare într-o tehnologie aplicabilă pe scară largă devine esențial pentru progresul economic și social.

Astfel, tehnologiile în curs de dezvoltare parcurg un ciclu bine definit, care începe de la o idee și se finalizează cu implementarea și aplicarea acesteia în diverse domenii. Acest proces de maturizare tehnologică a fost standardizat de NASA în anii '70, în principal pentru tehnologiile referitoare la explorarea spațială. Conceptul inițial al scării de maturitate tehnologică (Technology Readiness Levels – TRL) a fost introdus de Stan Sadin, un cercetător din cadrul NASA, care a conceput prima scală cu șapte niveluri în anul 1989. În anii '90, NASA a adoptat o versiune extinsă a scalei TRL, care includea nouă niveluri de maturitate tehnologică. Această scală cu nouă niveluri a fost rapid acceptată pe scară largă în întreaga industrie aerospațială și nu numai, devenind un standard în evaluarea și monitorizarea progresului tehnologic. De-a lungul timpului, utilizarea scalei TRL s-a extins în numeroase sectoare industriale, inclusiv în domenii precum sănătatea, energia, transporturile și tehnologiile informației (Banke 2010).

Implementarea scalei TRL contribuie, de asemenea, la reducerea riscurilor asociate cu dezvoltarea tehnologică și facilitează procesul de luare a deciziilor în ceea ce privește investițiile în cercetare și dezvoltare. În plus, această metodologie sprijină colaborarea interdisciplinară și internațională, având un impact semnificativ asupra inovației și competitivității pe piața globală.

Prin urmare, înțelegerea și aplicarea corectă a scalei TRL sunt cruciale pentru succesul tehnologiilor emergente și pentru realizarea unui echilibru între progresul economic, protecția mediului și bunăstarea societății. Această abordare integrată și standardizată continuă să joace un rol vital în modelarea viitorului tehnologic și în transformarea ideilor inovatoare în soluții concrete și eficiente.

Prezentare generală a TRLs

Nivelurile de Pregătire Tehnologică (Technology Readiness Levels – TRL) reprezintă o metodologie standardizată, utilizată pentru a evalua stadiul de dezvoltare și maturitate al unei tehnologii pe parcursul etapelor de cercetare, dezvoltare și implementare. Aceste niveluri sunt numerotate de la 1 la 9, unde TRL 9 reprezintă cea mai matură tehnologie. Cel mai mic nivel, TRL 1, indică faptul că informațiile care apar la cercetarea științifică de bază fac primul pas de la o idee la o aplicație practică. O tehnologie care a atins TRL 9 este o tehnologie care a fost încorporată

pe deplin într-un sistem mai mare, s-a dovedit că funcționează fără probleme și este considerată operațională. Drumul de la TRL 1 la TRL 9 este adesea lung și complex, implicând ani de cercetare și dezvoltare. Acest proces include testarea și validarea componentelor individuale, crearea de prototipuri, integrarea acestora într-un sistem complet, urmată de testări suplimentare în laborator și în condiții reale. Numai după trecerea cu succes prin toate aceste etape, o tehnologie poate fi considerată matură și pregătită pentru utilizare practică.

Cele nouă niveluri, definite inițial de NASA, au fost următoarele (Héder 2017):

- Nivelul 1 - Principii de bază observate și raportate
- Nivelul 2 - Conceptul și/sau aplicația tehnologică formulată
- Nivelul 3 - Funcționarea analitică și experimentală și/sau dovedirea caracteristicilor conceptului
- Nivelul 4 - Validarea în mediul de laborator
- Nivelul 5 - Validarea în mediul relevant
- Nivelul 6 - Demonstrația unui model de sistem/subsistem sau a unui prototip într-un mediu relevant (terestru sau spațial)
- Nivelul 7 - Demonstrație a unui prototip în spațiu
- Nivelul 8 - Sistem real finalizat și „calificat pentru zbor” prin testare și demonstrație (la sol sau în spațiu)
- Nivelul 9 - Sistem „dovedit în zbor” prin misiuni executate cu succes

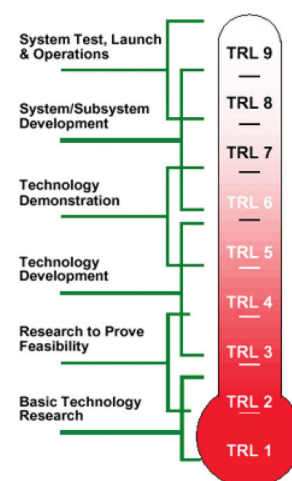


Figura 1 NASA technology readiness levels

Astfel, nivelurile 1 și 2 se referă la partea teoretică a dezvoltării și au cost mai scăzut, deoarece sunt rezultatele unor programe de cercetare științifică. Nivelul 3 are un cost redus și el, dar TRL 4 și TRL 5 au costuri ceva mai ridicate. Costurile cresc apoi exponențial și ating un vârf la TRL 8, care este cel mai costisitor de realizat (Héder 2017). Abordarea neglijentă, a TRL-urilor de la 4 la 7 poate duce la ceea ce se numește „Valea Morții”, unde nici mediul academic, nici sectorul privat nu acordă prioritate investițiilor. De aceea multe tehnologii, deși promițătoare, își termină călătoria înainte de implementare. Pentru a acoperi această zonă, este nevoie de implicare și efort suplimentar de colaborare (TWI-Romania, fără an). Evaluarea nivelului de pregătire a tehnologiilor individuale permite reducerea riscurilor în ceea ce privește bugetul și planificarea.

Scala TRL a fost adoptată în Europa de către Comisia Europeană în 2011, în urma unui studiu asupra tehnologiilor generice esențiale (Key Enabling Technologies – KETs) pentru impactul lor potențial în consolidarea potențialului industrial și de inovare al Europei. S-a propus crearea unui grup de experți la nivel înalt, însărcinat cu elaborarea unei strategii europene coerente pentru dezvoltare, care a recomandat ca scala TRL să fie utilizată ca instrument pentru evaluarea rezultatelor și așteptărilor proiectelor (Comisia Europeană 2011).

Scala TRL a fost larg adoptată la nivelul UE ca instrument de luare a deciziilor, în cazul finanțării investițiilor în cercetare, dezvoltare și inovare în cadrul marilor

programe. Şi în cadrul programului „Horizon 2020” de finanţare pentru cercetare şi inovare al Uniunii Europene, din 2014 -2020, scala TRL a fost o cerinţă a cererii de finanţare, ajutând astfel evaluatorul să aprecieze nivelul specific al fiecărei etape şi permiţând tranziţia la etapele următoare (Bruno şi alţii 2020, 370).

EARTO (European Association of Research and Technology Organisations – Asociaţia Europeană a Organizaţiilor de Cercetare şi Tehnologie) a observat o utilizare crescută a scalei TRL ca instrument de planificare pentru managementul în domeniul inovaţiei şi astfel a adaptat-o pentru a se potrivi scopurilor de cercetare, dezvoltare şi investiţii la nivelul Uniunii Europene, astfel (EARTO 2014):

- TRL 1 – Observaţii ale principiilor de bază: în acest stadiu, se pune accent pe înţelegerea ştiinţifică a unui proces sau a unui material.
- TRL 2 – Conceptul tehnologic este stabilit: sunt identificate posibilităţile de aplicare a principiilor de bază. Se definesc primele principii de producţie, dar şi posibilele pieţe de desfacere.
- TRL 3 – Validarea experimentală a conceptului: pe baza studiilor preliminare, începe cercetarea şi dezvoltarea proiectului la nivel de laborator şi apar primele discuţii despre principalii beneficiari sau clienţi.
- TRL 4 – Validarea tehnologiei în laborator: tehnologia este validată prin testare de laborator. Se identifică principiile de producţie şi se efectuează studii de piaţă. TRL 4-6 reprezintă legătura dintre cercetarea ştiinţifică şi inginerie, de la dezvoltare la demonstraţie. TRL 4 reprezintă primul pas în care se determină dacă componentele individuale vor funcţiona împreună ca sistem.
- TRL 5 – Testarea prototipului într-un mediu relevant: sistemul este testat în mediul pentru care a fost proiectat şi conectat la infrastructura tehnologică necesară. Se pregătesc procesele pentru producerea la scară mai largă. Diferenţa majoră dintre TRL 4 şi 5 este reprezentată de creşterea fidelităţii sistemului şi a funcţionării acestuia într-un mediu relevant (pentru care a fost creat). Riscul ştiinţific ar trebui să se finalizeze la sfârşitul TRL 5. Rezultatele demonstrate ar trebui să fie finale şi relevante din punct de vedere statistic.
- TRL 6 – Demonstrarea viabilităţii tehnologiei într-un mediu operaţional: sistemul prototip este verificat. Exemplele pot include un prototip de sistem/model care este produs şi demonstrat într-un mediu simulat. Este un pas important în demonstrarea utilităţii unei tehnologii. Spre exemplu, fabricarea dispozitivului pe o linie de producţie pilot. În faza TRL 6 începe dezvoltarea reală a tehnologiei ca sistem operaţional. Diferenţa dintre TRL 5 şi TRL 6 constă în trecerea de la nivel de laborator la cea de inginerie şi astfel la determinarea factorilor de scalare care vor permite proiectarea şi producţia sistemului final.
- TRL 7 – Demonstrarea sistemului model şi a prototipului în mediu operaţional: creşte semnificativ maturitatea tehnologică. Este necesară demonstrarea funcţionalităţii unui prototip real al sistemului într-un mediu relevant/operaţional. Designul final este practic complet.

- TRL 8 – Sistemul complet și validat: Sistemul/modelul este produs și calificat. Tehnologia s-a dovedit funcțională, iar TRL 8 reprezintă sfârșitul dezvoltării sistemului. Produsele se pot produce în masă, iar costurile reale de fabricație sunt determinate.
- TRL 9 – Sistemul actual validat în mediu operațional: Sistemul/modelul este dovedit și gata pentru implementare comercială completă.

Aplicații ale TRL în diferite industrii

Industria și alte organizații guvernamentale au adaptat definițiile pentru anumite TRL-uri, pentru a se potrivi cu propriile nevoi, dar scala lor generală se potrivește foarte bine cu scala inițială, creată de NASA.

Nivelurile de Pregătire Tehnologică nu sunt limitate doar la explorarea spațială sau la tehnologiile aerospațiale. Acestea sunt folosite într-o varietate de industrii, inclusiv în domeniul energiei, sănătății, transporturilor și tehnologiilor informaționale. În industria energetică, TRL poate fi utilizat pentru a evalua maturitatea tehnologiilor de captare și de stocare a carbonului sau a tehnologiilor de energie regenerabilă. De exemplu, Departamentul pentru Energie din SUA folosește un ghid de evaluare a nivelului de pregătire tehnologică (Technology Readiness Assessment Guide) pentru a descrie cerințele energetice care trebuie îndeplinite ([U.S. Department of Energy 2011](#)).

În domeniul sănătății, TRL poate fi folosit pentru a evalua maturitatea unui nou medicament sau a unei noi tehnologii medicale. Produsele medicale necesită definiții și descrieri TRL care sunt adecvate și unice pentru tehnologiile pe care se bazează și care țin cont de reglementările din domeniul medical. Recunoscând acești factori, Comandamentul de Cercetare Medicală și Materiale al Armatei SUA (USAMRMC) a stabilit definiții, descrieri și procese specifice pentru nivelurile TRL din domeniu ([Tier7 2018](#)).

Nivelurile TRL pot fi folosite și în contextul inovației deschise. Inovarea deschisă este o paradigmă care presupune că firmele pot și ar trebui să folosească idei atât din interior, cât și din exterior, precum și soluții din piața internă și, în același timp, din cea externă pentru a promova tehnologiile de care dispun. Inovarea deschisă încurajează colaborarea, partajarea ideilor și integrarea cunoștințelor din diverse surse. Aceasta poate include colaborarea cu alte companii, instituții de cercetare, universități sau chiar cu utilizatorii finali ([Innovating Society, fără an](#)). În contextul inovației deschise, TRL poate fi un instrument util pentru a facilita colaborarea dintre diferite organizații. De exemplu, o companie poate decide să colaboreze cu un institut de cercetare pentru a dezvolta o nouă tehnologie. În acest caz, TRL poate fi folosit pentru a evalua stadiul de dezvoltare al tehnologiei și pentru a determina resursele necesare pentru a avansa tehnologia la următorul nivel TRL.

Nivelurile de Pregătire Tehnologică joacă un rol crucial și în deciziile de finanțare pentru dezvoltarea tehnologică. Investitorii și agențiile de finanțare folosesc adesea

TRL pentru a evalua riscul asociat cu investiția într-o anumită tehnologie. O tehnologie cu un nivel TRL ridicat poate fi considerată mai puțin riscantă, deoarece a trecut deja prin numeroase etape de testare și de validare. În contrast, o tehnologie cu un nivel TRL scăzut poate fi considerată mai riscantă, deoarece poate necesita mai multă cercetare și dezvoltare, înainte de a fi gata pentru implementare comercială.

Exemplu de scală TRL pentru dezvoltarea unui UAS

Scala TRL pentru UAS începe cu cercetarea fundamentală și se termină cu operaționalizarea completă a sistemului. Fiecare nivel TRL reprezintă un pas critic în procesul de validare și verificare a tehnologiei, asigurând că inovațiile sunt nu doar fezabile, ci și aplicabile și eficiente în misiuni reale de zbor. Prin urmare, scala TRL servește ca o hartă pentru ingineri și cercetători, indicând etapele cheie și criteriile necesare pentru a transforma o idee potențial revoluționară într-o soluție viabilă:

- TRL 1 – Cercetarea fundamentală: La acest nivel, se efectuează cercetări pentru a înțelege fenomenele și principiile științifice care vor sta la baza tehnologiei UAS. De exemplu, se pot studia caracteristicile aerodinamice ale diferitelor elemente structurale ale aeronavelor sau se pot analiza noi materiale pentru construcția acestora. Este o etapă de explorare și de acumulare a cunoștințelor necesare pentru a avansa în dezvoltarea tehnologică.
- TRL 2 – Conceptul și aplicabilitatea: După stabilirea principiilor fundamentale, cercetătorii încep să elaboreze concepte tehnologice și să evalueze viabilitatea lor. La acest nivel, se pot realiza modele matematice și simulări computerizate pentru a testa diferite configurații ale UAS și pentru a identifica cele mai promițătoare direcții de dezvoltare.
- TRL 3 – Validarea conceptului: Aici, conceptele tehnologice sunt supuse unor teste inițiale pentru a verifica dacă funcționează conform așteptărilor. Se pot utiliza prototipuri la scară redusă sau componente individuale pentru a demonstra fezabilitatea ideilor. De exemplu, se pot efectua teste de zbor cu modele reduse pentru a evalua comportamentul aerodinamic.
- TRL 4 – Testarea componentelor: La acest nivel, componentele individuale ale UAS sunt create și testate într-un mediu de laborator controlat. Se pot efectua teste de rezistență, teste ale motorului, teste de funcționare a senzorilor și a sistemelor de navigație sau a legăturilor de date, precum și evaluarea integrării diferitelor subsisteme.
- TRL 5 – Integrarea și testarea în mediu relevant: Componentele și subsistemele sunt integrate într-un prototip care este apoi testat într-un mediu care imită condițiile reale de operare. Acest pas este crucial pentru a evalua cum funcționează sistemul ca un întreg și pentru a identifica orice probleme de compatibilitate sau de performanță.
- TRL 6 – Demonstrarea prototipului: Un prototip funcțional al UAS este construit și testat în condiții care simulează mediul operațional. Acesta este

momentul în care se verifică dacă sistemul poate îndeplini misiunile pentru care a fost proiectat, inclusiv lansarea, zborul și recuperarea.

TRL 7 – Testarea avansată a prototipului: Prototipul este acum testat într-un mediu care se apropie cât mai mult de condițiile reale de operare. Se efectuează teste de zbor extinse pentru a evalua performanța în diferite scenarii și pentru a asigura că sistemul este robust și fiabil.

TRL 8 – Sistemul final: Sistemul UAS este acum complet dezvoltat și este supus unor teste finale pentru a confirma că îndeplinește toate cerințele specificate. Acest nivel include obținerea certificărilor necesare și pregătirea pentru producția în serie.

TRL 9 – Operaționalizarea: La ultimul nivel, UAS este folosit în misiuni reale și demonstrează că poate opera eficient și sigur în condițiile pentru care a fost proiectat. Acesta este testul final al succesului dezvoltării tehnologice, demonstrând că sistemul este gata pentru implementare pe scară largă.

Această scală TRL este un exemplu și oferă o imagine clară a procesului de dezvoltare pas cu pas, de la cercetarea inițială până la implementarea operațională a tehnologiei UAS. Fiecare nivel TRL este esențial pentru a asigura că sistemul final este sigur, eficient și pregătit pentru provocările mediului operațional real.

Importanța și provocările TRL

Evaluarea nivelului de pregătire tehnologică este esențială pentru a înțelege riscurile asociate cu dezvoltarea și implementarea unei noi tehnologii. O tehnologie cu un nivel TRL scăzut poate avea un potențial mare, dar și riscuri semnificative, deoarece multe aspecte ale tehnologiei pot fi încă necunoscute sau nerezolvate. Pe de altă parte, o tehnologie cu un nivel TRL ridicat este mai aproape de a fi gata pentru implementare comercială, dar poate necesita încă investiții semnificative pentru a fi adusă pe piață.

TRL oferă o metodă obiectivă de evaluare a maturității unei tehnologii, iar investitorii și agențiile de finanțare pot utiliza nivelurile TRL pentru a evalua riscurile și oportunitățile asociate cu investițiile în tehnologii emergente.

Deși scala TRL este un instrument util pentru evaluarea maturității tehnologice, aceasta are și unele limitări. De exemplu, scala TRL nu ia în considerare aspectele comerciale sau economice ale dezvoltării tehnologice. O tehnologie poate avea un nivel TRL ridicat, dar poate fi comercial neviabilă, din cauza costurilor ridicate de producție sau a lipsei de cerere pe piață. Alte provocări privind utilizarea TRL:

- scala TRL nu ia în considerare aspectele sociale sau etice ale dezvoltării tehnologice;
- evaluarea TRL poate fi subiectivă, deoarece depinde de interpretarea și experiența evaluatorilor;
- testarea și validarea unei tehnologii pentru a atinge niveluri TRL superioare

pot fi costisitoare și pot necesita mult timp;
- TRL nu este aplicabil în mod direct în toate domeniile tehnologice. Unele tehnologii pot avea particularități care nu se încadrează perfect în această scară.

Concluzii

Nivelurile de Pregătire Tehnologică sunt un instrument esențial pentru evaluarea maturității tehnologice și pentru gestionarea riscurilor asociate cu dezvoltarea și implementarea noilor tehnologii. Cu toate acestea, este important să se înțeleagă că TRL este doar unul dintre multele instrumente disponibile pentru evaluarea tehnologiilor și că acesta trebuie utilizat în combinație cu alte metode și instrumente pentru a obține o imagine completă a potențialului și a riscurilor unei noi tehnologii. În ciuda criticilor, TRL rămâne un instrument esențial în evaluarea maturității tehnologice. Pe măsură ce tehnologia continuă să evolueze într-un ritm rapid, este posibil ca scala TRL să fie adaptată sau modificată pentru a ține pasul cu aceste schimbări. De exemplu, ar putea fi adăugate noi niveluri TRL pentru a reflecta noile etape de dezvoltare tehnologică sau ar putea fi dezvoltate scale TRL specifice pentru diferite domenii tehnologice.

În ciuda criticilor, TRL rămân un instrument valoros pentru evaluarea maturității tehnologice. Înțelegerea și aplicarea corectă a TRL pot ajuta la gestionarea riscurilor asociate cu adoptarea și implementarea de noi tehnologii.

Referințe

- Banke, Jim.** 2010. "Technology Readiness Levels Demystified." <https://www.nasa.gov/aeronautics/technology-readiness-levels-demystified/>.
- Bruno, Ilenia, Georges Lobo, Beatrice Valente Covino, Alessandro Donarelli, Valeria Marchetti, Anna Schiavone Panni și Francesco Molinari.** 2020. "Technology readiness revisited: a proposal for extending the scope of impact assessment of European public services." *International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance (ICEGOV 2020)*. Athens, Greece. 369-380. https://ec.europa.eu/isa2/sites/default/files/technology_readiness_revisited_-_icegov2020.pdf.
- EARTO.** 2014. "The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO Recommendations", https://www.earto.eu/wp-content/uploads/The_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf.
- Comisia Europeană.** 2011. "Key Enabling Technologies." https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2009_2014/documents/imco/dv/hlg_report_ket/hlg_report_ket_en.pdf.
- Héder, Mihály.** 2017. "From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation." *The Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal* 22 (2): 6.
- Innovating Society.** fără an. „Inovare Deschisă – Definiții, Avantaje și Exemple”. Accesat 9 mai 2024. <https://innovatingsociety.com/inovare-deschisa-definitii-avantaje-si-exemple/>.

- Tier7.** 2018. "Biomedical and Line DoD Technology Readiness Levels (TRLs)". <https://tier7.us/biomedical-line-dod-trls/>.
- TWI-Romania.** fără an. *Ce este TRL (Technology readiness level)?* Accesat 9 mai 2024. <https://www.twi-global.com/locations/romania/ce-facem/intrebari-frecvente-faq/ce-este-trl-technology-readiness-level>.
- U.S. Department of Energy.** 2011. "Technology Readiness Assessment Guide". <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04a/@@images/file>.