

IRON MAN: LA CIÈNCIA DE LA CIÈNCIA-FICCIÓ



PSEUDÒNIM: "TONY STARK"

MANEL PALENZUELA INSTITUT FONT DEL FERRO

TR 2019-2020 2n BATXILLERAT A

Índex de continguts:

INTRODUCCIÓ	1
1. CIÈNCIA-FICCIÓ I MARVEL.....	5
2. IRON MAN	7
2.1. Introducció al personatge:.....	8
2.2. Habilitats del personatge:.....	9
3. TECNOLOGIA I FÍSICA APLICADES A IRON MAN	11
3.1. El “Reactor ARC” d’Iron Man és producte de la ficció o té una base científica?	11
3.1.1. Anàlisi de la filmografia.	11
3.1.2. Antecedents i investigacions científiques prèvies.	16
3.1.3. Estudi pràctic/comparatiu	28
3.1.4. Conclusions.....	50
3.2. En el cas de que existís l’armadura i el reactor, podria sobreviure un humà a dintre l’armadura quan aquesta es trobés en funcionament?	52
3.2.1. Anàlisi de la filmografia.	52
3.2.2. Antecedents i investigacions científiques prèvies.	59
3.2.3. Estudi pràctic/comparatiu.	66
3.2.4. Conclusions.....	73
4. CONCLUSIONS GENERALS.....	75
BIBLIOGRAFIA, WEBGRAFIA I FILMOGRAFIA.....	78
REFERÈNCIES ESPECÍFIQUES DE DADES	87
AGRAÏMENTS.....	89

INTRODUCCIÓ

La ciència-ficció és un gènere literari i cinematogràfic que ens permet explorar totes les possibilitats que donen resposta a les nostres preguntes més ambiciosos (científicament). Aquest gènere intenta recrear com seria el nostre univers en les condicions establertes a la pregunta i determinar fins a quin punt podria arribar a avançar la ciència. No obstant, aquest procés no sempre es fa a partir d'un rigor científic i algunes pel·lícules de ciència-ficció acaben convertint-se en més ficció que ciència. Per exemple, les pel·lícules d'Star Wars ofereixen una visió de com seria l'univers si la tecnologia espacial estigués molt més avançada però també mostren fenòmens que no tenen una base científica (com quan es produeix una explosió en el buit).

Com explica Otto F. Gonzalez, professor de literatura a la Universidad Central de Venezuela, "Cada obra literària inaugura un *cosmos* amb les seves pròpies lleis i principis, amb els seus propis marges i tessitures; no importa com de semblant sigui aquesta realitat a la nostra, no és de cap manera la mateixa. No obstant, l'obra pretén suplantar (momentàniament) el nostre món, i per això ens ha de convèncer. (...) Certament la ciència-ficció no és verdadera ja que no funciona d'acord amb el que les regles del nostre món defineixen com a veritat, d'altra banda pretén ser versemblant al suggerir-nos la possibilitat que aquest *cosmos* està tan viu com el nostre."

L'Univers Cinematogràfic de Marvel (MCU) és un univers semblant al nostre però que segueix el principi postulat per Otto F. Gonzalez. Un exemple de lleis pròpies d'aquest nou *cosmos* és l'existència de 6 pedres de l'infinit (Infinity Gems en versió original) que defineixen nous principis que permeten tenir un control del temps, l'espai, la ment, l'ànima, la realitat i el poder.

En aquest univers tots els esdeveniments que ocorren tenen una lògica i un sentit perquè segueixen unes lleis pròpies. En el MCU, Iron Man té una base científica però no sabem si els coneixements utilitzats per aquest personatge coincideixen amb els de la nostra realitat. Per tant, la ciència d'Iron Man i la seva tecnologia podria no estar justificada en el nostre univers.

Aquest treball de recerca es centra en intentar determinar si l'Iron Man de l'MCU tindria una base científica si el sotmetéssim a la física (lleis i teories) i tecnologia (avenços tecnològics) que coneixem actualment.

El treball es desenvolupa per tal de donar resposta a la següent pregunta:

L'Iron Man de l'MCU podria ser extrapolable al nostre món?

O bé, formulada d'una manera més explícita i entenedora:

Les pel·lícules d'Iron Man són producte de la ficció o tenen una base científica?

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

Personalment, tinc interès pel món científic i, d'un principi, tenia clar que volia tractar temes relacionats amb aquesta branca del coneixement a l'hora de fer el meu treball de recerca. No obstant, alguns temes que se m'anaven proposant no eren prou innovadors o ja estaven molt treballats. A més a més, durant el meu temps d'oci, m'agrada veure pel·lícules i sèries de ciència-ficció. Unint aquestes dues passions sorgeix aquest treball de recerca.

El treball no suposa cap rellevància científica perquè no descobreix cap principi o llei, sinó que nodreix l'entreteniment i l'oci científic d'aquelles persones que gaudeixen de les pel·lícules de ciència-ficció de Marvel.

Els objectius del treball són els següents:

- Identificar els conceptes científics esmentats a les pel·lícules de Marvel referents a Iron Man.
- Ampliar el meu coneixement sobre els conceptes emprats a partir d'estudis científics ja realitzats.
- Comparar la informació obtinguda a les pel·lícules amb els coneixements científics actuals i determinar les "incongruències o errors" que els guionistes van cometre al escriure les pel·lícules.

La metodologia utilitzada al llarg del treball es basa en el mètode hipotètico-deductiu en el que hi consta l'observació del fenomen, la creació d'una hipòtesis, la recerca de proposicions més elementals a la hipòtesi i la comprovació de la veracitat de la hipòtesi.

Seguint aquest mètode, la feina realitzada es divideix en els següents passos:

- Primera visualització de les pel·lícules de Marvel (Observació).
- Formulació de preguntes que relacionen Iron Man amb la física i la tecnologia (Creació d'una hipòtesis en forma de pregunta).
- Segona visualització (més detallada) de la filmografia recollint les dades relacionades amb cada pregunta (Recerca de proposicions fictícies elementals).
- Cerca d'antecedents i investigacions científiques prèvies (Recerca de proposicions elementals).
- Estudi pràctic i comparatiu dels fenòmens per respondre les preguntes realitzades anteriorment (Comprovació de la veracitat de la hipòtesi).

La bibliografia consultada es centra principalment en treballs científics, *blogs* especialitzats en física nuclear, pàgines oficials (com la de Marvel, l'ITER o la NASA entre d'altres), articles científics publicats a la revista *Nature* i llibres educatius (llibres de batxillerat de física i tecnologia). Per tant, les fonts genèriques de recerca han estat internet, algunes biblioteques (concretament la de la UdG) i la lectura de llibres d'adquisició pròpia.

Com es pot comprovar, la bibliografia, webgrafia i filmografia és d'una extensió molt prolongada però això es justifica amb el fet que, en cada cas, la informació obtinguda ha estat contrastada i corroborada per afegir-hi veracitat al treball.

A més a més, durant la recerca no he volgut mirar gaires llibres que relacionessin el personatge d'Iron Man amb la ciència perquè els meus resultats i suposicions no estiguessin influenciades per altres autors.

En el treball, hi ha una gran part d'informació que no he produït jo sinó que s'ha extret de tota la bibliografia indicada al final del treball. La meua aportació personal (les idees o conceptes que no he extret de cap font) són: l'anàlisi de les pel·lícules, els diferents estudis comparatius amb tot el que això comporta (gràfics, taules...), els càlculs i demostracions i el disseny dels diferents reactors.

Totes les dades, utilitzades en els càlculs i demostracions, apareixen al treball amb un número romà de superíndex que indica quina és la seva referència. Aquesta disposició ha estat donada perquè les dades referenciades són dades utilitzades explícitament en el treball i la seva variació provocaria l'alteració (mínima o significativa segons la dada) dels resultats del treball. El conjunt de referències es troba al final del treball a la pàgina 87.

Els programes emprats al llarg del treball són: *Kinovea*, *DrawPad Graphic Design Editor* i *Geogebra*.

Kinovea és un reproductor de vídeo utilitzat normalment per analitzar seqüències i moviments (generalment s'utilitza en l'àmbit esportiu). Aquest programa proporciona un conjunt d'eines per captar, alentir, estudiar, comparar, anotar i mesurar aspectes tècnics.

DrawPad Graphic Design Editor és un programa de disseny gràfic, dibuix i pintura digital que permet realitzar dibuixos a mà alçada, il·lustracions i diagrames basats en formes geomètriques. El *software* permet l'edició basada en capes i en les funcions d'edició com retallar, girar, canviar de mida, volteig i inserció de text amb una gran varietat d'estils i formats.

Geogebra és un programa lliure matemàtic que combina geometria, àlgebra i càlcul. Les construccions geomètriques i gràfiques fetes amb aquest programa es poden canviar dinàmicament i es pot introduir i modificar directament a la pantalla. A més a més, *Geogebra* té la capacitat d'assignar variables i calcular derivades de funcions de forma gràfica.

La planificació del treball ha estat determinada a partir d'un "quadern de bitàcola" en el que s'anava apuntant la feina realitzada cada dia i s'indicava de manera orientativa quina era la feina que s'hauria de realitzar posteriorment a curt termini. Tot i això, moltes vegades aquesta planificació no es seguia al peu de la lletra i es tardava més temps del que s'havia establert per realitzar les tasques ja que el tema de recerca s'ampliava dràsticament. Per exemple, en un principi,

pensava que només hi havia dos tipus de reaccions nuclears però posteriorment me'n vaig adonar que n'hi havia més.

El treball s'estructura en quatre grans apartats. El primer ("Ciència-ficció i Marvel"), correspon a una petita introducció o "context" que explica què és Marvel i com es relaciona amb el cinema. En canvi, el segon apartat ("Iron Man") té la intenció d'oferir una idea general sobre Iron Man i es divideix en dos subapartats: la "introducció al personatge" i les "habilitats del personatge". El tercer apartat ("Tecnologia i física aplicades a Iron Man") constitueix la majoria del treball i es podria definir com a "Cos del Treball". Aquest apartat es subdivideix en dues preguntes que relacionen la física i la tecnologia amb Iron Man. Aquestes dues qüestions són les següents:

- El "Reactor ARC" d'Iron Man és producte de la ficció o té una base científica?
- En el cas de que existís l'armadura i el reactor, podria sobreviure un humà a dintre l'armadura quan aquesta es trobés en funcionament?

Al seu torn, cada una de les preguntes es divideix en quatre subapartats: l'anàlisi de la filmografia, els antecedents i investigacions científiques prèvies, l'estudi pràctic/comparatiu i les conclusions (específiques de cada pregunta).

Finalment, en el quart apartat s'hi exposen les conclusions genèriques del treball i es dona resposta a la hipòtesi formulada en forma de pregunta inicialment.

L'estructura d'alguns treballs de recerca es divideix clarament en dos grans blocs: el marc teòric i el pràctic. En aquest cas no ha estat així perquè, en un inici, no sabia quins conceptes s'haurien de buscar ja que els temes de recerca han estat definits pels conceptes que s'anaven esmentant a les pel·lícules. Tot i això, sí que sabia, des d'un principi, quin seria l'àmbit treballat ja que les pròpies qüestions realitzades feien referència a la tecnologia i a la física.

1. CIÈNCIA-FICCIÓ I MARVEL

Marvel Entertainment és una empresa estatunidenca d'entreteniment, propietat de *The Walt Disney Company*¹, que es coneix per les seves divisions principals: *Marvel Animation*, *Marvel Television* i *Marvel Comics*.

Aquesta última, *Marvel Comics*, és una editorial que va ser formada l'any 1939 als Estats Units i és propietària d'una gran quantitat de superherois coneguts mundialment com, per exemple, Spider-Man, X-Men, Captain America, Hulk, Thor, The Fantastic 4 o Iron Man. Aquesta empresa va ser la precursora de tot el que es coneix avui en dia com a "Marvel" (va originar el Multivers Marvel²).

Marvel Comics (i, com a conseqüència, *Marvel Entertainment*) tenia com a filial³ un estudi cinematogràfic, anomenat *Marvel Studios*, que produïa pel·lícules relacionades amb els personatges dels còmics. Tot i això, l'any 2015, "Disney" va decidir reorganitzar les seves empreses afiliades i va convertir a *Marvel Studios* en un estudi més dintre de la divisió *The Walt Disney Studios* (empresa cinematogràfica matriu d'altres estudis com "Pixar", Lucasfilm o 20th Century Fox).

Les pel·lícules més conegudes de *Marvel Studios* localitzen la seva acció en un univers compartit, l'anomenat *Marvel Cinematic Universe* (MCU). Aquest univers cinematogràfic és la representació d'un univers diferent dintre del Multivers Marvel. Actualment, la llista de pel·lícules referent al MCU és la següent (el personatge d'Iron Man apareix a les pel·lícules marcades en negreta):

- **Iron Man** (2008)
- **The Incredible Hulk** (2008)
- **Iron Man 2** (2010)
- Thor (2011)
- Captain America: The First Avenger (2011)
- **The Avengers** (2012)
- **Iron Man 3** (2013)
- Thor: The Dark World (2013)
- Captain America: The Winter Soldier (2014)
- Guardians of the Galaxy (2014)
- **Avengers: Age of Ultron** (2015)
- Ant-Man (2015)
- **Captain America: Civil War** (2016)
- Doctor Strange (2016)
- Guardians of the Galaxy Vol.2 (2017)
- **Spider-Man: Homecoming** (2017)
- Thor: Ragnarok (2017)

¹ Companyia de mitjans de comunicació i entreteniment més gran del món. També es coneix com a "Disney".

² Conjunt d'universos compartits de ficció en que es centra l'acció dels tots personatges de Marvel.

³ Empresa que és controlada per una d'altre més gran.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

- Black Panther (2018)
- **Avengers: Infinity War** (2018)
- Ant-Man and the Wasp (2018)
- Captain Marvel (2019)
- **Avengers: Endgame** (2019)
- **Spider-Man: Far from home** (2019)

2. IRON MAN

“Los constantes avances que se realizaban en ciencia en los años dorados del cómic hicieron creer que el hombre, con la tecnología en sus manos, todo lo podía. Era capaz de llegar a la Luna o destruir el planeta. Podría descifrar el código de la vida o crear un cerebro artificial. Y no necesitaba superpoderes para ello. Su arma era la ciencia. No es extraño entonces que primero fuera Superman, un extraterrestre invencible y todopoderoso y luego llegara Batman: un tío normal, cuya única virtud era su inteligencia (bueno, eso y mucho dinero). El ser humano comenzaba a ver la ciencia como una aliada de la que podía sacar grandes provechos. Tantos como algunos de los personajes más conocidos del cómic (Iron Man) o como algunos de los villanos más detestados (Harry Osborn).”

La ciencia de los superhéroes (pàg.195), text de Juan Scaliter en versió original.



2.1. Introducció al personatge:

Anthony “Tony” Edward Carbonell Stark, conegut pel seu *alter ego* Iron Man (home de ferro en anglès), és un personatge de ficció de l’Univers Marvel que va ser creat per Stan Lee i Larry Lieber i va ser dissenyat per Don Heck i Jack Kirby. Iron Man va aparèixer per primera vegada en el còmic de Marvel *Tales of Suspense #39*, l’any 1963.

Segons els seus creadors, Tony Stark és un exitós i multimilionari magnat empresarial, fabricant d’armes, playboy i geni que es converteix en un superheroï pel seu compte gràcies als seus coneixements i habilitats.

A més a més, Stan Lee va explicar durant una entrevista que quan va crear aquest personatge buscava representar allò que els seus lectors odiaven més: la guerra, l’exèrcit i les armes.



Imatge 1: Portada del còmic Tales of Suspense #39 (1963).

Font: Marvel Comics

https://www.marvel.com/comics/issue/11280/tales_of_suspense_1959_39

El seu propòsit era crear un personatge que hauria de ser odiat però forçar a la gent per tal de que els hi agradés. Per aconseguir-ho, va fer que el propi personatge lluités contra el que representava amb les seves pròpies armes, convertint una persona nihilista i sense escrúpols en un heroi filantrop. En certa manera, per a Stan Lee, Iron Man va ser una eina que li va servir per explorar el rol de la tecnologia estatunidenca per lluitar contra el comunisme durant la Guerra Freda.

Els còmics del personatge i les seves pel·lícules expliquen que Tony és ferit per una bomba i segrestat per un grup de terroristes que volen armament d’Stark Industries⁴. Llavors, Stark desperta en una cova on el terrorista Wong-Chu li explica que té metralla en el seu pit (molt a prop del cor) i que si no obeeix les seves ordres morirà. Wong-Chu obliga a Tony Stark a crear armes per a ell i li ofereix tot el material necessari. Tot seguit, Stark, amb l’ajuda d’un altre presoner anomenat Yinsen, crea una màquina generadora d’energia (a les pel·lícules, un reactor nuclear⁵) que manté la metralla allunyada del seu cor creant un camp electromagnètic i idea un pla per escapar del captiveri gràcies a una armadura

⁴ Empresa de ficció en el món de Marvel que es dedica al desenvolupament de tecnologia avançada. És dirigida per Tony Stark i va ser fundada pel seu pare Howard Stark.

⁵ En els còmics, Iron Man no ha tingut mai cap reactor nuclear sinó que en els seus inicis tenia una màquina generadora d’energia que mantenia allunyada la metralla del seu cor. Això sí, l’any 2008 (quan va sortir la primera pel·lícula d’Iron Man) els guionistes van trobar més adequat (pel que fa als coneixements científics i populars del moment) introduir un reactor nuclear, la tecnologia de reactors més avançada del moment.



*Imatge 2: Tony Stark posant-se l'armadura i el reactor amb l'ajuda de Yinsen.
Font: Marvel Studios
(Imatge extreta de la pel·lícula Iron Man (2008) de Marvel).*

feta per ell mateix amb els materials dels terroristes. Aquesta armadura aprofita l'energia de la màquina/reactor (que es troba al pit de Stark) per poder volar i llençar míssils. Gràcies a aquesta invenció Tony Stark aconsegueix escapar-se i convertir-se, posteriorment, en Iron Man amb el propòsit de lluitar contra el mal (personificat per enemics comunistes).

2.2. Habilitats del personatge:

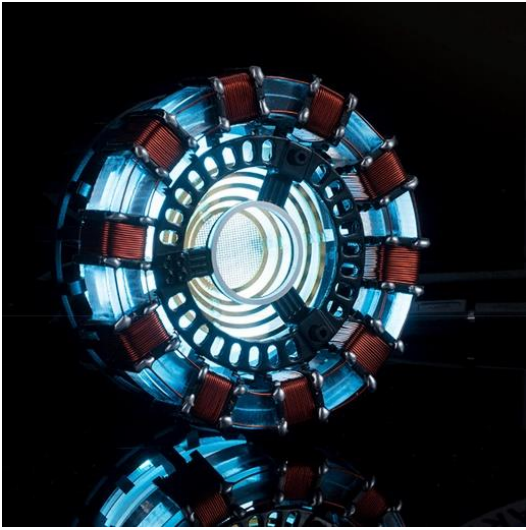
Les habilitats més característiques d'Iron Man són les que li concedeix la seva armadura. Aquestes habilitats són la força sobrehumana, una gran resistència i durabilitat a condicions extremes, l'aptitud de volar i la capacitat d'utilitzar un gran assortiment d'armes. Per descomptat, l'armadura també és a prova de bales i explosius.

El casc, una part molt important de la seva armadura, li permet obtenir visió tèrmica, control de les seves constants vitals, informació de reconeixement militar i dades referents a l'entorn (temperatura, clima...). Tota aquesta informació es mostra a partir d'hologrames⁶ projectats en el interior del casc.



*Imatge 3: Pantalla hologràfica de l'interior del casc d'Iron Man.
Font: Marvel Studios
(Imatge extreta de la pel·lícula The Avengers (2012) de Marvel).*

⁶ Imatge òptica tridimensional basada en la utilització de la llum.



A les pel·lícules, un altre punt clau de la seva armadura és el reactor nuclear, anomenat “Reactor ARC”, que proporciona energia amb un alt grau d’eficiència sense haver d’estar connectat a cap xarxa d’alimentació (externa a l’armadura). A més a més, s’esmenta que el reactor necessita pal·ladi⁷.

Imatge 4: Model del “Reactor ARC” utilitzat a la pel·lícula *Iron Man* (2008).

Font: Blue Maize

<http://www.bluemaize.net/boys-jewelry/reactor-arc>

D’altra banda, una de les habilitats per la que més destaca Tony Stark és la seva intel·ligència que li permet ser un prodigi en enginyeria mecànica i ciència però que també s’estén al seu notable enginy davant de situacions incertes.

A més a més, en els còmics, Tony Stark té uns altres poders que no es relacionen amb l’armadura, sinó que provenen d’un sèrum anomenat Virus Extremis.

Gràcies al Virus Extremis, el cos de Tony Stark no rebutja els objectes que s’implanta en ell mateix i pot incrustar-se una armadura interna dins del seu cos. Aquesta armadura, que funciona com si fos un segon esquelet i està sincronitzada amb el seu cervell, s’anomena armadura Extremis i es connecta a l’armadura externa. D’aquesta manera pot tenir un millor control de l’armadura a través d’impulsos nerviosos. A més a més, el virus permet millorar el temps d’acció-reacció del propi Stark i obtenir la capacitat de regeneració, és a dir, el fet de poder curar-se d’una manera ràpida i efectiva.

En el cas de les pel·lícules, el personatge no té els poders sobrehumans que li concedeix el virus, per tant, en l’anàlisi de les escenes del personatge no es tindran en compte.

⁷ Element químic amb nombre atòmic 46 i símbol Pd que pertany al grup de metalls de transició i s’assembla químicament al platí.

3. TECNOLOGIA I FÍSICA APLICADES A IRON MAN

A continuació es proposen diverses qüestions que relacionen la tecnologia i la física actual amb el personatge d'Iron Man.

1. El "Reactor ARC" d'Iron Man és producte de la ficció o té una base científica?
2. En el cas de que existís l'armadura i el reactor, podria sobreviure un humà a dintre l'armadura quan aquesta es trobés en funcionament?

Per donar resposta a aquestes preguntes es segueix aquesta estructura:

- a) Anàlisi de la filmografia.
- b) Antecedents i investigacions científiques prèvies.
- c) Estudi pràctic/comparatiu.
- d) Conclusió.

3.1. El "Reactor ARC" d'Iron Man és producte de la ficció o té una base científica?

3.1.1. Anàlisi de la filmografia.

En aquest apartat s'analitzen aquelles pel·lícules de Marvel de les quals se'n pot extreure informació del reactor d'Iron Man. Les pel·lícules estudiades són: *Iron Man* (2008) i *Iron Man 2* (2010).

Iron Man (2008):

- 24:10* – Stark diu que necessita pal·ladi per a construir el reactor.
- 25:10 – Es pot visualitzar que el reactor que s'està construint tindrà forma d'anell (imatge filmogràfica 1).
- 25:23 – Escena en que es pot apreciar l'altura i diàmetre del reactor (imatge filmogràfica 2).⁸

*L'enumeració esquerra correspon al minut i segon on s'inicia la seqüència de la pel·lícula en que s'extreu la informació de la dreta.

⁸Aquestes mesures es calculen posteriorment.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

- 25:40 – Es comenta que el Reactor ARC és una rèplica en miniatura d'un reactor més gran que s'utilitza industrialment a Stark Industries.
- 25:54 – S'esmenta que el reactor té una potència de 3 GW.
- 26:55 – Es veu com el reactor produeix una llum blanca-blava (Imatge filmogràfica 3).
- 47:14 – Escena en que es pot veure el reactor gran de Stark Industries (Imatge filmogràfica 4).
- 47:28 – Es diu que el "Reactor ARC" original (el gran) no és rentable i que la tecnologia no té sentit. Tot i això, Stark explica que ell ha aconseguit progressar en aquesta tecnologia al crear la rèplica en miniatura.
- 50:42- Es canvia el reactor creat a la cova per un de més sofisticat (però que té la mateixa forma i funcionament).
- 62:33 – Escena en que es pot comparar l'alçada d'Iron Man amb el diàmetre del reactor i observar que no hi ha presència de cables que condueixin energia des de l'exterior de l'armadura al reactor (Imatge filmogràfica 5).
- 108:03 – Es diu que al reactor li queda un 13% d'energia.

Iron Man 2 (2010):

- 19:02 – Stark canvia el nucli de pal·ladi del reactor i es veu com aquest està danyat/desgastat (Imatge filmogràfica 6).
- 19:18 – S'explica que l'ús de pal·ladi al reactor està lentament enverinant a Stark.
- 48:42 – Es parla de que el desgast del pal·ladi és causat per danys neutrònics a la paret del reactor i es veu com la peça de pal·ladi del centre del reactor és canviat per una d'altra (Imatge filmogràfica 7).
- 74:48 – Escena en que es pot veure clarament (una altra vegada) que el reactor produeix una llum blavosa (Imatge filmogràfica 8).
- 83:25 – Stark descobreix un nou element.
- 85:46-87:21 – Tony materialitza el nou element gràcies a un accelerador de partícules creat per ell mateix a casa seva utilitzant llibres i objectes per anivellar els tubs (Imatges filmogràfiques 9 i 10).

A partir d'aquest punt, el reactor funciona sempre amb aquest nou element. Com que aquest element no existeix a la nostra realitat, l'anàlisi de la filmografia no s'estén a les pel·lícules posteriors. Això sí, posteriorment es determinarà si és possible crear nous elements amb aquests acceleradors.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

Les imatges extretes de la pel·lícula són les següents (totes les imatges són extretes directament de les pel·lícules de Marvel, per tant, la font és “Marvel Studios”):



Imatge filmogràfica 1



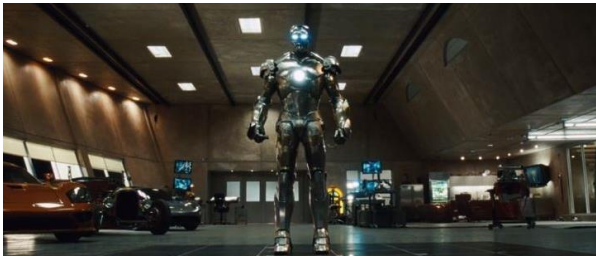
Imatge filmogràfica 2



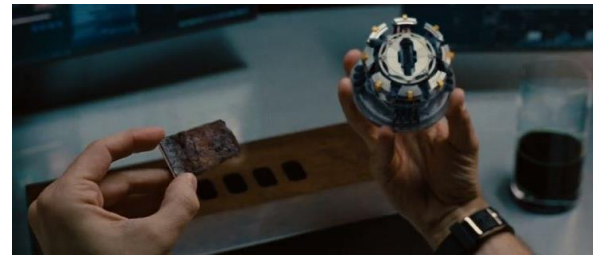
Imatge filmogràfica 3



Imatge filmogràfica 4



Imatge filmogràfica 5



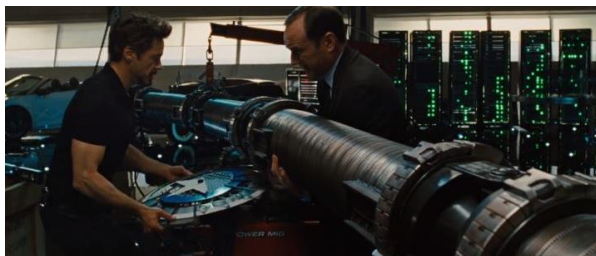
Imatge filmogràfica 6



Imatge filmogràfica 7



Imatge filmogràfica 8



Imatge filmogràfica 9



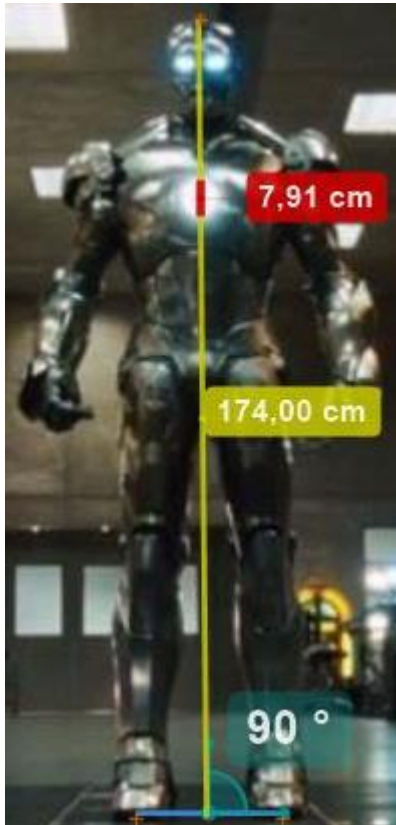
Imatge filmogràfica 10

Per tal d'obtenir el diàmetre i l'altura del reactor s'executa el programa Kinovea. Amb aquest programa es pot relacionar diferents mides en una fotografia quan

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

els objectes són paral·lels a la càmera i es troben a la mateixa distància així que la perspectiva no augmenta/disminueix la seva proporció.

Per tant, per poder calcular les mides del reactor s'ha d'agafar com a referència una mesura ja coneguda. En aquest cas la mesura és l'altura de Robert Downey Jr. (l'actor que interpreta a Tony Stark) que és de 174 cmⁱ.

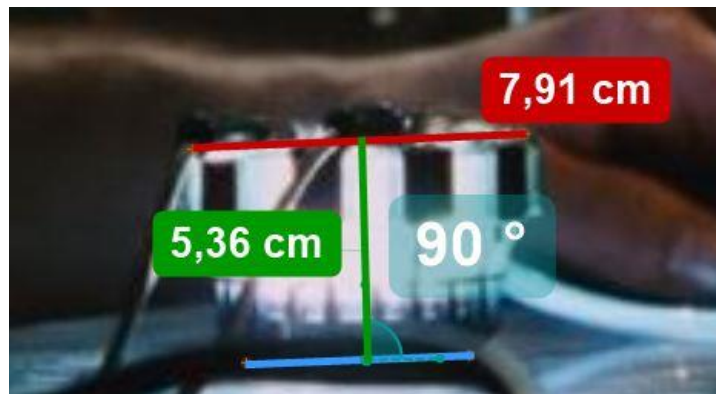


Imatge 5: Càlcul del diàmetre del reactor.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)

A la imatge filmogràfica 5 es relaciona aquesta altura amb el diàmetre del reactor:

La imatge de l'esquerra demostra que el reactor té un diàmetre aproximat de 7.91 cm. A partir d'aquesta mesura i la imatge filmogràfica 2 es pot calcular l'altura del reactor.

Finalment, a la imatge de baix, es pot determinar que l'altura del reactor és de 5.36 cm.



Imatge 6: Càlcul de l'altura del reactor.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)

Aquest reactor té dues parts diferenciades: el centre i l'anell. El diàmetre de la part central del reactor es pot calcular a partir del diàmetre i la imatge filmogràfica 8. Aquesta mesura és 4.01 cm i es pot apreciar a la imatge següent:



Imatge 5: Càlcul del diàmetre central del reactor.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)

A partir de totes aquestes dades es pot calcular el volum de la part central del reactor i el volum de l'anell. Com es pot veure el reactor té forma cilíndrica i el volum d'un cilindre es calcula amb la fórmula següent:

$$V_C = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Per tant, el volum de la part central serà aquest:

$$r = \frac{\emptyset}{2} \rightarrow r = \frac{4.01 \text{ cm}}{2} = 2.005 \text{ cm}$$

$$V_{\text{Centre}} = \pi \cdot 2.005^2 \cdot 5.36 = 67.69 \text{ cm}^3$$

En canvi, el volum de l'anell és la diferència entre el volum total del reactor i el volum central:

$$r = \frac{\emptyset}{2} \rightarrow r = \frac{7.91 \text{ cm}}{2} = 3.955 \text{ cm}$$

$$V_{\text{Reactor}} = \pi \cdot 3.955^2 \cdot 5.36 = 263.4 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Anell}} = V_{\text{Reactor}} - V_{\text{Centre}} \rightarrow V_{\text{Anell}} = 263.4 \text{ cm}^3 - 67.69 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{Anell}} = 195.71 \text{ cm}^3$$

Els diferents volums serien els següents: 263.4 cm³ el reactor, 67.69 cm³ la part central i 195.71 cm³ la part de l'anell.

En canvi, pel que fa al reactor més gran no se'n poden obtenir les mides ja que no hi ha cap mesura de referència que es trobi a la mateixa distància que el reactor (a la imatge filmogràfica 4, Tony Stark i Obadiah Stane estan situats més a prop de la càmera que el reactor).

Amb tot l'anàlisi realitzat es poden determinar les següents característiques del "Reactor ARC":

- És un reactor nuclear; ja que es parla de danys neutrònics a les parets del reactor i, per tant, es dedueix que el reactor produeix reaccions que modifiquen el nucli atòmic.
- Té forma d'anell.
- Mesura 7.91 cm de diàmetre i 5.36 cm d'altura. En canvi, el diàmetre central és de 4.01 cm.
- El reactor té un volum total de 263.4 cm³, la part central és de 67.69cm³ i l'anell fa 195.71 cm³.

- Genera una potència de 3 GW.
- És una rèplica en miniatura millorada d'un reactor més gran que no és del tot rentable.
- D'alguna manera utilitza el pal·ladi, que és col·locat just al mig del reactor. Aquest es desgasta pels danys neutrònics i cal reemplaçar-lo.
- Emet una llum blavosa.
- El reactor no està connectat a cap xarxa que no estigui a l'armadura.
- Funciona amb una mena de combustible; ja que en un moment de la primera pel·lícula s'esmenta que al reactor li queda un 13% d'energia i, per tant, es dedueix que la font d'energia es consumeix i el reactor ha de ser abastit constantment.
- És millorat amb la utilització d'un nou element creat amb un accelerador de partícules "casolà".

3.1.2. Antecedents i investigacions científiques prèvies.

El segon apartat de la Qüestió 1 es centra en:

- Descriure els diferents tipus de reaccions nuclears.
- Explicar la relació entre el pal·ladi i els reactors nuclears.
- Indicar què pot provocar la llum blavosa.
- Explicar què és un accelerador de partícules.

Quines són les diferents reaccions nuclears?

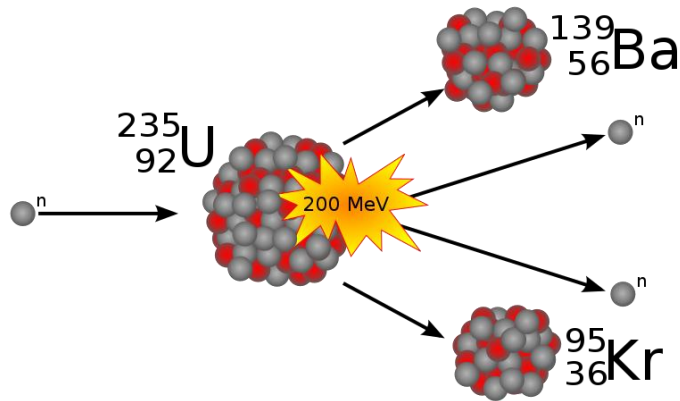
Les reaccions nuclears engloben tots els processos que combinen o modifiquen un o més nuclis atòmics. Aquesta modificació pot ser causada per fissió, fusió, desintegració radioactiva natural o transmutació artificial. A les reaccions en que es produeix una pèrdua de massa s'hi origina una gran quantitat d'energia determinada segons la famosa fórmula proposada per Einstein $E = m \cdot c^2$ en la que "E" és l'energia, "m" la massa perduda i "c" la velocitat de la llum.

Les **reaccions de fissió** són aquelles en que un nucli atòmic pesant és divideix en dos o més nuclis més lleugers i diferents partícules subatòmiques⁹, que poden ser neutrons o fotons. Aquest reacció pot arribar a ser molt exotèrmica¹⁰, per aquest motiu, es poden aprofitar per generar energia elèctrica a les centrals nuclears de fissió.

⁹ Unitats bàsiques constituents de la matèria que per si soles no conserven les propietats dels elements químics. Les partícules subatòmiques que formen els àtoms són els protons, els neutrons i els electrons.

¹⁰ Que desprèn energia en forma de calor.

En aquestes centrals, les reaccions de fissió són generades a partir de fer bombardejar un nucli atòmic (normalment d'urani¹¹) amb un neutró dins del vas del reactor¹² (aquesta primera fissió es produeix gràcies a una font de plutoni¹³-beril·li¹⁴ o californi¹⁵ que produeix de manera contínua neutrons). El nucli inicial és dividit en dos alliberant calor (en forma de radiació gamma¹⁶) i neutrons que, al seu torn, trenquen més nuclis generant així una reacció en cadena.

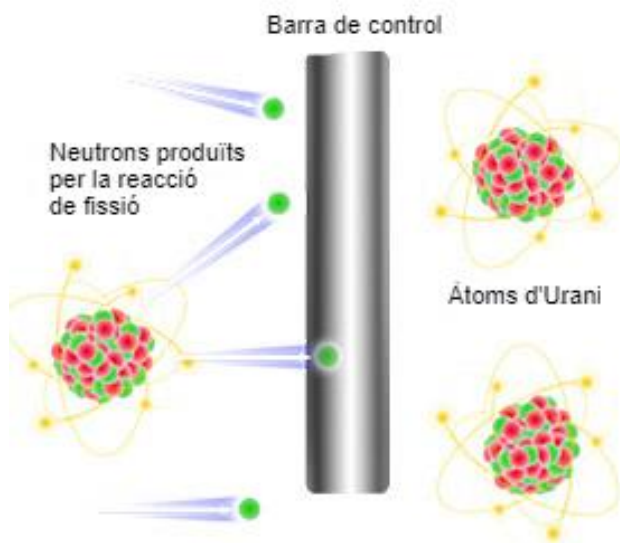


Imatge 6: Reacció de fissió de l'Urani-235 que resulta en Bari-139 i Criptó-95.

Font: conteudoseducar

<http://www.conteudoseducar.com.br/conteudos/arquivos/3420.pdf>

Aquesta reacció en cadena ha d'estar controlada ja que la majoria de fissions alliberen de 2 a 3 neutrons lliures. Per a controlar la reacció de manera sostinguda només s'ha de permetre xocar a un d'aquests neutrons amb un altre àtom. Si el nombre de neutrons lliures que col·lisionen per cada reacció és major a 1, llavors, la reacció augmentarà de forma exponencial i provocarà una explosió atòmica (descontrolada). En canvi, si cap neutró lliure xoca amb un altre àtom la reacció s'aturarà. Perquè cap d'aquests dos últims escenaris tingui lloc, els reactors nuclears de fissió tenen incorporades unes barres de control. Aquestes barres estan fetes de materials que absorbeixen neutrons i permeten augmentar, disminuir o aturar el nombre de reaccions que es produeixen en el vas del reactor.



Imatge 7: Representació del funcionament de les barres de control.

Font: Pròpia (Imatge de "FEMA Emergency Management Institute" modificada)

https://emilms.fema.gov/IS3/FEMA_IS/is03/REM0402110.htm

¹¹ Element químic amb nombre atòmic 92 i símbol U que consta de diferents isòtops molt radioactius.

¹² Recipient en que es produeixen i controlen les reaccions de fissió a les centrals nuclears.

¹³ Element químic amb nombre atòmic 94 i símbol Pu. És un metall blanc platejat, tòxic i radioactiu.

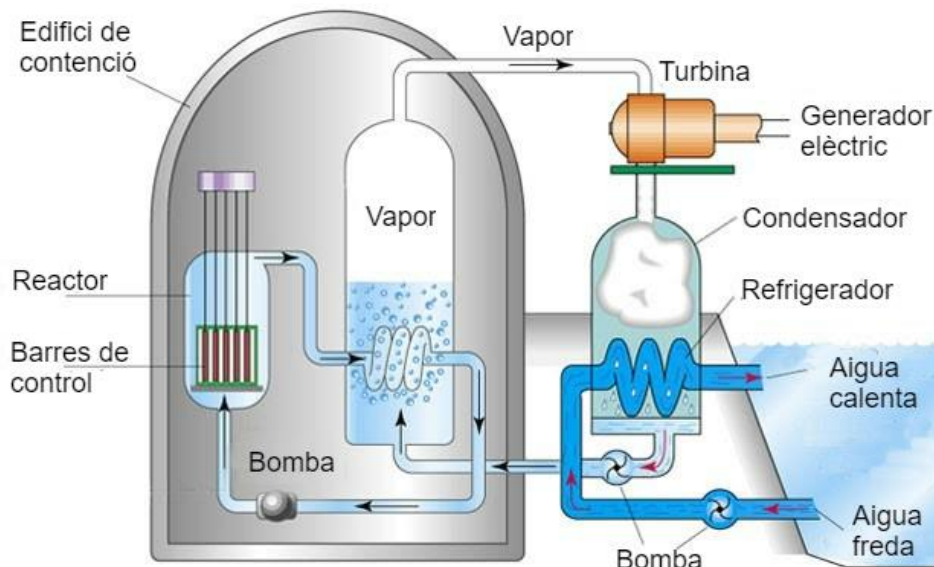
¹⁴ Element químic amb nombre atòmic 4 i símbol Be que s'utilitza com a enduridor d'aliatges.

¹⁵ Element químic amb nombre atòmic 98 i símbol Cf. És un metall radioactiu.

¹⁶ Radiació electromagnètica molt penetrant.

A més a més, els reactors de fissió disposen d'un sistema de control de temperatura que introdueix més o menys les barres de control en funció de la temperatura del vas del reactor (el nombre de fissions són directament proporcionals a la temperatura). Generalment, les barres de control estan fetes amb aliatges de bor¹⁷, hafni¹⁸ i cadmi¹⁹.

L'energia calorífica generada a partir de les diferents reaccions controlades en el vas del reactor és extreta cap a fora amb l'escalfament d'uns tubs plens de fluid. Aquests tubs passen pel generador de vapor on l'aigua és escalfada fins a evaporar-se. Més tard, el vapor d'aigua acciona una turbina connectada a un generador elèctric i finalment el vapor d'aigua és condensat a partir de tubs refrigeradors.



Imatge 8: Parts d'una central nuclear de fissió.

Font: Pròpia (Imatge de "Aprende Con Energía" modificada)

<https://www.aprendeconenergia.cl/usos-de-la-energia-nuclear/>

Les centrals nuclears de fissió existeixen des de 1951 i són el tipus de centrals nuclears més desenvolupades i utilitzades. Actualment, l'any 2019 hi ha més de 450 centrals nuclears de fissió operatives i aproximadament 50 en construcció, repartides en un total de 30 països. A Espanya hi ha 5 centrals nuclears operatives, dues de les quals es situen a Ascó i a Vandellós (Tarragona). La central d'Ascó té dos reactors diferents i la de Vandellós només en té un ja que un d'ells es va tancar per culpa d'un accident l'any 1989.

La potència que genera cada un dels reactors és:

- Ascó I – 1032.5 MWⁱⁱ
- Ascó II – 1027.2 MWⁱⁱ
- Vandellós I – 480 MW (tancat)ⁱⁱⁱ
- Vandellós II – 1087 MWⁱⁱ

¹⁷ Element químic amb nombre atòmic 5 i símbol B. És un semimetall semiconductor.

¹⁸ Element químic amb nombre atòmic 72 i símbol Hf. És un metall de transició gris-platejat.

¹⁹ Element químic amb nombre atòmic 48 i símbol Cd. És un metall blanc blavós poc abundant.

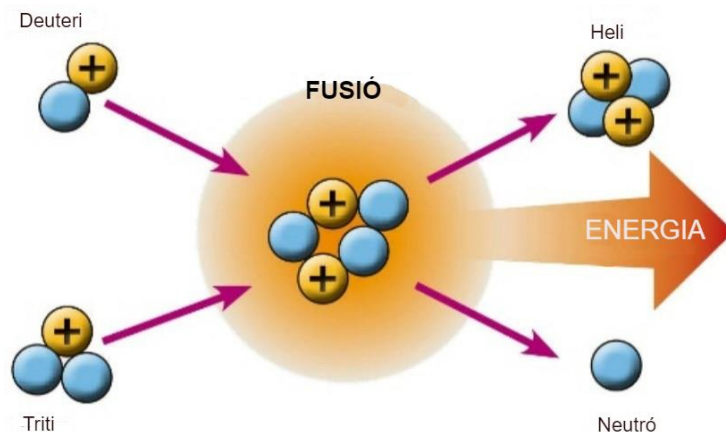
Les **reaccions de fusió** són aquelles que es basen en la unió de les partícules subatòmiques del nucli de dos àtoms. Per tant, els nuclis lleugers passen a ser nuclis més pesants. Aquest tipus de reacció es produeix espontàniament al Sol i a les altres estrelles.

La dificultat de dur a terme les reaccions de fusió recau en el fet de que cal una gran quantitat d'energia per iniciar-les (excepte en els reactors hipotètics de fusió freda²⁰) ja que els nuclis tenen una càrrega elèctrica positiva i es repel·leixen a l'acostar-se. Per això, les repulsions només es poden vèncer quan les partícules tenen una energia cinètica²¹ molt elevada.

Per aconseguir els nivells d'energia cinètica ideals, les partícules s'han d'escalfar aproximadament a 10^8 °C^{iv}. El problema és que en aquestes condicions els electrons i els nuclis dels àtoms es troben en forma de plasma²² que sobreescalfa el reactor si no es controla. Per fer-ho, la solució tecnològica més viable és confinar el plasma per l'interior de potents camps electromagnètics.

Aquest tipus de reaccions han estat realitzades diverses vegades en alguns reactors de forma experimental però l'energia de sortida (energia procedent de la fusió dels nuclis) ha estat menor que la d'entrada (energia utilitzada per augmentar la temperatura i contenir el plasma). Per aquest motiu, els reactors de fusió encara no estan suficientment desenvolupats per a entrar al món de la indústria. Actualment no hi ha cap reactor nuclear de fusió que estigui en funcionament ja que els únics existents estan sota estudi i construcció. Un dels més importants és el reactor de fusió del projecte ITER²³.

Aquest reactor es basa en fer col·lisionar un deuteri²⁴ i un triti²⁵ per a combinar-los en un àtom. Al fer-ho, es produeix una reacció que produeix heli-4 (partícula alfa) i un neutró lliure. La suma d'heli i neutró té menys massa que la suma de deuteri i triti, per tant, la massa perduda és convertida en



Imatge 11: Fusió del Deuteri i el Triti.

Font: Pròpia (Imatge de "Energia Nuclear" modificada)

<https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/fusio-nuclear>

²⁰ Explicats posteriorment.

²¹ Energia que té un cos pel fet d'estar en moviment (a més velocitat més energia cinètica).

²² Estat de la matèria que es basa en un conglomerat que conté àtoms ionitzats positivament i electrons lliures. En una escala de temperatura, el plasma és superior a l'estat gasós.

²³ Sigles de "International Thermonuclear Experimental Reactor" (Reactor Termonuclear Experimental Internacional).

²⁴ Isòtop d'hidrogen amb nombre màssic 2.

²⁵ Isòtop d'hidrogen amb nombre màssic 3.

energia cinètica (17.59MeV^v).

Quan aquesta fusió hagi estat produïda en el reactor, els nuclis d'heli resultants (que tenen una càrrega elèctrica produïda per la ionització del plasma) romandran atrapats en el plasma gràcies als camps electromagnètics. Aquest fet ajudarà a l'escalfament continu del reactor. Això sí, l'energia continguda pels nuclis d'heli representa només un 20% de l'energia total despresa en la fusió. El 80% restant es troba en els neutrons lliures que, com que no tenen càrrega elèctrica, podran portar l'energia fora del plasma sense ser afectats pels camps electromagnètics. Aquests neutrons seran absorbits per les parets del reactor on la seva energia cinètica serà transferida a l'estructura transformant-se en energia calorífica.

En el cas de l'ITER, aquesta calor serà capturada per uns conductes d'aigua situats a les parets exteriors del reactor i es crearà vapor d'aigua. Finalment, aquest vapor passarà a generar electricitat a partir de la seva circulació per turbines i alternadors.

La història d'aquest reactor nuclear té el seu inici durant la dècada del 1950, quan els russos Igor Tam i Andrei Sàkharov, dos investigadors de l'Institut d'Energia Atòmica de l'Acadèmia de Ciències de l'URSS, van crear el Tokamak, un disseny d'una cambra de forma toroidal²⁶ amb bobines magnètiques que tenia l'objectiu d'obtenir la fusió de les partícules del plasma.

Més tard, el 24 de maig de l'any 2006, la Unió Europea, Japó, Estats Units, Corea del Sud, Índia, Rússia i Xina van signar el projecte ITER, que acordava internacionalment construir un reactor de fusió amb el disseny Tokamak a Cadarache, França. Les diverses nacions van indicar que el reactor seria de 6.2m^{iv} de radi, que faria 13 m^{iv} d'altura i que arribaria a pesar 23000 tonelades^{iv}.

L'any 2016 es va aprovar la nova planificació del projecte: controlar el primer conglomerat de plasma (2025) i operar per primera vegada amb deuteri i triti (2035). A partir de l'any 2018 es va començar a construir l'estructura de l'edifici principal i el juliol de 2019 es va instal·lar la primera part del criòstat²⁷ i es va començar a preparar la instal·lació del Tokamak.

Aquest reactor de fusió generarà 500 MW^{iv} de potència i en consumirà 50 MW^{iv}. Això comporta que la producció neta seria de 450 MW, un 43% de la potència mitjana dels reactors de fissió a Espanya (1050 MW). El reactor podrà operar de manera contínua durant 20 minuts^{iv}.

Segons l'ITER, els reactors de fusió seran les centrals elèctriques més eficients del futur ja que fusionar àtoms d'una manera controlada genera 4 vegades més

²⁶ (Toroide) Forma geomètrica tridimensional generada al traslladar un cercle al llarg d'una trajectòria corba tancada. Els anells i els pneumàtics tenen una forma toroidal.

²⁷ Aparell utilitzat per mantenir mostres o altres aparells a temperatures de criogenització baixes.

energia que la fissió d'àtoms o 4 milions de vegades més energia que les reaccions químiques com, per exemple, la combustió del carbó.

Altres avantatges dels reactors de fusió són:

- La manca d'emissió de diòxid de carboni a l'atmosfera.
- La (gairebé) inesgotabilitat dels combustibles nuclears emprats ja que el deuteri pot ser destil·lat de gairebé totes les formes d'aigua i el triti és generat durant la reacció de fusió quan els neutrons interaccionen amb el liti²⁸.
- L'absència de residus radioactius.
- La impossibilitat de produir-se una explosió ja que, a diferència dels reactors de fissió que generen una reacció en cadena i poden donar lloc a una explosió, si és perdés el control del plasma aquest únicament es refredaria sense provocar cap reacció explosiva.
- La incapacitat d'explotar els estudis sobre la tecnologia de les reaccions de fusió (com les de l'ITER) per a la creació d'armes nuclears/radioactives.
- A la llarga, amb més estudis, la sortida d'energia en els reactors i el seu preu serà semblant a la dels reactors de fissió, tot i que, a l'inici, aquest preu serà més elevat.

Com ja s'ha esmentat abans, les reaccions de fusió utilitzades en aquest tipus de reactors podrien no ser les úniques reaccions de fusió. Hipotèticament, fa uns anys, alguns científics com Pons o Fleischmann pensaven que les reaccions de fusió es podrien arribar a produir a pressions i temperatures atmosfèriques (sense la necessitat de produir plasma a partir d'un descomunal escalfament del material nuclear). Aquest tipus de reaccions van ser anomenades "fusió freda".

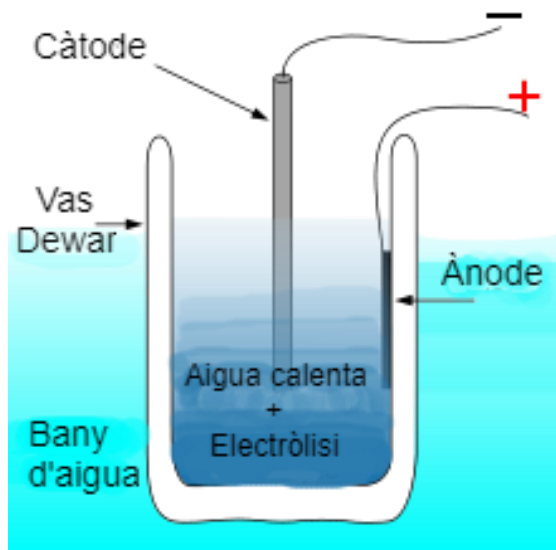
Un tipus de suposada fusió freda és la fractofusió, que consisteix en la fusió d'un deuteri i d'un triti atrapats en l'estructura d'un material (aquesta fusió produeix heli, un neutró lliure i energia cinètica). Suposadament, la fusió es duu a terme gràcies a les elevades pressions i camps elèctrics que es poden produir durant la fractura del material. Generalment, es considerava el pal·ladi, el platí²⁹ o el titani³⁰ com a materials possibles. Aquest tipus de reacció és una teoria hipotètica i no ha estat demostrada.

²⁸ Element químic amb nombre atòmic 3 i símbol Li considerat el metall més lleuger i l'element sòlid menys dens.

²⁹ Element químic amb nombre atòmic 78 i símbol Pt. És un metall de transició pesat, mal·leable i dur.

³⁰ Element químic amb nombre atòmic 22 i símbol Ti. És un metall de transició abundant en l'escorça terrestre.

El 23 de març de 1989 Stanley Pons i Martin Fleischmann, químics a la Universitat de Utah, van anunciar que havien realitzat una reacció de fusió freda.



Imatge 12: Esquema de la cel·la electrolítica que suposadament permet la fusió freda.

Font: Pròpia (Imatge de "American Society of Mechanical Engineers" modificada)
<https://www.asme.org/topics-resources/content/cold-fusion-25-years-later>

Aquesta reacció es basava en fusionar dos deuteris (que es troben en un recipient d'aigua pesada³¹) gràcies a un càtode³² de pal·ladi i l'electròlisi³³. Al cap d'uns dies, un gran nombre de científics de tot el món van intentar repetir els resultats dels experiments de Pons i Fleischmann però no ho van aconseguir. A finals de maig d'aquell mateix any el Departament d'Energia dels Estats Units va formar un grup d'investigadors per determinar la veracitat o falsedat de la fusió freda. El comitè va afirmar que no existia cap evidència d'aquest tipus de fusió i que la teoria d'aquesta contradeia tot el coneixement sobre les reaccions nuclears obtingut durant els últims anys.

Durant les dues últimes dècades, el nombre de científics que recolzen la teoria de la fusió freda han disminuït enormement, fins al punt, que la ciència hagi gairebé descartat aquesta possibilitat. Aquest fet es deu a que la ciència afirma de manera irrefutable que el deuteri i triti han d'estar a una distància gairebé inexistent per ser fusionats (amb grans pressions o temperatures com en el Sol i les altres estrelles).

L'any 2015, un grup de 30 científics dirigit per Curtis Berlinguette i finançat per Google va començar una recerca de 4 anys sobre aquest tema. El 27 de maig del 2019, els resultats van ser publicats a la revista *Nature* sota l'article "Revisiting the cold case of cold fusion". Aquest estudi es basava en intentar demostrar els experiments de Pons i Fleischman però van obtenir el mateix resultat que els altres científics: el grup no va poder arribar a les condicions materials especulades com a més favorables per realitzar la fusió freda. Això sí, a l'article de *Nature* deixen molt clar que la fusió freda és tan complexa que encara podria estar pendent de ser trobada. "Tot i que aquesta possibilitat s'està tornant cada vegada més remota" reconeixen.

³¹ Molècula de composició química semblant a l'aigua en la que els dos àtoms de proti són substituïts per dos deuteris. També s'anomena òxid de deuteri i la seva fórmula química és D₂O o ²H₂O.

³² Conductor elèctric pel qual arriben els electrons (pol positiu).

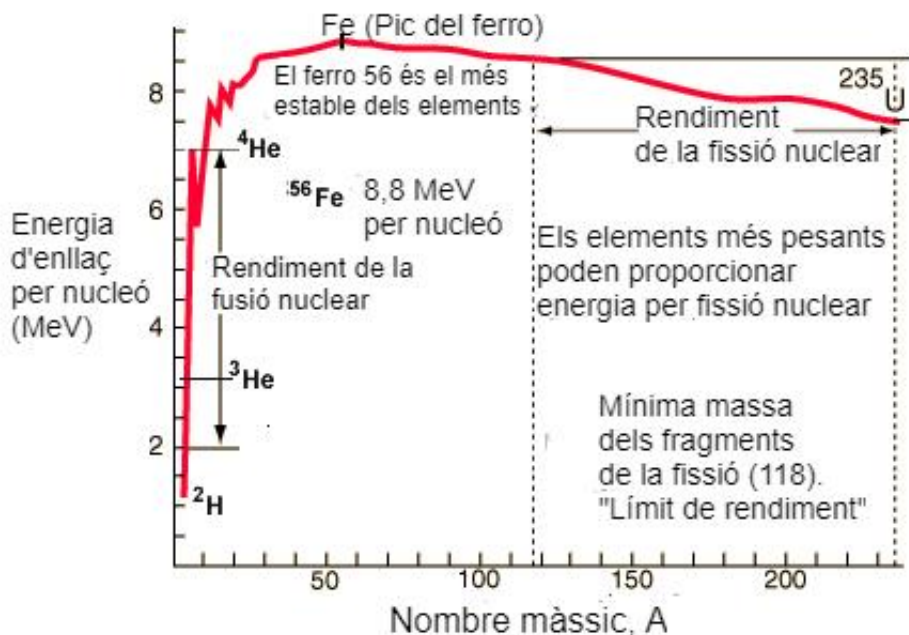
³³ Mètode que utilitza el corrent elèctric per provocar reaccions no espontànies d'elements que formen un compost.

En els antecedents anteriors s'expliquen les reaccions de fissió i fusió i els seus respectius reactors. Ara bé, no tots els elements poden ser fissionats o fusionats i al seu torn, poder treure'n un benefici energètic. Aquest fet es deu a l'estabilitat de cada àtom i l'energia d'enllaç³⁴ per nucleó³⁵.

L'estabilitat que té un nucli és la tendència a mantenir-se enllaçat (no "trencar-se"), és a dir, el fet que l'energia d'enllaç sigui prou estable perquè no produeixi la seva separació (fissió nuclear). En el cas dels nuclis d'elements químics més petits, l'estabilitat es relaciona amb la tendència a no "enganxar-se" amb altres nuclis (fusió nuclear).

L'energia necessària per provocar la fissió és la mateixa (en sentit contrari) que l'energia d'enllaç. Per tant, només es pot extreure un benefici energètic quan l'energia d'enllaç és inferior a l'energia obtinguda. Com es pot veure a la gràfica posterior, quan la massa atòmica mitjana dels elements resultants és inferior a 118 no es pot obtenir energia (límit de rendiment). Per aquest motiu l'element més utilitzat és l'urani-235.

En canvi, en la fusió nuclear l'energia necessària per ajuntar diferents àtoms és també l'energia d'enllaç ja que aquesta produeix una força repulsiva quan els àtoms estan allunyats. Quan l'energia obtinguda és menor que les d'enllaç es produeix un benefici energètic. Això succeeix quan la massa de l'àtom resultant és menor a les masses inicials. A la gràfica s'observa com els elements més lleugers necessiten una menor energia per a ser fusionats.



Imatge 13: Gràfica que relaciona el nombre màssic amb l'energia d'enllaç per nucleó.

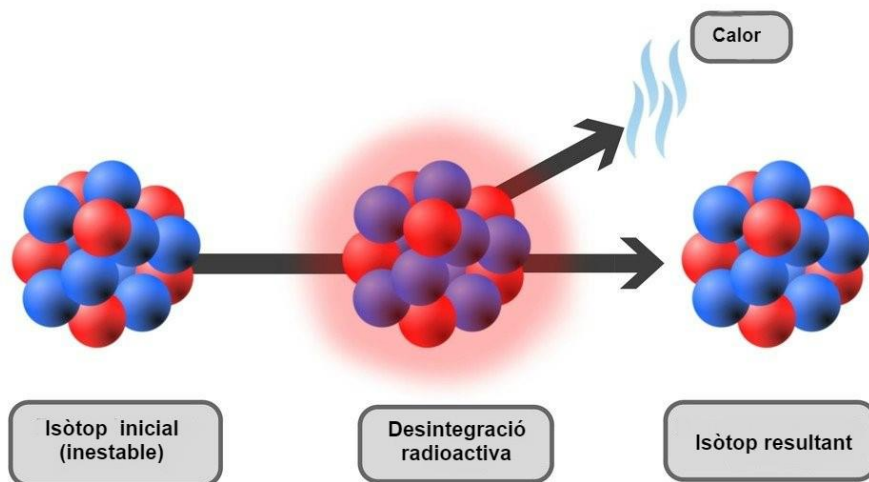
Font: Pròpia (Imatge de "agrega" modificada)

http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/23062017/f7/es-an_2017062312_9120338/7_estabilidad_nuclear.html

³⁴ Energia que uneix els neutrons i protons d'un àtom.

³⁵ Qualsevol de les partícules que componen el nucli atòmic (neutrons i protons).

La **desintegració radioactiva natural** és el procés en que els nuclis radioactius inestables emeten partícules radioactives (radiació³⁶) de manera espontània i decauen (es transformen) en nuclis diferents. Aquest procés és l'origen de la radioactivitat i és la base de gairebé totes les aplicacions de la química nuclear quan aquestes no s'involucren amb la indústria. Cada radionúclid (nucli atòmic inestable) consta d'un període de semidesintegració que determina el temps que transcorre fins que la meitat dels nuclis d'una mostra pura d'un radionúclid determinat decaigui en un altre nucli diferent.



Imatge 14: Procés de desintegració radioactiva natural.
Font: Pròpia (Imatge de "Science ABC" modificada)
<https://www.scienceabc.com/pure-sciences/why-are-certain-elements-radioactive-causes-examples.html>

En certa manera, la desintegració radioactiva és similar a les reaccions de fissió ja que els elements resultants són més lleugers que els elements inicials. Tot i això, la desintegració radioactiva, en comptes de dividir el nucli en dos, transforma l'element en un d'altre. Aquesta desintegració quasi sempre suposa una gran alliberació d'energia en forma de radiació.

Matemàticament, el temps de desintegració d'una quantitat del material es relaciona amb el període de semidesintegració amb la fórmula de la llei de desintegració radioactiva:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

En aquesta fórmula, N representa la quantitat resultant al final de la desintegració (ja pot ser en massa o en percentatge), N_0 és la quantitat inicial (també en massa o percentatge seguint l'anterior), λ és la constant de

³⁶ Emissió d'energia a l'espai en forma d'ones o partícules altament energètiques.

desintegració³⁷ i t és el temps que tarda en desintegrar-se. A partir d'aquesta fórmula es pot deduir que: $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$, on $T_{1/2}$ és el període de semidesintegració.

Tecnològicament, les bateries nuclears o piles atòmiques poden aprofitar aquest fenomen captant les emissions dels radioisòtops (isòtops³⁸ radioactius) per generar electricitat. Aquests dispositius, comparats amb altres bateries, acostumen a ser molt costosos però tenen una vida útil molt llarga i proporcionen una gran densitat d'energia. Per això, generalment, les bateries nuclears són utilitzades en equips que han de funcionar sense poder ser atesos durant llargs períodes de temps, com per exemple satèl·lits i estacions científiques automàtiques a llocs allunyats o remots.

La tecnologia de bateries nuclears va començar l'any 1913, quan Henry Moseley³⁹, a partir de l'experimentació amb partícules beta⁴⁰, va demostrar que es podia obtenir una gran potència elèctrica a partir d'una font radioactiva de radi⁴¹ i va crear així la primera pila atòmica. Els estudis de Moseley van ser aplicats, durant els anys 50 i 60, en usos aeroespacials. Durant els últims anys s'han desenvolupat una gran diversitat de bateries que funcionen de moltes maneres diferents.

Actualment, s'estan desenvolupant bateries nuclears que utilitzen l'energia de la desintegració dels radioisòtops per proporcionar energia durant períodes de 10 a 20 anys. Les diverses tècniques de conversió d'energia es poden agrupar en dos grups: la conversió tèrmica i la conversió no tèrmica. La primera es basa en la utilització d'energia tèrmica per moure electrons en un circuit a partir de generadors termoelèctrics i termoiònics i la segona en extreure una fracció de l'energia quan aquesta es transforma en calor.

Això sí, totes les piles atòmiques utilitzen radioisòtops que produeixen partícules beta de baixa energia o partícules alfa⁴² amb diferents graus d'energia. Les partícules beta de baixa energia ajuden a prevenir la creació de radiació molt penetrant que suposaria la necessitat d'utilitzar blindatges pesants. Ara per ara, només s'han provat els radioisòtops com el triti, níquel-63, prometi-147, curi-242, curi-244 i estronci-90.

La **transmutació artificial** és, essencialment, el contrari de la desintegració radioactiva ja que és un procés no espontani on un element estable és convertit en un altre d'instable a partir del bombardeig amb neutrons o radiació. Aquest

³⁷ Probabilitat de desintegració d'un nucli de l'isòtop indicat en cada unitat de temps.

³⁸ Àtoms amb el mateix nombre atòmic però diferent nombre màssic. És a dir, els nuclis tenen un nombre de neutrons diferents als de l'àtom estàndard.

³⁹ Físic anglès que va fer la justificació quantitativa del concepte del nombre atòmic.

⁴⁰ Electró que surt disparat d'un succés radioactiu.

⁴¹ Element químic amb nombre atòmic 88 i símbol Ra.

⁴² Nucli d'heli (2 neutrons i 2 protons) produït en la desintegració radioactiva.

procés artificial permet, per tant, crear diferents radioisòtops. Per exemple, el pal·ladi-103 és creat a partir del bombardeig de neutrons del pal·ladi-102.

La transmutació artificial augmenta la massa del nucli atòmic, per tant, segons l'equació d'Einstein ja mencionada, aquest procés no produeix energia, sinó que la consumeix.

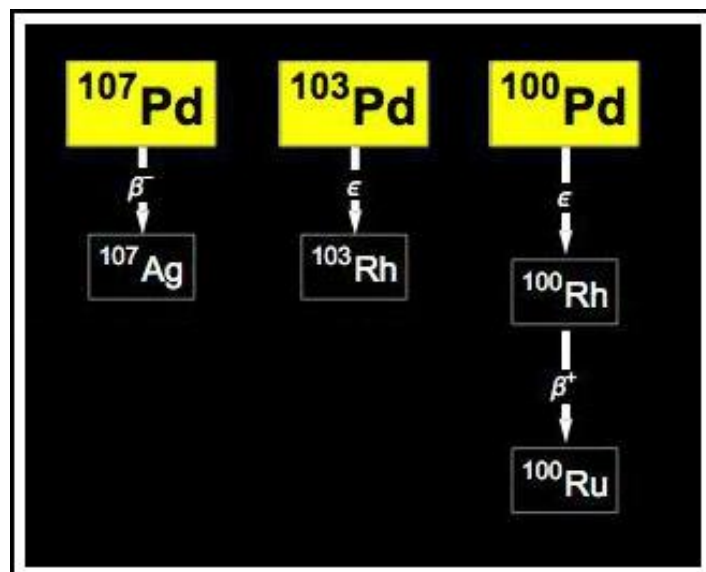
Quina és la relació del pal·ladi amb les reaccions nuclears?

El pal·ladi és un element químic de nombre atòmic 46 situat en el grup 10 de la taula periòdica i amb símbol Pd. Aquest element es considera un metall de transició del grup del platí i les seves característiques principals són: la seva poca duresa, la gran ductilitat i mal-leabilitat i la poca abundància. Generalment s'utilitza en joieria o com a catalitzador⁴³.

La principal relació del pal·ladi amb les reaccions nuclears es basa en la seva capacitat de formar radioisòtops ja pot ser de manera natural o amb transmutació artificial. Els radioisòtops de pal·ladi més estables són el pal·ladi-107, amb un període de semidesintegració de 6.5 milions d'anys^{vi}, el pal·ladi-103, amb un període de semidesintegració de 17 dies^{vi} i el pal·ladi-100, amb un període de semidesintegració de 3.63 dies^{vi}. Els altres 35 radioisòtops^{vi} presenten un període de semidesintegració menor a un dia i una massa atòmica de entre 91 i 128.

El pal·ladi-107 és el segon producte de fissió amb el període de semidesintegració més llarg. Aquest radioisòtop decau en l'argent-107 emetent radiació beta (β)⁴⁴.

En canvi, el pal·ladi-103 decau en rodi-103 a partir de la captura d'electrons⁴⁵ i l'emissió de radiació gamma (γ). És utilitzat en la radioteràpia per eliminar el càncer de pròstata.



Imatge 15: Desintegracions del pal·ladi-107, pal·ladi-103 i pal·ladi-100.
Font: Pròpia (Imatges de "periodictable" modificades)
<https://periodictable.com/Isotopes/>

⁴³ Substància que incrementa la velocitat d'una reacció.

⁴⁴ Radiació formada per electrons de càrrega negativa.

⁴⁵ El període de semidesintegració es basa en la quantitat d'electrons que pot capturar la substància per segon i la disponibilitat d'aquests electrons. Tot i això, quan s'augmenta la quantitat d'electrons al voltant de la mostra aquesta no disminueix el seu període de semidesintegració. En canvi, si aquesta es troba aïllada i no es permet la captura d'electrons la mostra no decau.

Finalment, el pal·ladi-100 decau en rodi-100, també per captura d'electrons, emetent radiació gamma (γ). Tot i això, aquest procés resulta en rodi-100 que decau en ruteni-100 emetent positrons⁴⁶ amb un període de semidesintegració de 20.8h^{vi}.

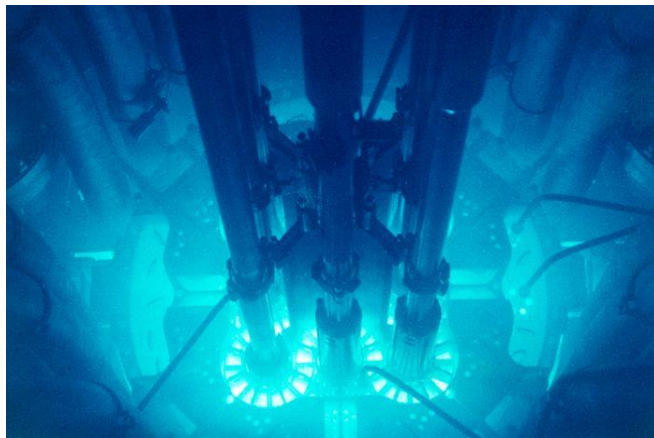
Com ja s'ha esmentat anteriorment, el pal·ladi també es relaciona amb la fusió freda i la fractofusió.

Què provoca l'emissió de llum blava en un reactor?

La llum blavosa procedent d'un reactor nuclear es produeix a partir de l'efecte o radiació Čerenkov.

Aquesta radiació es produeix gràcies a la circulació de partícules carregades elèctricament en un determinat medi a velocitats superiors a la velocitat de la llum (en aquell mateix medi). La velocitat de la llum depèn del medi en que es transmet i arriba al seu màxim valor en el buit, on és impossible superar-la. Tot i això, aquesta velocitat es redueix en entrar en un medi diferent (com ara l'aigua) i, llavors, aquesta sí que pot ser superada.

Aquest efecte rep el seu nom del seu descobridor, Pável Čerenkov, un físic soviètic que va rebre el Premi Nobel l'any 1958 gràcies als seus descobriments relacionats amb aquest efecte.



Imatge 16: Efecte Čerenkov en un reactor nuclear.

Font: Nature

<https://www.nature.com/articles/d41586-019-01430-0>

Aquest tipus d'efecte és un tipus d'ona de xoc que es pot comparar de manera analògica al trencament de la barrera del so quan un objecte arriba a una

⁴⁶ Antipartícula de l'electró. Quan xoca amb aquest, els dos es desintegren generant 2 protons i energia.

velocitat supersònica⁴⁷. En aquest cas, els fronts d'ona⁴⁸ es sobreposen i en formen una amb una forma cònica. Com que la llum també és una ona aquesta pot arribar a presentar un efecte similar.

No obstant, aquesta llum blava també pot ser produïda a causa de la presència del plasma que ionitza les partícules i visualment genera un gran espectre de colors (un d'ells el blau).

Què és un accelerador de partícules?

Un accelerador de partícules és un aparell que utilitza camps electromagnètics per accelerar partícules a altes velocitats i fer-les col·lisionar entre si. D'aquesta manera, es poden arribar a generar una gran quantitat de noves partícules que, generalment, són molt inestables i es destrueixen en menys d'un segon. Per aconseguir crear nous elements i partícules és necessària una gran precisió en l'estructura de l'aparell donat que es treballa amb magnituds micromètriques.

Aquests aparells permeten estudiar més a fons la física de partícules i se'n poden distingir dos tipus diferents: els lineals i els circulars.

En els acceleradors lineals l'augment de la velocitat de les partícules es produeix de manera progressiva a mesura que van travessant una seqüència de camps elèctrics alterns col·locats en línia recta.

En canvi, en els acceleradors circulars les partícules viatgen múltiples vegades (donant voltes) a través d'un circuit circular. Existeixen dues variants: el ciclotró, que va ser el primer model construït, i el sincrotró, que és més modern i permet arribar a energies inaccessibles amb els acceleradors lineals (a mesura que es volen estudiar partícules més petites, l'energia necessària per fer-ho incrementa).

Un exemple d'accelerador de partícules circular és el ALBA, un sincrotró situat a al Parc d'Alba (conegut internacionalment com a *Barcelona Synchrotron Park*), al costat del campus de la Universitat Autònoma de Barcelona, a Cerdanyola del Vallès.

3.1.3. Estudi pràctic/comparatiu.

Aquest apartat es centra en intentar encaixar totes les característiques del Reactor ARC (extretes a les pel·lícules) per determinar si el reactor s'ajusta a algun tipus de reacció nuclear i, per tant, comprovar que té una base científica.

⁴⁷ Que supera la velocitat del so.

⁴⁸ Conjunt de punts de l'espai que comencen o han començat a vibrar/oscil·lar simultàniament quan els ha arribat l'ona, i que per tant, segueixen la mateixa fase de vibració.

A més a més, en cadascun dels apartats s'intenta explicar el funcionament de cada reactor. Per fer-ho, estableixo que les afirmacions extremes de les pel·lícules són inalterables però, per altra banda, em permeto fer afirmacions que no contradiguin les inalterables ni tampoc les establertes de base en cada subapartat (idees que determinen quina reacció es produeix, ex. "El Reactor ARC és un reactor de fissió"). Per exemple, a les pel·lícules no s'esmenta l'ús d'urani com a combustible però tampoc es desmenteix aquesta opció. Per tant, l'afirmació "El Reactor ARC de Fissió utilitza urani com a combustible" no contradiu cap idea anterior.

Finalment, aquelles afirmacions de les pel·lícules que no poden encaixar amb les idees establertes de base s'agrupen al final de cada subapartat i estableixen les característiques que impossibiliten que el Reactor ARC (el de la pel·lícula) utilitzi la reacció definida inicialment.

A més a més, tot i que no es pot estudiar o comparar el segon reactor d'Stark ja que funciona amb un element desconegut, si que es pot determinar si el procés que es segueix per crear el nou element és viable o no.

Reactor ARC de transmutació artificial?

La transmutació artificial és una reacció nuclear que produeix elements amb més massa. Per tant, com s'ha explicat abans, aquest procés no és viable per a funcionar en un reactor ja que segons l'equació d'Einstein $E = m \cdot c^2$ la transmutació artificial no produeix energia, sinó que la consumeix. Per aquest motiu, podem determinar que no pot existir cap reactor que obtingui energia a partir de la transmutació artificial.

Tot i això, aquest procés podria ser utilitzat per Tony Stark però no en el propi reactor. Per exemple, Stark podria utilitzar la transmutació artificial per crear el combustible nuclear (per exemple, crear pal·ladi-103 amb el bombardeig de neutrons al pal·ladi-102).

Finalment, es pot afirmar que l'hipotètic Reactor ARC de transmutació artificial no encaixaria amb la següent afirmació extrema de les pel·lícules:

- L'aparell és un reactor nuclear (no possible perquè no genera energia).

Reactor ARC de fissió?

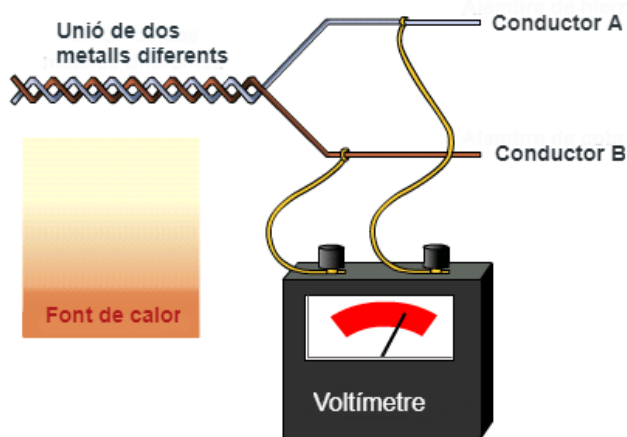
Les reaccions de fissió es basen en fer fissionar un nucli atòmic pesant en dos de més lleugers. Com ja s'ha explicat, els reactors de fissió utilitzen l'urani-235 com a combustible nuclear perquè és el que ofereix més energia en forma de

calor (raigs gamma). A més a més, es fa referència a l'ús d'una font de neutrons (californi o plutoni-beril·li) per a iniciar la reacció. Aquest tipus de reaccions provoca una llum blava a partir de l'efecte Čerenkov quan es produeixen en un medi diferent al buit.

En els reactors de fissió és necessària la presència de reaccions en cadena per la seva eficiència. Com ja s'ha explicat, això comporta l'ús de barres de control (que solen ser de bor) per controlar el nombre de reaccions.

Per tant, de moment, es dona per fet que el Reactor ARC de fissió utilitzaria l'urani com a combustible, el plutoni-beril·li o el californi com a font de neutrons i el bor com a material de les barres de control. En aquest model no hi encaixaria la presència de llum blava ja que el medi en el que es produiria la reacció seria el buit.

Un cop produïda la reacció, els reactors de fissió transformen l'energia calorífica en elèctrica amb l'ús de conductes d'aigua, turbines, alternador i sistema de condensació. Per motius d'espai i manca d'indicis de sortides de vapor a les pel·lícules, és evident que aquest procés no és viable en el Reactor ARC.



Imatge 17: Diagrama del funcionament d'un termoparell que demostra l'efecte Seebeck.

Font: Pròpia (Imatge de "Wikipedia" modificada)
<https://es.wikipedia.org/wiki/Termopar>

Per tant, es pot afirmar que el Reactor ARC de fissió utilitzaria un altre procés de transformació energètica calorífica en elèctrica. Aquest procés podria ser possible gràcies a l'ús d'un termoparell (també usats en aparells que aprofiten la desintegració nuclear). Aquest tipus d'aparell termoelèctric es forma a partir d'un parell de conductors elèctrics units per un extrem. Gràcies a l'efecte Seebeck⁴⁹, quan el calor

procedent de la radiació escalfa un extrem de la unió de conductors, es produeix una diferència de potencial que genera corrent continu.

En aquest model les reaccions d'urani es produirien en el centre del reactor i l'efecte Seebeck es produiria a l'anell, a partir de la col·locació dels dos conductors al voltant del centre. A més a més, l'estructura del reactor hauria de ser de plom per disminuir la penetració dels raigs gamma.

⁴⁹ Efecte que provoca un intercanvi d'electrons entre dos materials diferents sotmesos a una diferència de temperatura.

Un dels problemes principals d'aquest model hipotètic és que no s'hi justifica l'ús del pal·ladi en el centre del reactor.

Podria utilitzar-se el pal·ladi com a combustible nuclear, com a barres de control o com a conductor (del termoparell) de l'hipotètic Reactor ARC de fissió?

De manera industrial, el pal·ladi no es pot utilitzar com a combustible nuclear de fissió ja que, com s'ha vist anteriorment a la gràfica de la imatge 13 (pàgina 23), la massa mitjana dels fragments de la fissió ha de ser igual o superior a 118. En el cas del pal·ladi l'isòtop amb més massa atòmica és el pal·ladi-128 (que a més a més té un període de semidesintegració de 35ms^{vi}). Segons això, és físicament impossible que els fragments de la fissió del pal·ladi tinguin una massa atòmica mitjana superior o igual a 118. Per tant, es pot afirmar que cap isòtop de pal·ladi pot ser utilitzat per extreure'n un benefici energètic a partir de la fissió nuclear.

El pal·ladi tampoc serveix com a material de les barres de control perquè, tot i tenir una secció transversal d'absorció de neutrons⁵⁰ molt més baixa que el bor o el cadmi, dura molt menys perquè tendeix a fissionar-se fàcilment. En canvi, el bor i el cadmi poden absorbir els neutrons sense ser fissionats (mantenint la seva estructura).

No obstant, el pal·ladi podria funcionar com a conductor ja que és un metall i aquests presenten una gran conductivitat. Si fos així, el conductor de pal·ladi no es col·locaria en el centre del reactor com es veu a pel·lícula *Iron Man 2* (2010), sinó en l'anell. A més a més, en aquesta posició, el dany del pal·ladi provocat per neutrons no estaria justificat ja que les barres de control s'encarregarien de no permetre l'escapament de neutrons a l'anell.

Per tant, aquest fet comporta l'intercanvi de la posició entre el termoparell i el combustible nuclear: el pal·ladi (un dels conductors) s'hauria de posar al centre i el combustible nuclear al voltant. D'aquesta manera, per tal que és produís l'efecte Seebeck, s'hauria de col·locar un altre material conductor al voltant del pal·ladi de manera que aquest quedés incomunicat amb l'anell. Això impediria el contacte del pal·ladi amb els neutrons i el seu dany neutrònic.

A més a més, falta encara identificar un altre gran problema d'aquest reactor: la baixa potència elèctrica que ofereixen els termoparells (per exemple l'aparell termoelèctric que utilitza la *Voyager 1*⁵¹ de la NASA⁵² generava 470 W^{vii} quan la nau va ser llançada a l'espai). Després, de 34 anys de funcionament, l'any 2011,

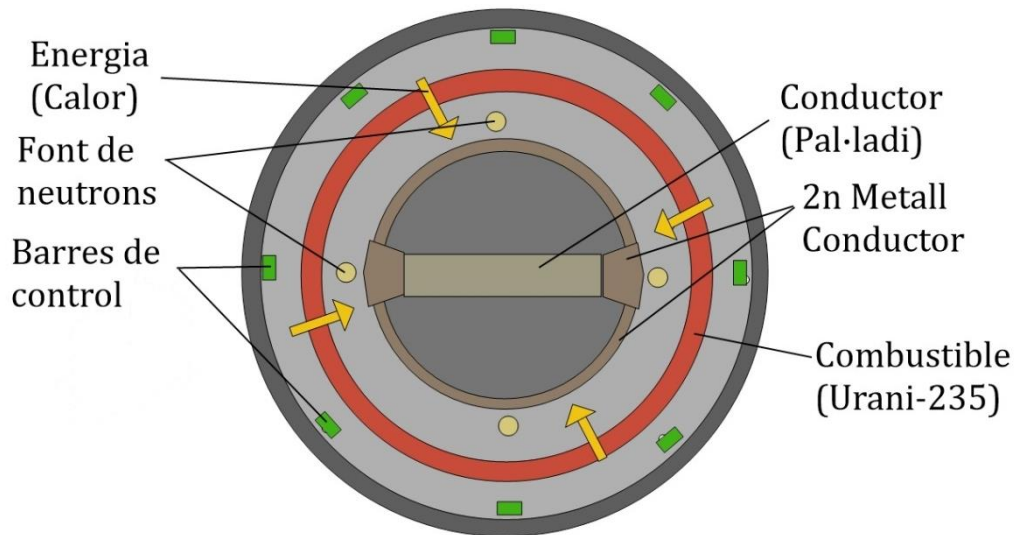
⁵⁰ (secció transversal d'absorció de neutrons) Àrea eficaç necessària perquè un material absorbeixi un neutró.

⁵¹ Sonda espacial no tripulada llançada l'any 1977 per explorar el sistema solar exterior (més enllà de la Terra en sentit contrari al Sol).

⁵² National Aeronautics and Space Administration (Administració Nacional de l'Aeronàutica i de l'Espai)

l'aparell termoelèctric del *Voyager 1* havia disminuït la seva potència fins a un 57% (267.9 W^{viii}).

L'esquema del Reactor ARC de fissió seria el següent:



*Imatge 18: Esquema gràfic del Reactor ARC de fissió.
Font: Pròpia (creada amb DrawPad Graphic Design Editor)*

Finalment, es pot afirmar que l'hipotètic Reactor ARC de fissió no encaixaria amb les següents afirmacions extremes de la pel·lícula:

- El pal·ladi es desgasta pels danys neutrònics (no possible perquè el pal·ladi s'ha de col·locar en el centre).
- El reactor genera 3GW (no possible perquè el termoparell té un rendiment massa petit).
- Produeix una llum blava (no possible perquè no hi ha plasma o cap medi que disminueixi la velocitat de la llum).

Reactor ARC de fusió?

Els reactors de fusió necessiten grans quantitats d'energia d'entrada per generar i contenir el plasma. Així doncs, és de suposar que l'hipotètic Reactor ARC de fusió també en necessitaria. Això sí, en els reactors de fusió reals (com el Reactor de l'ITER) aquesta energia prové de la xarxa elèctrica. En canvi, es pot veure com l'armadura d'Stark funciona amb total autonomia (sense estar connectada amb cables a font d'energia externes a l'armadura). Per tant, l'energia hauria d'estar emmagatzemada a la pròpia armadura.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

Iron Man, llavors, hauria de tenir acumuladors elèctrics integrats a l'armadura que provocarien l'inici de la reacció (escalfant i controlant el plasma) i que es realimentarien a partir de l'energia generada (com si es tractés d'una bateria de cotxe). El problema és que aquests acumuladors/bateries haurien de ser molt grans i pesarien moltíssim, sent així poc eficients per fer moure l'armadura. Aquesta última afirmació es pot comprovar mitjançant els següents càlculs:

La relació entre la potència d'entrada^{iv} i de sortida^{iv} del Reactor de l'ITER (reactor de fusió) serà la següent:

$$\frac{\text{Potència d'entrada de l'ITER}}{\text{Potència de sortida de l'ITER}} = \frac{50 \text{ MW}}{500 \text{ MW}} = \frac{1}{10}$$

Segons les dades extretes de la pel·lícula *Iron Man* (2008) la potència de sortida del Reactor ARC és de 3 GW, per tant, es pot calcular la potència d'entrada (necessària per a produir el plasma i començar la reacció de fusió) en relació amb les potències del Reactor de l'ITER:

$$\frac{\text{Potència d'entrada del Reactor ARC}}{\text{Potència de sortida del Reactor ARC}} = \frac{P. \text{ entrada}}{3 \text{ GW}} = \frac{1}{10}$$

$$P. \text{ entrada} = \frac{3 \text{ GW}}{10} = 0.3 \text{ GW} = 3 \cdot 10^8 \text{ W}$$

Una de les bateries de cotxe amb més potència del mercat és la Optima YTS-5.5. Aquesta bateria té una capacitat nominal⁵³ de 75Ah^{viii} i un voltatge de 12V^{viii}. La seva massa és de 27.9kg^{viii} i mesura 325mm x 165mm x 238mm^{viii}.

Suposant, que el Reactor ARC de Fusió s'alimentés amb aquesta bateria es podria determinar la intensitat que genera en 20 minuts^{iv} de funcionament (ja que el Reactor de l'ITER funciona de manera contínua durant aquest període de temps):

$$\text{Temps} = 20 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 0.33 \text{ h}$$

$$\text{Intensitat (A)} = \frac{\text{Capacitat Nominal (A} \cdot \text{h)}}{\text{Temps (h)}} \rightarrow \text{Intensitat} = \frac{75 \text{ Ah}}{0.33 \text{ h}} = 225 \text{ A}$$

Per calcular la potència de la bateria s'ha d'utilitzar una fórmula que relacioni el voltatge amb la intensitat.

Com que:

⁵³ Quantitat d'energia (A) que pot subministrar la bateria quan està completament carregada en un període de temps (h) determinat.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

$$Potència(W) = Voltatge(V) \cdot Intensitat(A)$$

Aleshores es pot calcular la potència d'una bateria:

$$Potència\ bateria = 12V \cdot 225A = 2700W$$

Suposant que l'armadura tingués aquest tipus de bateria es pot calcular la quantitat de bateries que es necessitarien per arribar a la potència d'entrada del Reactor ARC calculada anteriorment:

$$Nombre\ de\ bateries = \frac{Potència\ d'entrada\ del\ Reactor\ ARC}{Potència\ de\ cada\ bateria\ \left(\frac{W}{bateria}\right)}$$

$$Nombre\ de\ bateries = \frac{3 \cdot 10^8 W}{2700W/bateria} = 1.1 \cdot 10^5\ bateries$$

Finalment, per comprovar l'afirmació inicial resta calcular les dimensions i la massa d'aquestes bateries (utilitzant el mateix model de bateria que anteriorment):

Com que:

$$Massa\ total = Nombre\ de\ bateries \cdot Massa\ per\ bateria$$

Llavors, es pot calcular la massa de totes les bateries.

$$Massa\ total = 1.1 \cdot 10^5\ bateries \cdot 27.9kg = 3.09 \cdot 10^6\ kg = 3090\ tones$$

En canvi, com que:

$$Dimensions\ totals = Nombre\ de\ bateries \cdot Dimensió\ d'una\ bateria$$

Aleshores, tenim que:

$$\begin{aligned} Dimensions\ totals &= 325mm \cdot 165mm \cdot 238mm \cdot 1.1 \cdot 10^5\ bateries = \\ &= 0.325m \cdot \sqrt[3]{1.1 \cdot 10^5} \cdot 0.165m \cdot \sqrt[3]{1.1 \cdot 10^5} \cdot 0.238m \cdot \sqrt[3]{1.1 \cdot 10^5} = \end{aligned}$$

$$Dimensions\ totals = 15.62m \cdot 7.93m \cdot 11.44m$$

Mitjançant aquestes dades, es pot afirmar que el Reactor ARC de fusió necessitaria una bateria (o moltes més petites) amb unes dimensions molt

elevades (15.62m·7.93m·11.44m) i una massa extremadament gran (3090 tones).

Suposant que existís una bateria amb una potència de $3 \cdot 10^8 \text{W}$ i una massa d'1kg (cosa impossible de fer) o que s'utilitzés una bateria de menor potència (i el reactor no produís tanta energia per segon), el reactor podria contenir el plasma i generar la reacció de fusió de triti i deuteri (produint heli-4 i un neutró lliure amb energia cinètica). No obstant, el Reactor ARC de fusió seguiria tenint el mateix problema que el de fissió: no es podria implementar la maquinària necessària per transformar l'energia calorífica (l'energia cinètica passa a ser calorífica amb el xoc dels neutrons a les parets del reactor) en elèctrica.

Llavors, el Reactor ARC de fusió hauria d'utilitzar també un altre tipus de procés de transformació energètica: en aquest cas també serviria l'ús de termoparells (explicats anteriorment) que provocarien una baixa potència del reactor.

A l'hipotètic Reactor ARC de fusió el termoparell es col·locaria al mig i el plasma es generaria a l'anell (on l'estructura afavoreix l'increment de la velocitat de les partícules).

En aquest model també es podria fer servir el pal·ladi com a conductor però això implicaria la mateixa contradicció esmentada al subapartat anterior: el material de pal·ladi no es desgastaria pels danys neutrònics perquè es col·locaria en el centre. Per no contradir aquesta afirmació s'hauria d'assignar una funció diferent al pal·ladi.

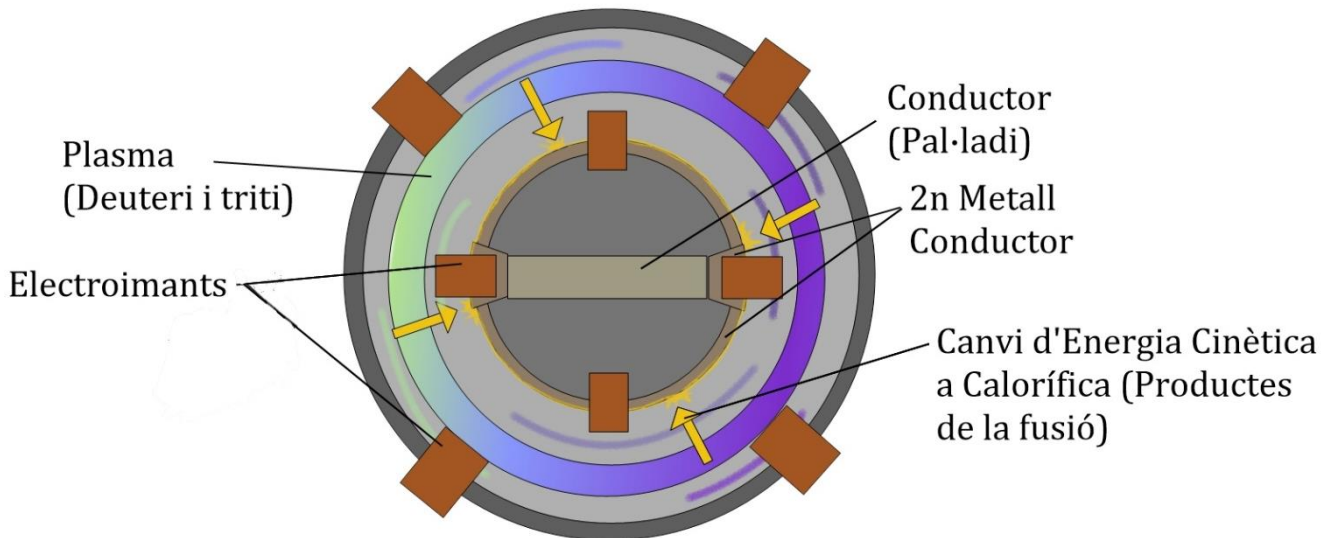
Podria utilitzar-se el pal·ladi com a combustible nuclear de l'hipotètic Reactor ARC de fusió?

De manera industrial, el pal·ladi no es pot usar com a combustible nuclear de fusió ja que, com s'ha vist a la gràfica de la imatge 13 (pàgina 23), els elements que tenen una massa superior a 56 no es poden fissurar (pic de ferro). Donat que l'isòtop de pal·ladi amb la massa atòmica més baixa és el pal·ladi-91 (que té un període de semidesintegració de 10ms^{vi}), és impossible obtenir energia a partir de la fusió de pal·ladi amb un altre element.

Això implica la necessària utilització de pal·ladi com a conductor i, al seu torn, la impossibilitat d'argumentar el seu dany per neutrons.

El model del Reactor ARC de fusió es componria, per tant, d'un termoparell en el centre i uns electroimants alimentats per una bateria que ajudarien a contenir el plasma a l'anell. En aquesta reacció, els neutrons xocarien amb les parets i, en canvi, l'heli-4 quedaria contingut en el plasma per culpa dels electroimants. Les partícules de plasma anirien a unes velocitats altíssimes i la llum blavosa estaria justificada gràcies a la presència de plasma.

L'esquema del Reactor ARC de fusió seria el següent:



*Imatge 19: Esquema gràfic del Reactor ARC de fusió.
Font: Pròpia (creada amb DrawPad Graphic Design Editor)*

Finalment, es pot afirmar que l'hipotètic Reactor ARC de fusió no encaixaria amb les següents afirmacions extremes de la pel·lícula:

- El pal·ladi es desgasta pels danys neutrònics (no possible perquè el pal·ladi s'ha de col·locar en el centre).
- El reactor genera 3GW (no possible perquè el reactor no està connectat a una xarxa elèctrica).

Reactor ARC d'electròlisi (fusió freda)?

Pel que fa a la fusió freda, l'experiment de Pons i Fleischmann es basa en l'electròlisi que permet provocar reaccions (en aquest cas de dos deuteris) en un recipient d'aigua pesada. Aquest procés implica la utilització d'un càtode de pal·ladi que provocaria la reacció de l'aigua pesada.

L'hipotètic Reactor ARC de fusió freda seguint el model d'electròlisi també hauria de seguir el principi anterior. Per tant, el pal·ladi i el recipient d'aigua pesada es col·locarien en el centre i, en aquest cas, la posició central del pal·ladi i el seu desgast per neutrons (danys dels neutrons de la mescla d'aigua pesada) estarien justificats.

La reacció de deuteri-deuteri generaria un àtom d'Heli-3 i un neutró lliure amb una energia cinètica de 3.27 MeV^v. Aquesta reacció produiria la llum blava de l'efecte Čerenkov ja que la utilització d'aigua provocaria que la velocitat de la llum disminuís i aquesta pogués ser superada. Els neutrons resultants de la fusió

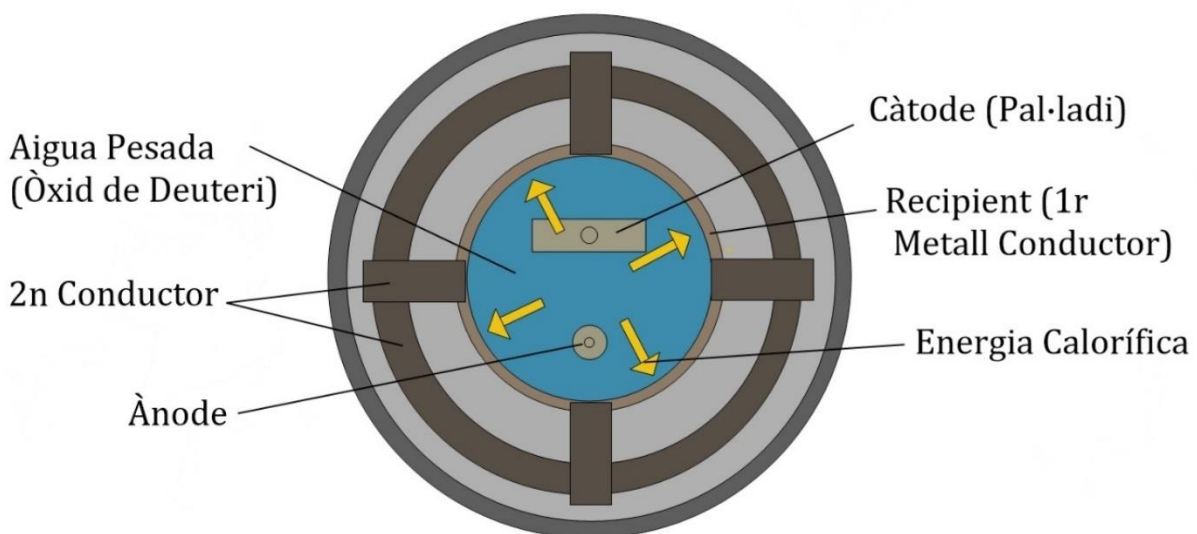
xocarien amb el recipient escalfant-ne les parets. Industrialment, aquestes parets canalitzarien la calor i crearien vapor d'aigua (com en els reactors de fissió i fusió reals). Com ja s'ha establert, implementar aquesta maquinaria seria impossible per qüestions d'espai i mobilitat del reactor. Conseqüentment, en aquest reactor també s'hauria d'implementar un termoparell: el recipient estaria fet d'un metall conductor que s'enllaçaria amb un d'altre.

En aquest procés no és necessari l'ús del plasma ni de camps magnètics per contenir-lo. Es podria llavors aprofitar l'energia cinètica de l'Heli (que no quedaria contingut amb el plasma) a partir de la inducció electromagnètica⁵⁴?

A primera vista, aquesta teoria podria arribar a semblar lògica. Tot i això, si s'analitza bé la informació proporcionada per l'ITER, no seria una hipòtesis coherent ja que els àtoms resultants d'heli no tenen càrrega elèctrica per ells mateixos, sinó que aquesta és produïda pel plasma (que fa que les partícules estiguin ionitzades/carregades).

Com que aquesta reacció és basa en una hipòtesis no comprovada no es pot calcular l'energia necessària que hauria de circular pel càtode ni la potència que generaria el reactor. A més a més, aquest mètode necessitaria generar un corrent elèctric que com ja s'ha explicat anteriorment no podria provenir de la xarxa elèctrica, sinó d'un conjunt d'acumuladors energètics. La possibilitat d'utilitzar bateries no es pot estudiar pel fet que no es sap l'energia inicial necessària per fer la reacció. Tot i això, segurament passaria el mateix que en el Reactor ARC de fusió: no es podria implementar la gran quantitat de bateries necessàries a dins de l'estructura de l'armadura.

L'esquema del Reactor ARC d'electròlisi seria el següent:



*Imatge 20: Esquema gràfic del Reactor ARC d'electròlisi.
Font: Pròpia (creada amb DrawPad Graphic Design Editor)*

⁵⁴ Producció d'un corrent elèctric d'un conductor situat al voltant d'un flux magnètic canviant.

Finalment, es pot afirmar que l'hipotètic Reactor ARC d'electròlisi no encaixaria amb les següents afirmacions extremes de la pel·lícula:

- L'aparell és un reactor nuclear (no ho és perquè es basa en una teoria no comprovada).
- El reactor genera 3GW (indeterminat perquè no es coneix el rendiment de l'electròlisi utilitzada per fusionar àtoms i possiblement no es generaria potència sense estar connectat a una xarxa elèctrica).

Reactor ARC de fractofusió (fusió freda)?

La fractofusió es basa en la fusió d'un deuteri i triti atrapats en l'estructura d'un material. Com s'ha explicat abans aquesta és una teoria no confirmada.

L'hipotètic Reactor ARC de fractofusió podria funcionar d'aquesta manera: el pal·ladi faria de recipient col·locat en el centre (contindria atrapats els dos isòtops en la seva estructura) i, al mateix temps, actuaria com a reactiu (produiria la fusió a partir de la fractura de la seva estructura generant altes pressions i camps elèctrics).

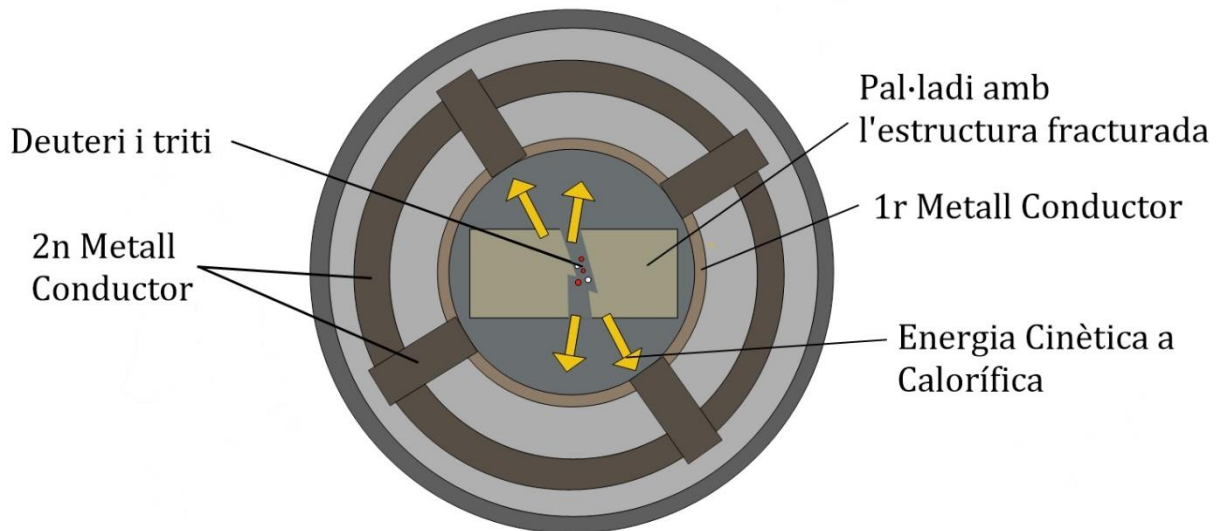
En aquest model els danys neutrònics serien provocats per la fusió del deuteri i del triti. Aquests danys i el fet que l'estructura de pal·ladi seria constantment fraccionada farien que el reactor s'hagués d'abastir de nou amb una nova peça de pal·ladi (com a la pel·lícula). Tot i això, la reacció de fusió de deuteri i triti no provocaria la llum blava de l'efecte Čerenkov ja que no hi hauria presència d'un medi que provoqués la disminució de la velocitat de la llum.

Un cop produïda la reacció, el Reactor ARC de fractofusió tindria, altre vegada, el mateix problema que els reactors de fissió i de fusió: no es podria implementar tota la maquinària de les centrals nuclears per convertir l'energia calorífica en elèctrica.

Per tant, es podria utilitzar altre vegada el termoparell i l'efecte Seebeck de manera que els productes de la fusió s'escamparien lliurement cap a l'anell del reactor on es trobaria el termoparell.

Aquest reactor hipotètic generaria més energia que el Reactor ARC de fusió perquè no necessitaria utilitzar energia per generar el plasma. Tot i això, el rendiment del termoparell seguiria sent baix i seria impossible que el reactor arribés a generar 3GW.

L'esquema del Reactor ARC de fractofusió seria el següent:



*Imatge 21: Esquema gràfic del Reactor ARC de fractofusió.
Font: Pròpia (creada amb DrawPad Graphic Design Editor)*

Finalment, es pot afirmar que l'hipotètic Reactor ARC de fractofusió no encaixaria amb les següents afirmacions extremes de la pel·lícula:

- L'aparell és un reactor nuclear (no ho és perquè es basa en una teoria no comprovada).
- El reactor genera 3GW (no possible perquè el termoparell té un rendiment molt baix).
- Produeix una llum blava (no possible perquè no hi ha plasma o cap medi que disminueixi la velocitat de la llum).

Reactor ARC de desintegració nuclear?

La desintegració nuclear és el procés en que un nucli radioactiu emet radiació i decau en un nucli diferent. Com ja s'ha vist anteriorment, el pal·ladi té diferents isòtops radioactius que podrien aprofitar-se en un generador d'energia per radioisòtops.

El pal·ladi-107 és una font contínua d'electrons ja que produeix radiació beta. En canvi, els altres dos radioisòtops (Pd-100 i Pd-103) més estables es desintegren a partir de la captura electrònica. Per tant, el Reactor ARC de desintegració nuclear podria funcionar amb dos radioisòtops per tal d'aprofitar al màxim l'eficiència de la desintegració.

Seguint aquesta hipòtesi, el pal·ladi-107 es situaria en el centre del reactor (funcionant com a font d'electrons) i, a l'anell, es col·locaria un altre radioisòtop.

Quin seria el radioisòtop més indicat per ser utilitzat?

El pal·ladi-103 decau en rodi-103 per captura d'electrons i produint radiació gamma. En canvi, el pal·ladi-100 decau en rodi-100 (també per captura d'electrons i emetent radiació gamma). Això sí, al seu torn, el rodi-100 decau posteriorment en ruteni-100 emetent positrons. Per tant, com que els positrons s'aniquilen amb els electrons generant energia, seria útil fer servir el pal·ladi-100 com a material receptor d'electrons ja que alguns dels electrons procedents del pal·ladi-107 (els que no fossin capturats pel pal·ladi-100) podrien generar energia també a partir de la col·lisió amb els positrons.

El problema principal d'aquesta hipòtesis és que el pal·ladi-107 té un període de semidesintegració de $6.5 \cdot 10^6$ anys^{vi}. Per tant, si comparem això amb el període de semidesintegració de l'altre radioisòtop (el pal·ladi-100) podem determinar la quantitat de pal·ladi-107 que quedaria en el reactor quan la quantitat de pal·ladi-100 s'hauria de trobar a la meitat ($t = 3.63$ dies⁵⁵ vi, tot i que no es trobaria a la meitat perquè no hi hauria prou electrons).

Com que:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2Pd107}} \quad t = 3.63 \text{ dies}$$

$$N_0 = 100\% \quad T_{1/2Pd107} = 6.5 \cdot 10^6 \text{ anys} \cdot \frac{365 \text{ dies}}{1 \text{ any}} = 2.37 \cdot 10^9 \text{ dies}$$

Aleshores podem calcular la quantitat de pal·ladi-107 en el temps determinat:

$$N = 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{2.37 \cdot 10^9} \cdot 3.63} \rightarrow N = 100 \cdot e^{-1.062 \cdot 10^{-9}}$$

$$N = 99.99999989 \%$$

Per tant, la mostra resultant seria el 99.99999989% de la inicial i només un $1.1 \cdot 10^{-7}\%$ (0.00000011%) s'hauria desintegrat. Aquesta dada, demostra que el període de semidesintegració utilitzat ha de ser molt més petit. A més a més, ha de ser un radioisòtop que també produeixi radiació beta (electrons) de tal manera que la relació establerta entre els dos pal·ladis diferents continuï sent possible.

A més a més, en el cas de l'hipotètic Reactor ARC de desintegració el decaïment de la font d'electrons ha de ser més ràpid que el del pal·ladi-100. D'aquesta

⁵⁵ Període de semidesintegració del pal·ladi-100.

manera es produirien més electrons dels capturats i es permetria que els electrons restants fossin col·lisionats amb els positrons (generant més energia).

El radioisòtop indicat podria ser el pal·ladi-109 que té un període de semidesintegració de 13.7 hores i emet radiació beta negativa (β^-) amb emissió d'electrons. Amb aquesta dada es pot calcular el que tarda a desintegrar-se el 99% (quedaria un 1% restant) d'una mostra de Pd-109.

Com que:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^{Pd109}} \quad N_0 = 100\%$$

$$N = 1\% \quad T_{1/2}^{Pd109} = 13.7 \text{ h} \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Llavors es pot calcular el temps:

$$1 = 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{13.7} t} \rightarrow \ln\left(\frac{1}{100}\right) = \ln e^{-\frac{\ln 2}{13.7} t}$$

$$-4.61 = -\frac{\ln 2}{13.7} \cdot t \cdot \ln e \rightarrow t = \frac{-4.61 \cdot 13.7}{-\ln 2} \rightarrow t = 91.12 \text{ hores} = 3.8 \text{ dies}$$

Aquest càlcul demostra que el 99% de la mostra tardaria 3.8 dies a desintegrar-se.

Això sí, el reactor generaria més energia quan més ràpid fos reabastit (l'energia obtinguda aniria disminuint amb el temps si el reactor no es reabastís). Tot i això, aquesta energia (negativament exponencial amb el temps) seria mínimament compensada amb el fet que al utilitzar durant més temps el reactor, es generaria més col·lisions de positrons i electrons.

Al conèixer els dos elements utilitzats es poden establir diferents funcions en que $f(t)$, $g(t)$ i $h(t)$ són les quantitats restants de cada material i t és el temps transcorregut. Gràcies a això, es pot establir si hi hauria prou electrons lliures per tal que el Pd-100 pogués capturar-los o bé determinar si aquests electrons quedarien aniquilats amb els positrons del Rh-100 (establir quin procés dels dos es produiria abans).

La funció $f(t)$ representa la quantitat de Pd-109 restant.

Com que:

$$T_{\frac{1}{2}Pd-109} = 13.7 \text{ hores}^{\text{vi}}$$

Aleshores tenim que:

$$f(t) = 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{13.7} t}$$

En canvi, la funció $g(t)$ s'assigna a la quantitat de Pd-100 restant.

Com que:

$$T_{\frac{1}{2}Pd-100} = 3.63 \text{ dies} \cdot \frac{24 \text{ hores}}{1 \text{ dia}} = 87.12 \text{ hores}^{vi}$$

Llavors, la funció quedaria així:

$$g(t) = 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t}$$

L'ús de Pd-100 al reactor produiria Rh-100 a mesura que el primer s'anés desintegrant. Per tant, en aquest cas, per estudiar la funció s'ha de relacionar la quantitat de Pd-100 que s'ha desintegrat en cada moment amb la quantitat inicial de Rh-100. La relació seria aquesta:

$$N_{0Rh} = N_{Pd \text{ Desintegrada}} = N_{0Pd} - N_{Pd \text{ Restant}}$$

$$N_{0Rh}(t) = N_{0Pd} - g(t)$$

La funció $N_{0Rh}(t)$ quedaria així:

$$N_{0Rh}(t) = 100 - 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t}$$

Finalment la funció $h(t)$ representa la quantitat de Rh-100 restant.

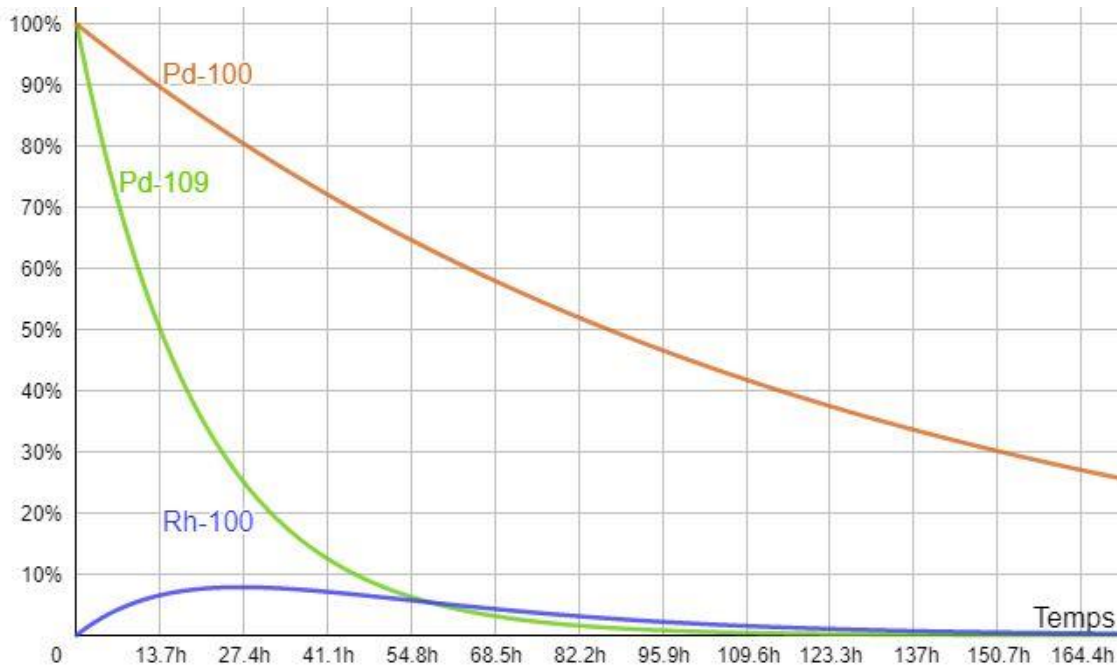
Com que:

$$T_{\frac{1}{2}Rh-100} = 20.8 \text{ hores}^{vi}$$

Aleshores podem determinar la funció $h(t)$:

$$h(t) = \left(100 - 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} \right) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{20.8}t}$$

Mitjançant el programa Geogebra, es poden representar gràficament les diferents funcions. De tal manera, es mostra la quantitat restant de cada material segons el temps.



Imatge 22: Gràfica quantitat restant-temps de cada material.
Font: Pròpia (creada amb Geogebra)

Amb aquesta gràfica encara no es pot determinar si la captura d'electrons del Pd-100 (la seva desintegració) es veuria alentida. Per fer-ho, s'ha d'estudiar a partir de la derivada de les funcions de quantitat desintegrada-temps (la derivada indica la pendent de la recta tangent i, per tant, la quantitat que està sent desintegrada en un instant determinat).

Aquestes funcions (que s'hauran de derivar) són les funcions que indiquen la quantitat que ha estat desintegrada (no la resultant) segons el temps. Per establir aquestes funcions s'ha de seguir el següent procés:

$$N_{Pd-109Desintegrat}(t) = N_{0Pd-109} - N_{Pd-109} = 100 - f(t)$$

Com es pot veure, per determinar les funcions quantitat desintegrada-temps s'ha de restar cada funció a 100. La funció $F(t)$ representaria la quantitat de pal·ladi-109 desintegrat i quedaria així:

$$F(t) = 100 - f(t)$$

$$F(t) = 100 - \left(100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{13.7}t}\right)$$

En canvi, la funció $G(t)$ s'assigna a la quantitat de pal·ladi-100 desintegrat i seria la següent:

$$G(t) = 100 - g(t)$$

$$G(t) = 100 - \left(100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t}\right)$$

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

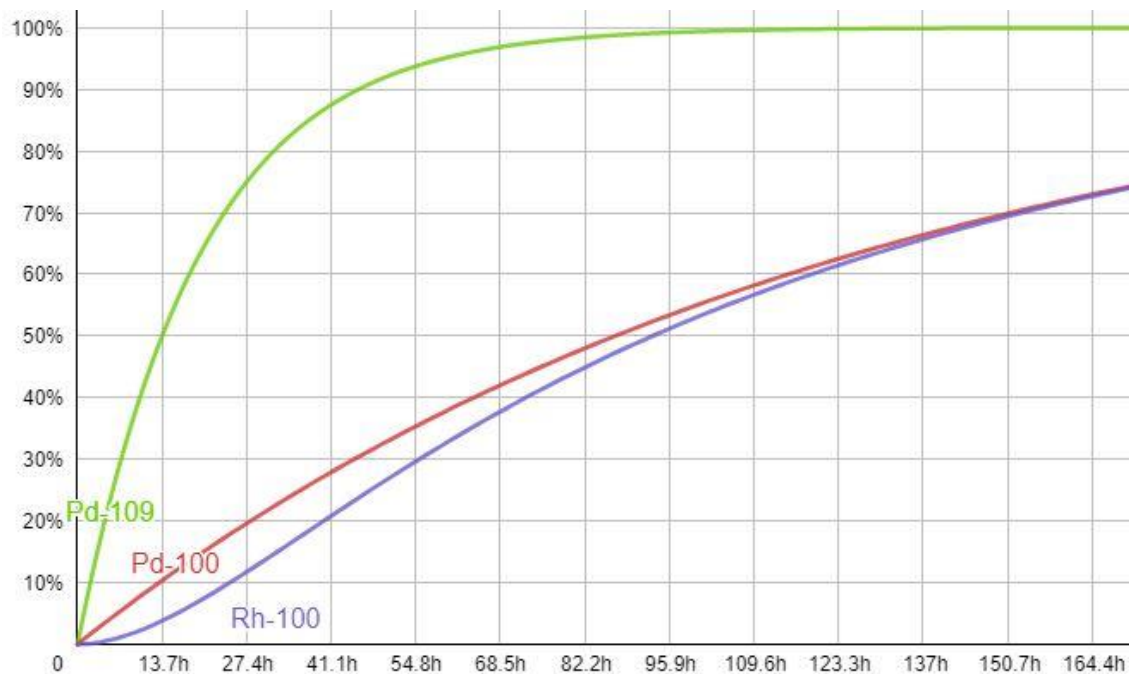
En canvi, en el cas del Rh-100 la quantitat desintegrada no és $100 - h(t)$, sinó la diferència entre la quantitat desintegrada de Pd-100 (quantitat generada de Rh-100) i la quantitat de Rh-100 restant. La funció $H(t)$ representa la quantitat de rodi-100 desintegrat i quedaria així:

$$H(t) = G(t) - h(t)$$

$$H(t) = \left(100 - 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t}\right) - \left[\left(100 - 100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t}\right) e^{-\frac{\ln 2}{20.8}t}\right]$$

$$H(t) = 100 \left[1 - e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} - \left[\left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t}\right) e^{-\frac{\ln 2}{20.8}t}\right]\right]$$

La gràfica que mostra la quantitat de cada material desintegrada segons el temps és la següent:



Imatge 23: Gràfica quantitat desintegrada-temps de cada material.

Font: Pròpia (creada amb Geogebra)

Finalment, només queda calcular-ne les derivades per determinar la quantitat desintegrada a cada moment. Primer, la derivada de $F(t)$ seria la següent:

$$F'(t) = \left[100 - \left(100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{13.7}t}\right)\right]'$$
$$F'(t) = \frac{\ln 2 \cdot 100}{13.7} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{13.7}t}$$

En canvi, la derivada de $G(t)$ quedaria així:

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

$$G'(t) = \left[100 - \left(100 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} \right) \right]'$$

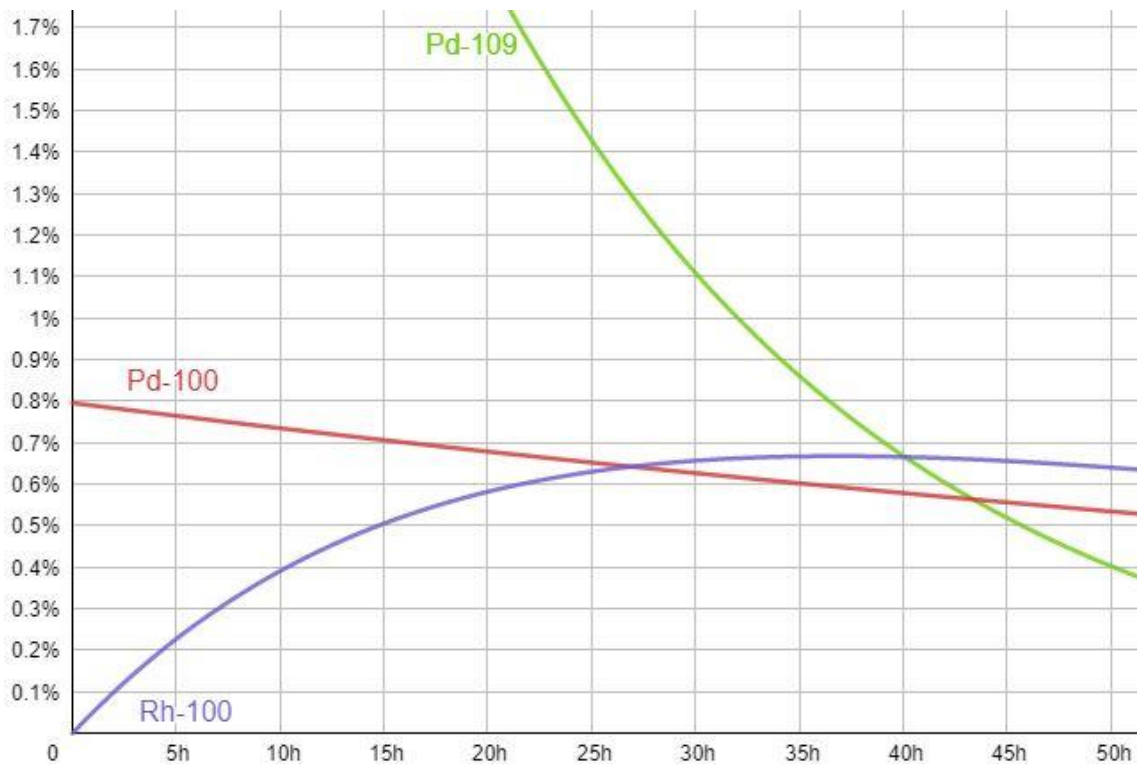
$$G'(t) = \frac{\ln 2 \cdot 100}{87.12} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t}$$

Finalment, la derivada de H(t) seria aquesta:

$$H'(t) = 100 \left[1 - e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} - \left[\left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} \right) e^{-\frac{\ln 2}{20.8}t} \right] \right]'$$

$$H'(t) = 100 \left[\frac{\ln 2}{87.12} e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} - \frac{\ln 2}{87.12} e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{20.8}t} + \frac{\ln 2}{20.8} \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{87.12}t} \right) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{20.8}t} \right]$$

La gràfica de les diverses derivades és la següent:



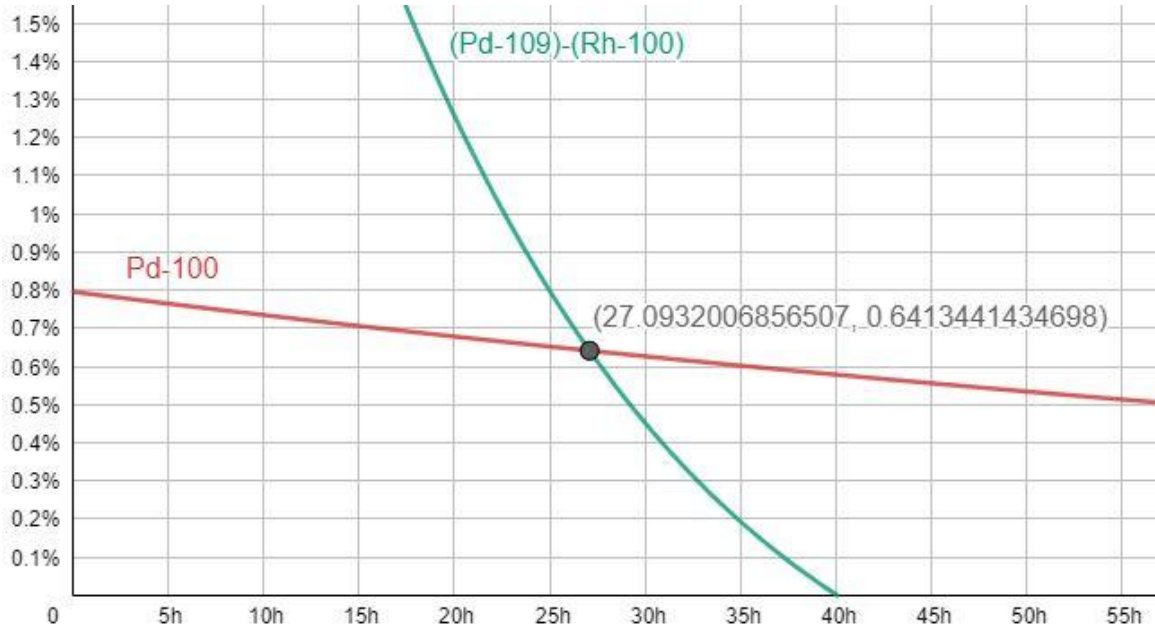
Imatge 24: Gràfica derivades de quantitat restant-temps de cada material.

Font: Pròpia (creada amb Geogebra)

En aquesta última gràfica s'observa la quantitat que s'està desintegrant en cada moment. Com bé s'ha dit abans, tot el procés seguit anteriorment ha estat per poder establir en quin moment la quantitat de positrons superaria la d'electrons lliures i, per tant, el Pd-100 no tindria prou electrons per continuar desintegrant-se al seu ritme habitual.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

Per determinar-ho, la quantitat de Pd-100 desintegrat ha de ser menor o igual a la diferència entre el Pd-100 desintegrat i el Rh-100 desintegrat ($Pd_{109} - Rh_{100} \geq Pd_{100}$ o $(F'(t) - H'(t) \geq G'(t))$). D'aquesta manera es comparen els electrons disponibles amb els capturats.



Imatge 25: Gràfica que mostra la quantitat d'electrons lliures i la quantitat d'electrons capturats.
Font: Pròpia (creada amb Geogebra)

Finalment, com es pot veure a la gràfica, el moment en que les desintegracions deixen de seguir el ritme habitual és a les 27.09h. Totes aquestes funcions donen per fet que la quantitat de cada material és la mateixa. Per tant, realment, segons la quantitat de cada material, el temps indicat variaria.

Per exemple, si es col·loqués dues vegades més de Pd-100 que de Pd-109, les desintegracions de Pd-100 baixarien el seu ritme al cap de 14.63h. Per tant, Tony Stark podria escollir prèviament la relació entre els dos materials segons la quantitat de temps en que volgués utilitzar el reactor. Tot i això, sempre seria més factible (pel que fa a la potència energètica) canviar els pal·lavis el més aviat possible.

Fins aquí s'ha estudiat si les diferents reaccions de desintegració nuclear serien possibles o no. Una vegada establert això, només queda determinar com es captaria l'energia nuclear per convertir-la en elèctrica.

El constant flux d'electrons entre el Pd-109 i el Pd-100 produiria una diferència de potencial i, per tant, l'existència d'un corrent continu. Aquest pas d'electrons produiria energia elèctrica que podria ser aprofitada. A més a més, la desintegració del Pd-100 i les col·lisions d'electrons i positrons produirien radiació gamma, és a dir, calor que es podria transformar en energia elèctrica a partir de l'ús d'un termoparell.

Aquest termoparell tindria un rendiment més elevat que els anteriors ja que no utilitzaria el pal·ladi com a conductor, sinó que faria servir altres amb menys resistivitat elèctrica (més conductivitat) com, per exemple, el coure, l'alumini o l'argent.

Calculant l'energia que s'obté de la desintegració d'un nucli atòmic es pot arribar a determinar la massa necessària per produir una potència indicada (3GW) en un temps determinat. Després, relacionant la massa, el volum i la densitat és possible comprovar si la quantitat de pal·ladi-109 necessària podria posar-se a dins del reactor.

En aquest cas, es vol determinar la massa necessària per tal que en el 1r segon el reactor produeixi 3GW. En aquest instant, el reactor encara no obté energia del pal·ladi-100, per tant, l'energia que es té en compte és només la del pal·ladi-109.

La desintegració del Pd-109 produeix 1116.1 keV^{ix} de radiació per cada nucli desintegrat. Per tant, la quantitat de joules per cada àtom és la següent:

$$\frac{1116.1 \text{ keV}}{\text{àtom}} \cdot \frac{1000 \text{ eV}}{1 \text{ keV}} \cdot \frac{1 \text{ J}}{6.24 \cdot 10^{18} \text{ eV}} = 1.78 \cdot 10^{-13} \text{ J/àtom}$$

Per calcular la massa d'un àtom, aquesta es calcula a partir de multiplicar el seu nombre màssic (nombre de partícules subatòmiques amb una massa considerablement important) per la massa d'un neutró/protó. Amb aquesta dada es pot calcular la quantitat de joules que ofereix cada quilogram de Pd-109:

$$1 \text{ àtom Pd}_{109} = 109 \text{ u} \cdot 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.82 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

$$1.78 \cdot 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{àtom}} \cdot \frac{1 \text{ àtom}}{1.82 \cdot 10^{-25} \text{ kg}} = 9.83 \cdot 10^{11} \text{ J/kg}$$

La potència és l'energia partida pel temps. Per tant, la potència per cada quilogram serà la següent:

$$\frac{P}{m} = \frac{W}{t \cdot m} = \frac{9.83 \cdot 10^{11} \text{ J}}{1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ s}} = 9.83 \cdot 10^{11} \text{ W/kg}$$

A continuació queda calcular la massa:

$$\frac{P}{m} = \frac{W}{t \cdot m} \rightarrow \frac{3 \text{ GW}}{m} = \frac{9.83 \cdot 10^{11} \text{ W}}{\text{kg}}$$

$$m = \frac{3 \cdot 10^9 \text{ W}}{9.83 \cdot 10^{11} \text{ W/kg}} = 3.05 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

No obstant, aquesta massa és la de la quantitat de Pd-109 que s'ha de desintegrar al començament, per tant, s'ha de relacionar amb el percentatge de

Pd-109 desintegrat en aquest moment a partir de la derivada. Això es pot calcular fent el límit de $F'(t)$ quan el temps tendeix a 0:

$$\lim_{t \rightarrow 0} F'(t) = \frac{\ln 2 \cdot 100}{13.7} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{13.7}t} = \frac{\ln 2 \cdot 100}{13.7} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{13.7} \cdot 0}$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} F'(t) = \frac{\ln 2 \cdot 100}{13.7} \cdot e^0 = \frac{\ln 2 \cdot 100}{13.7} \cdot 1 \cong 5.06$$

Aquest percentatge (5.06%) s'ha d'enllaçar amb la massa obtinguda anteriorment:

$$m \cdot 5.06\% = 3.05 \cdot 10^{-3} \text{kg} \rightarrow m = \frac{3.05 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{5.06} = 0.06 \text{kg}$$

Finalment, per comprovar si aquesta massa es pot col·locar al centre del reactor s'ha de calcular el volum del pal·ladi.

Com que:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \quad \rho_{Pd} = 12023 \text{ kg/m}^3$$

En que ρ_{Pd} és la densitat del pal·ladi, V és el volum i m és la massa. Llavors, es poden substituir els valors i obtenim que:

$$V = \frac{0.06 \text{kg}}{12023 \text{kg/m}^3} = 4.99 \cdot 10^{-6} \text{m}^3$$

$$V = 4.99 \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \cdot \frac{10^6 \text{m}^3}{1 \text{cm}^3} = 4.99 \text{cm}^3$$

El volum de Pd-109 seria 4.99 cm³. Com s'ha calculat a l'anàlisi de la filmografia, el centre del reactor té un volum de 67.69cm³, per tant, la quantitat indicada de pal·ladi-109 es podria col·locar a dins del reactor.

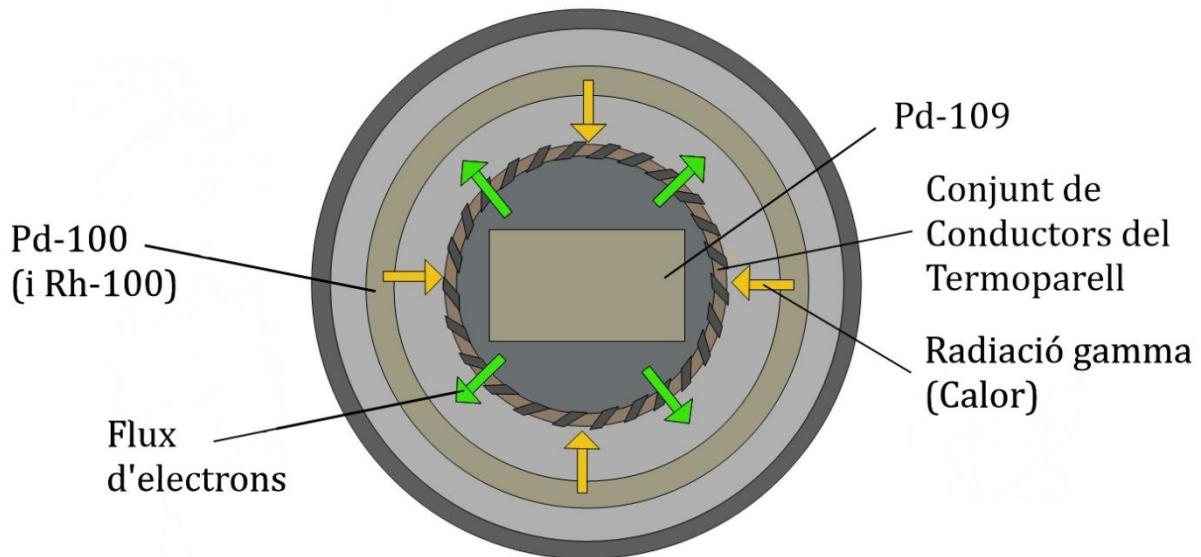
En aquest reactor hipotètic el pal·ladi hauria de ser reemplaçat però el dany neutrònic no estaria justificat ja que en cap moment hi hauria presència de neutrons lliures. A més a més, tampoc es justificaria la llum blavosa perquè les reaccions no es produeixen en un medi que permeti disminuir la velocitat de la llum.

El principal inconvenient del Reactor ARC de desintegració és que els elements utilitzats (el Pd-100 i el Pd-109) no tenen abundància a la natura (no es poden obtenir si no és de manera artificial). Per tant, per arribar a crear aquest dos radioisòtops s'hauria de consumir energia per tal de transmutar artificialment els pal·ladi 108 i el ruteni-100 (elements estables que es poden trobar a la natura).

D'aquesta manera l'obtenció total d'energia seria nul·la ja que l'energia rebuda seria igual (o menor si s'afegeixen pèrdues) a la subministrada. Aquest "reactor"

funcionaria com una mena de bateria que s'hauria de recarregar prèviament i la qual permetria obtenir energia de manera progressiva. Per tant, tècnicament l'aparell seria una "Bateria Nuclear" i no un reactor.

L'esquema de la Bateria ARC de desintegració seria el següent:



*Imatge 26: Esquema gràfic de la Bateria ARC de desintegració.
Font: Pròpia (creada amb DrawPad Graphic Design Editor)*

Finalment, es pot afirmar que la hipotètica Bateria ARC de desintegració no encaixaria amb les següents afirmacions extremes de la pel·lícula:

- L'aparell és un reactor nuclear (no possible perquè, tot i administrar energia, no produeix cap increment pel que fa a l'energia elèctrica final i inicial).
- El pal·ladi es desgasta pels danys neutrònics (no possible perquè no intervenen neutrons en les reaccions).
- Produeix una llum blava (no possible perquè no hi ha plasma o cap medi que disminueixi la velocitat de la llum).

Viabilitat del procés emprat per crear el nou element:

Tony Stark utilitza un accelerador de partícules per a crear un nou element que redueixi els seu enverinament de pal·ladi. Per tant, Tony Stark materialitza un nou element (que és estable).

Com bé s'ha vist en els antecedents científics anteriors, els acceleradors de partícules necessiten una precisió molt alta a l'hora de ser construïts. En canvi, Tony Stark crea el seu accelerador de partícules amb eines i objectes que va trobant per casa seva. A més a més, fa servir un nivell (instrument de mesura) amb poca apreciació i també utilitza llibres i altres objectes per anivellar les

diferents parts de l'accelerador. Totes aquestes imprecisions provocarien que l'accelerador no fos suficientment exacte i precís i no funcionés correctament.

Donant per fet que l'atzar i la casualitat haguessin fet que Tony Stark fes un accelerador amb la precisió necessària, seguiria havent-hi un problema encara més important: el material creat no seria estable i es destruiria en mil·lèsimes de segon. Això és degut al fet que els nous elements creats són molt pesants i això provoca una gran inestabilitat.

3.1.4. Conclusions.

En aquest apartat es recullen els diferents resultats de l'estudi pràctic/comparatiu (apartat anterior) i es respon la pregunta proposada inicialment. També es donen algunes opinions personals respecte algunes afirmacions de la pel·lícula.

A la següent taula es recullen totes les afirmacions donades a les pel·lícules i, d'una manera més visual, es mostren quines d'aquestes encaixen amb cada reactor hipotètic (les x indiquen el no compliment de l'afirmació i el símbol "✓" n'indica el compliment):

	<u>Fissió</u>	<u>Fusió</u>	<u>Electròlisi</u>	<u>Fractofusió</u>
REACCIÓ COMPROVADA	✓	✓	X	X
FORMA D'ANELL	✓	✓	✓	✓
DIMENSIONS	✓	✓	✓	✓
POTÈNCIA 3GW	X	X	X	X
ÚS PAL·LADI	✓	✓	✓	✓
DESGAST PAL·LADI	X	X	✓	✓
DANY NEUTRÒNIC PAL·LADI	X	X	✓	✓
COMBUSTIBLE	✓	✓	✓	✓
LLUM BLAVA	X	✓	✓	X
NÚM. TOTAL DE CORRECTES	5/9	6/9	7/9	6/9

Taula 1: Taula comparativa de les característiques dels diferents reactors hipotètics amb el Reactor ARC.
Font: Pròpia

El Reactor ARC de transmutació i la Bateria ARC de desintegració no s'han inclòs perquè cap dels dos compleixen la funció principal d'un reactor: produir un benefici energètic.

A la taula comparativa es pot apreciar com la potència no es compleix en cap dels reactors hipotètics. Amb aquesta observació, i a partir de la comparació del valor donat per la pel·lícula i les diferents potències dels diferents reactors reals, es pot determinar que el valor de la potència del reactor (3GW) és desmesurat. La meua opinió respecte aquest valor és que els guionistes de la pel·lícula van utilitzar un nombre aleatori molt gran sense cap fonament científic amb la intencionalitat d'impressionar a l'espectador.

A partir de l'anàlisi general de la taula es pot determinar que el Reactor ARC d'electròlisi (fusió freda) és el més adient per a ser utilitzat a la pel·lícula. Les úniques afirmacions que no encaixen amb aquest reactor són: la potència, que com ja s'ha dit, és desmesurada en tots els reactors i, per tant, no encaixa amb cap d'ells, i el fet que la reacció no hagi estat comprovada. El no compliment d'aquesta última es pot argumentar a partir del fet que al moment de crear la pel·lícula, la societat científica encara no havia descartat del tot aquesta teoria i es creia que si és demostrés, seria la tecnologia del futur. Per aquest motiu, penso que els guionistes van escollir basar-se en la fusió freda perquè, en els còmics i a les pel·lícules, Tony Stark és descrit com un home avançat a la seva època i amb unes capacitats sobrehumanes. En aquell temps es creia que qui ho demostrés seria el pròxim referent científic de l'època i volien que Tony Stark tingués aquest reconeixement en el món fictici de Marvel.

Llavors, per què a les pel·lícules no es diu com funciona el reactor (Quin és el motiu hipotètic per no definir la tecnologia del reactor a les pel·lícules)?

Opino que a les pel·lícules no es diu en cap moment que la tecnologia utilitzada sigui la fusió freda perquè els guionistes no sabien si aquesta tecnologia seria comprovada científicament. És més, a la pròpia pel·lícula s'esmenta que "la tecnologia del reactor no té sentit".

Com s'ha demostrat a l'apartat anterior el nou element que crea Tony Stark no es crea a partir d'un procés tecnològicament viable. Tot i això, la física sí que permet crear nous elements a partir d'acceleradors i, per tant, la creació del nou element a partir del procés dut a terme és científicament possible (però tècnicament improbable).

Resposta a la pregunta proposada inicialment: El “Reactor ARC” d’Iron Man és producte de la ficció o té una base científica?

Aparentment (a primera vista), el reactor sembla que tingui una base científica perquè utilitza mots tècnics i conceptes propis de la física nuclear. Això sí, quan t’endinses en el món de la física i amplies el teu rigor científic, pots arribar a concloure que el reactor no té una base científica ja que o bé, utilitza conceptes demostrats que no acaben d’encaixar amb tota la informació donada, o bé, utilitza una tecnologia que encaixa bé però no ha estat demostrada científicament.

“És possible que nosaltres siguem Obadiah Stane quan diu que la tecnologia del Reactor ARC (fusió freda) no té sentit i que estiguem a l’espera d’un Tony Stark que demostrï el contrari i revolucioni la tecnologia actual.”

3.2. En el cas de que existís l’armadura i el reactor, podria sobreviure un humà a dintre l’armadura quan aquesta es trobés en funcionament?

3.2.1. Anàlisi de la filmografia.

Per tal de respondre aquesta qüestió s’han de diferenciar les diferents possibles causes de mort o lesions greus. D’una banda, s’estudien els efectes de radiació en el cos humà i el sobreescalfament del Reactor ARC i, d’altra banda, com afectaria l’ús de la pròpia armadura a l’usuari (inèrcia, acceleració, força G...).

Pel que fa a la radiació i al sobreescalfament, les pel·lícules de les quals se’n pot extreure informació són les següents: *Iron Man* (2008) i *Iron Man 2* (2010).

Iron Man (2008):

- 25:54 – S’esmenta que el reactor té una potència de 3 GW.

Iron Man 2 (2010):

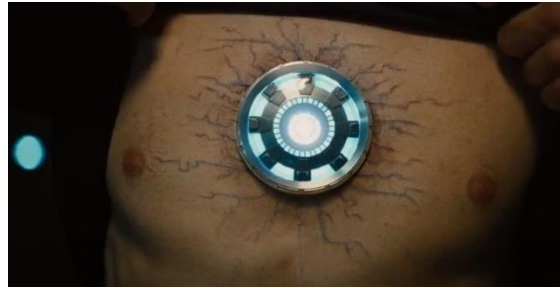
- 9:18 – Es mostra per primera vegada la toxicitat a la sang. Es troba a un 19% (Imatge filmogràfica 11).
- 18:32 – S’explica que Tony necessita beure un líquid per contrarestar els símptomes de l’enverinament. Ell l’anomena “this gobbledegook” que és tradueix a “cosa que no s’entén perquè és complicada”.
- 18:40 – Stark revisa els nivells de pal·ladi a la sang. Es veu com la toxicitat de la sang es troba al 24%.

- 19:18 – S'explica que el reactor que manté amb vida a Stark també l'està matant. Es veu els símptomes de l'enverinament en el tors (Imatge filmogràfica 12).
- 21:24 – Tony Stark explica que la beguda que bevia abans era clorofil·la.
- 28:40 – Es diu que el nivell de toxicitat ha pujat a un 53%.
- 63:40 – Nick Fury⁵⁶ injecta a Tony diòxid de liti per disminuir els símptomes de l'enverinament.
- 83:25 – Stark descobreix un nou element.
- 85:46-87:21 – Tony materialitza el nou element, l'afegeix al reactor i els seus efectes nocius són aturats.

Les imatges extretes de la pel·lícula són les següents (totes les imatges són extretes directament de les pel·lícules de Marvel, per tant, la font és "Marvel Studios"):



Imatge filmogràfica 11



Imatge filmogràfica 12

En aquest cas, les altres pel·lícules no s'inclouen ja que, com s'ha explicat anteriorment, s'utilitza en el reactor un nou element del qual se'n desconeixen les propietats. Tot i això, si que es pot determinar si és possible que existeixi un material que absorbeixi la radiació del reactor (ja que a la pel·lícula aquest element atura els efectes nocius del reactor).

Donat que el funcionament de l'armadura és invariable al llarg de les pel·lícules, l'anàlisi per comprovar la supervivència d'una persona a dintre de l'armadura es centra en una única seqüència filmogràfica (una escena concreta).

Durant la selecció de l'escena s'han tingut en compte aquestes premisses per possibilitar i facilitar el seu anàlisi:

- Que s'evidenciï l'ús de l'armadura (vol continuat).
- Que no hi hagi canvis de pla durant la seqüència.
- Que d'alguna manera es puguin determinar totes les dades necessàries.

L'escena que compleix totes les premisses anteriors forma part de la pel·lícula *Avengers: Infinity War* (2018) i transcorre entre el minut 24:56 i el 24:59.

⁵⁶ Personatge fictici de Marvel.



Imatge 27: Escena escollida per a l'anàlisi i QR de visualització del vídeo.
Font: Marvel Studios i QR propi

Mitjançant el programa Kinovea es poden mesurar diferents magnituds per tal de poder calcular posteriorment l'acceleració, la inèrcia i la força G (explicats posteriorment).

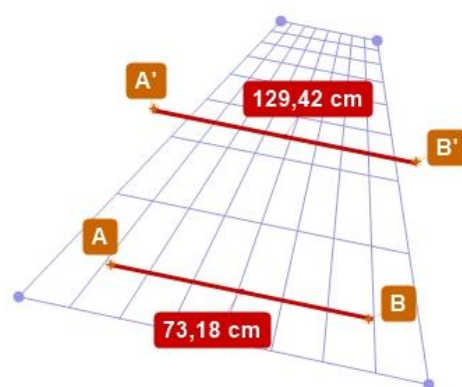
Les magnituds que es volen obtenir del moviment uniformement accelerat de l'escena són:

- L'increment de temps
- La distància recorreguda
- La velocitat inicial
- Acceleració (magnitud que es vol trobar)

L'increment de temps de l'acceleració és la diferència entre el temps final i el temps inicial. En aquest cas, el temps inicial és el moment en que s'inicia l'acceleració: el segon 1,56 (de l'escena retallada, no pas de la pel·lícula). En canvi, el temps final és el moment en que Iron Man acaba l'acceleració: el segon 1:82. Així doncs, l'increment de temps serà el següent:

$$\Delta t = t - t_0 \rightarrow \Delta t = 1.82s - 1.56s = 0.26s$$

La distància recorreguda no es pot calcular directament comparant mesures en el Kinovea perquè la imatge té una perspectiva frontal (un punt de fuga) i, per tant, la distància entre un segment AB no és la mateixa si aquest segment es situa en una coordenada diferent.



Imatge 28: Demostració gràfica de la diferència de distància segons la perspectiva.
Font: Pròpia (creat amb Kinovea)

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

Per solucionar aquest inconvenient es podria tenir en compte la perspectiva i comparar les magnituds a partir de l'alçada i l'amplada d'espatlles de l'actor que fa de Tony Stark (Robert Downey Jr.). El problema és que a l'escena, Iron Man va en direcció al mateix punt de fuga, però aquest punt de fuga imaginari canvia la seva posició pel que fa a les coordenades de la seqüència. A més a més, el punt de vista de la càmera respecte a l'escena també canvia. Això sí, no es produeix cap tall en tota la gravació.



Imatges 29 i 30: Imatges inicial i final en que es compara el punt de vista de la càmera respecte la nau espacial.

Font: Pròpia (Imatges de "Marvel Studios" modificades)

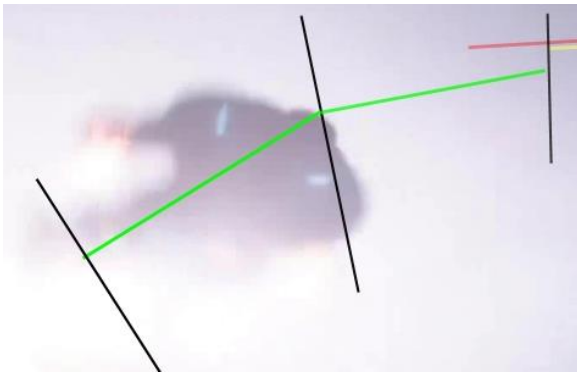
Finalment, la solució plantejada es basa en mesurar la distància posant com a referent l'alçada de Robert Downey Jr. D'aquesta manera, es relaciona una distància coneguda (variable visualment però invariable a la realitat) amb la distància desconeguda a partir de determinar la seva proporcionalitat (com si l'alçada fos una unitat de mesura).

Per seguir aquest procediment és necessari indicar a cada *frame* quin segment correspon a l'alçada d'Iron Man (aquesta distància es marca des del casc d'Iron Man fins als seus peus o, quan els peus no es distingeixen, es marca fins la sortida del fum de propulsió).

En el procés de mesura, no s'han d'analitzar tots els *frames*, sinó que només s'han de fer servir aquells en que la perpendicular a l'altura (línia negra) encaixa amb l'altura anterior. Les rectes verdes simbolitzen aquelles distàncies que segueixen el principi anterior (i, per tant, són magnituds exactament iguals a l'alçada de l'actor). Tot i això, en algun cas, el *frame* posterior no encaixa del tot amb aquesta perpendicular. Llavors, s'ha d'indicar igualment l'altura (en vermell) i determinar, a partir de les perpendiculars, quina és la distància que realment s'ha de calcular (en groc).

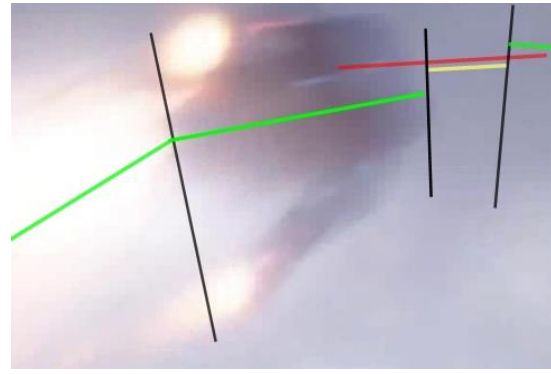
Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

Les diferents imatges extretes de l'anàlisi fet amb Kinovea són les següents:



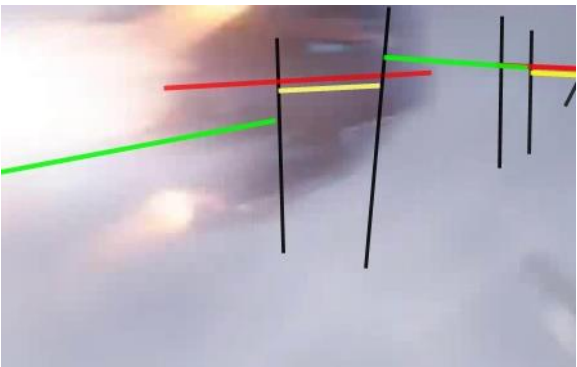
Imatge 31: 1r Frame de la pel·lícula on s'indica l'altura íntegra de l'actor en verd.

Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)



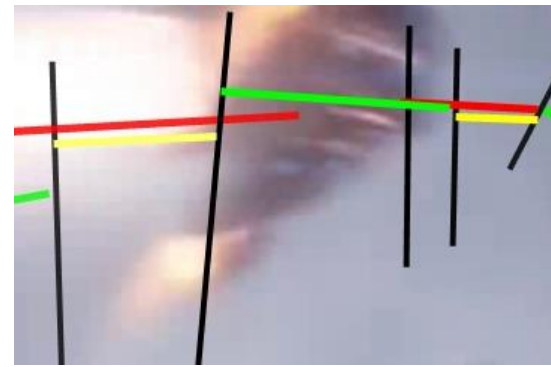
Imatge 32: 2n Frame de la pel·lícula on s'indica l'altura íntegra de l'actor en verd.

Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)



Imatge 33: 3r Frame de la pel·lícula on s'indica una part de l'altura de l'actor en groc (i l'altura en vermell).

Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)



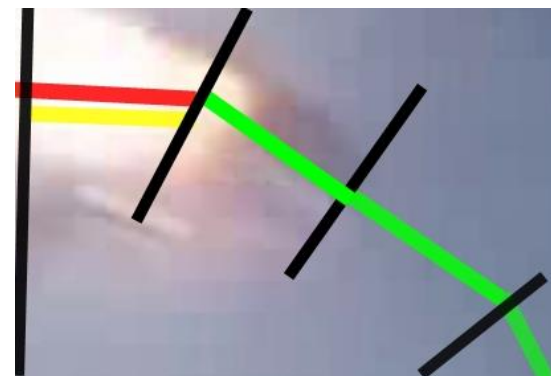
Imatge 34: 4t Frame de la pel·lícula on s'indica l'altura íntegra de l'actor en verd.

Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)



Imatge 35: 5è Frame de la pel·lícula on s'indica una part de l'altura de l'actor en groc (i l'altura en vermell).

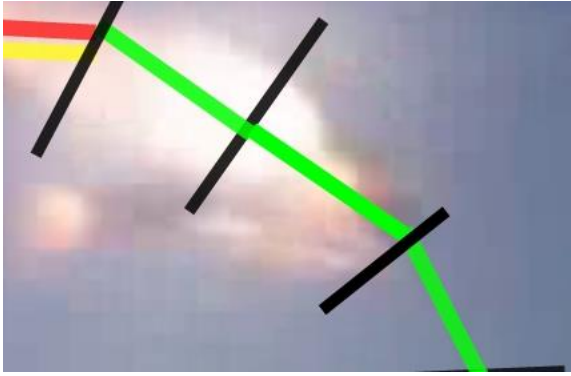
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)



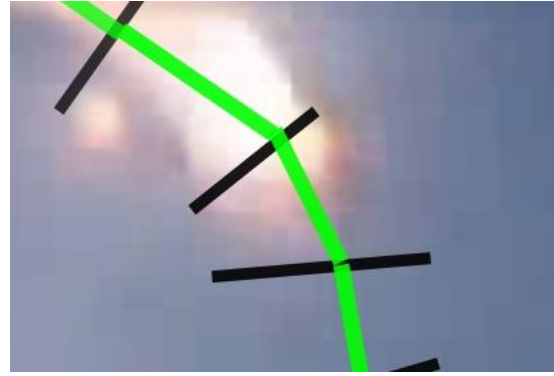
Imatge 36: 6è Frame de la pel·lícula on s'indica l'altura íntegra de l'actor en verd.

Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)

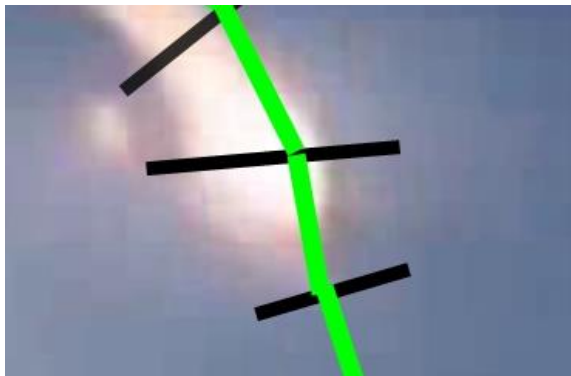
Iron Man: La ciència de la ciència-ficció



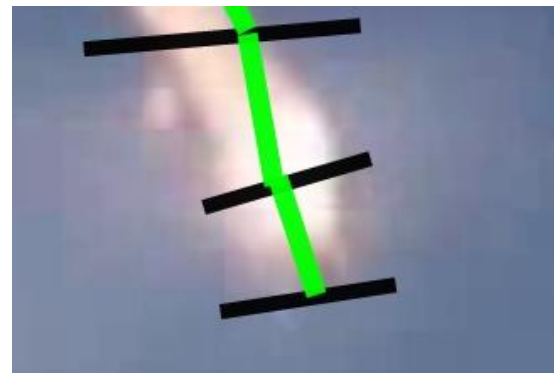
*Imatge 37: 7è Frame de la pel·lícula on s'indica una part de l'altura de l'actor en groc (i l'altura en vermell).
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)*



*Imatge 38: 8è Frame de la pel·lícula on s'indica l'altura íntegra de l'actor en verd.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)*

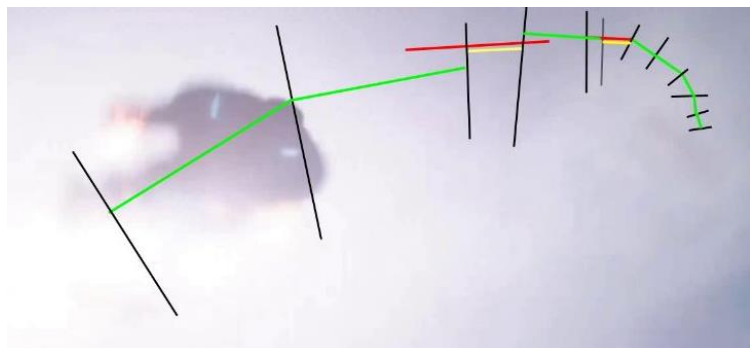


*Imatge 39: 9è Frame de la pel·lícula on s'indica l'altura íntegra de l'actor en verd.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)*



*Imatge 40: 10è Frame de la pel·lícula on s'indica l'altura íntegra de l'actor en verd.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)*

El següent QR permet visualitzar l'escena amb la trajectòria i les diferents mesures fixades. En aquest cas, la seqüència ha estat reduïda a un 15% de la seva velocitat inicial per tal de facilitar-ne la visualització (1 segon en el vídeo original passen a ser 6.66 segons en el vídeo modificat).



*Imatge 41: Escena analitzada amb les diferents alçades fixes i QR de visualització del vídeo.
Font: Marvel Studios i QR propi*

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

Observant aquestes imatges es pot comprovar que la distància recorreguda es compon per 8 alçades íntegres (verdes) i dues alçades parcials (grogues). Per calcular aquestes alçades parcials s'ha de mesurar la distància en perspectiva relacionant dues mesures conegudes (una vertical i l'altre horitzontal). Com a mesura vertical es pren l'alçada de l'actor (174 cm) i en canvi, com a horitzontal s'utilitza l'amplada de les seves espatlles calculada amb Kinovea a partir de la imatge filmogràfica 5 (de la qüestió anterior):

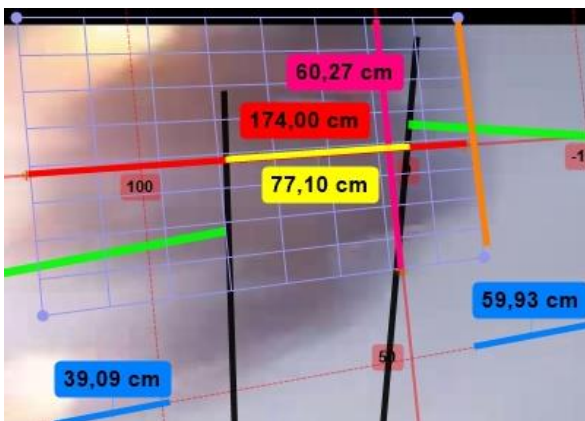
Com es pot veure a la imatge de la dreta l'amplada d'Iron Man és de 60.27 cm.



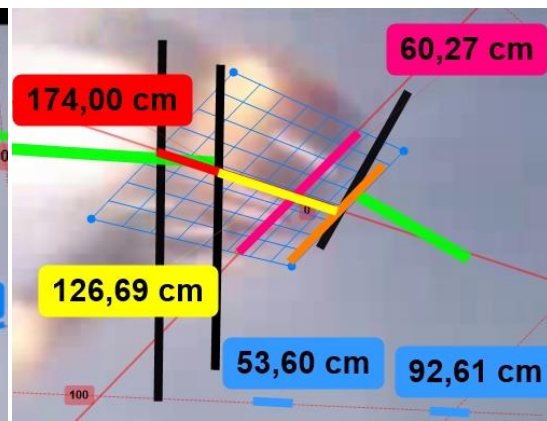
*Imatge 42: Càlcul de l'amplada d'Iron Man.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)*

A partir d'aquestes dues mesures es pot establir la perspectiva de les imatges on s'indica una alçada parcial (Imatges 33 i 35). A les dues imatges inferiors es poden comprovar les mesures parcials mesurades a partir de l'establiment de la respectiva perspectiva. Com es pot veure, a les dues imatges s'indica l'existència de la perspectiva a partir de les dues rectes blaves col·locades a la part inferior. Aquestes rectes tenen la mateixa mesura però el programa indica que en perspectiva són dues mesures diferents.

La mesura indicada a la primera imatge és de 77.10 cm. En canvi, la segona imatge indica que la segona mesura és de 126.69 cm.



*Imatge 43: Demostració de la mesura parcial de la imatge 33 a partir de la perspectiva.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)*



*Imatge 44: Demostració de la mesura parcial de la imatge 35 a partir de la perspectiva.
Font: Pròpia (Imatge de "Marvel Studios" modificada)*

Finalment només resta sumar les diferents alçades per tal de determinar la distància recorreguda:

$$\Delta x = 8 \text{ altures} + \text{altura parcial 1} + \text{altura parcial 2}$$

$$\Delta x = 8 \cdot 174 \text{ cm} + 77.10 \text{ cm} + 126.69 \text{ cm} = 1595.79 \text{ cm}$$

$$\Delta x = 15.9579 \text{ m}$$

La velocitat inicial no es pot calcular a partir de la seqüència seleccionada. Tot i això, el que sí que es pot determinar és que la velocitat inicial d'Iron Man és equiparable amb la velocitat que té la càmera (a l'inici de l'escena Iron Man no s'allunya del nostre punt de vista i, per tant, la seva velocitat és la mateixa que la de la càmera).

Amb tot l'anàlisi realitzat es poden determinar les següents afirmacions que poden ajudar a determinar la supervivència de l'usuari de l'armadura:

- El reactor genera 3GW.
- L'ús del reactor enverina lentament a l'usuari.
- Tony Stark arriba a tenir una toxicitat de la sang d'un 53%.
- La ingesta de clorofil·la i la injecció de diòxid de liti disminueixen els símptomes de l'enverinament.
- El nou element atura l'enverinament.

Pel que fa a l'escena analitzada, les dades recollides són les següents:

- L'increment de temps és de 0.26 segons.
- La distància recorreguda és de 15.9579 metres.
- La velocitat inicial d'Iron Man és igual a la velocitat de la càmera.

3.2.2. Antecedents i investigacions científiques prèvies.

Per tal de resoldre la Qüestió 2, els antecedents es basen en la recerca d'informació referent als conceptes anteriors. Concretament, la investigació es centra en aquests punts:

- Definir la toxicitat a la sang i la seva relació amb el pal·ladi i amb la radiació.
- Explicar què són la clorofil·la i el diòxid de liti.
- Identificar els nivells de radiació perillosos per una persona i els seus efectes.
- Trobar les característiques principals dels materials absorbeixen més radiació.
- Explicar les definicions i fórmules corresponents a l'acceleració, força G i inèrcia.

Què és la toxicitat a la sang i quina és la seva relació amb el pal·ladi i amb la radiació?

La toxicitat a la sang és la afectació de les diverses cèl·lules que es troben a la sang. Els agents hemotòxics són substàncies que produeixen un efecte nociu en el sistema hematopoètic⁵⁷. Aquestes substàncies influeixen en el transport d'oxigen a la sang, en la hemostàsia⁵⁸, en la composició de la sang i en els enzims⁵⁹.

El pal·ladi és un metall amb molt poca toxicitat i els nivells ingerits han de ser molt elevats per tal d'arribar a afectar l'organisme.

El teixit hematopoètic és el més sensible a les radiacions. Concretament, les cèl·lules mare de la medul·la òssia, precursoras de les cèl·lules de la sang, són les més sensibles als efectes radioactius. En canvi, les cèl·lules de la sang són més resistents. No obstant, aquestes cèl·lules reflecteixen els danys produïts en la medul·la òssia. La malaltia que reflecteix la desaparició de les cèl·lules mare de la sang s'anomena aplàsia medul·lar.

Què són la clorofil·la i el diòxid de liti?

La clorofil·la és una biomolècula rellevant en el procés de fotosíntesi de les plantes. Aquesta molècula té propietats antioxidants (capaç de neutralitzar els efectes negatius dels radicals lliures⁶⁰ de l'organisme), depuratives (capaç d'eliminar algunes toxines químiques i naturals que es troben a la sang i a l'organisme) i possibles propietats anticancerígenes (alguns estudis semblen indicar que la clorofil·la disminueix el creixement de les cèl·lules cancerígenes). Sobretot, la clorofil·la destaca per ser un dels millors quelants⁶¹ naturals. És a dir, és un dels millors depuradors de metalls pesants.

També, en algunes ocasions s'ha especulat que, com que la clorofil·la té una estructura química similar a la de l'hemoglobina, podria tenir la mateixa funció, la de transportar oxigen per la sang. No obstant, això no ha estat comprovat.

El terme de diòxid de liti utilitzat en la pel·lícula no és correcte. La formulació literal d'aquest compost seria LiO_2 i la nomenclatura correcta seria superòxid⁶² de liti. Aquest compost és estable només a 15-40 K (l'equivalent a -258°C i a -

⁵⁷ Sistema que compon la medul·la òssia, la sang, els ganglis limfàtics, la melsa i el tim. En conjunt, és el sistema encarregat de la formació de la sang.

⁵⁸ Procés que realitza l'organisme per aturar qualsevol hemorràgia sanguínia.

⁵⁹ Substàncies orgàniques que acceleren les reaccions químiques.

⁶⁰ (radicals lliures) Àtoms o molècules molt reactius que es combinen amb facilitat amb altres àtoms o molècules.

⁶¹ Producte químic amb la propietat de combinar-se amb ions metàl·lics formant un complex estable i "contrarestant" la seva toxicitat.

⁶² Combinació d'un metall amb el grup O_2^{-1} .

233°C respectivament). Dos d'aquests compostos (2LiO_2) reaccionen formant peròxid⁶³ de liti i oxigen ($\text{Li}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$).

Quins són els nivells de radiació perillosos per una persona? Quins efectes produeixen en l'organisme?

Les radiacions tenen suficient energia per afectar els àtoms de les cèl·lules vives i, com a conseqüència, danyar-ne el material genètic. Els nivells de radiació captada pels humans es poden quantificar en sieverts.

Un sievert és una unitat de mesura que equival a 1 joule de radiació partir per 1 kg i que porta el nom de Rolf Maximilian Sievert, un metge físic suec reconegut pel seus estudis en el mesurament de radiació i la investigació en els seus efectes biològics. Aquesta unitat reflecteix el dany biològic que té les radiacions i té en compte el tipus de radiació i la sensibilitat dels teixits que es troben en exposició.

L'equació corresponent per calcular la dosis absorbida equivalent (en Sv) és la següent:

$$H(\text{Sv}) = D(\text{Gy}) \cdot w_R$$

En que H és la dosis absorbida equivalent, D és la dosis absorbida en grays⁶⁴ i w_R és una constant (que varia segons el tipus de radiació) que indica l'eficàcia biològica relativa (RBE).

La següent taula^{xi} indica l'eficàcia biològica de les radiacions més comunes:

Tipus de radiació	w_R
Raigs X, Radiació gamma (γ), electrons, positrons i muons.	1
Protons	2
Neutrons	5
Partícules alfa (α), productes de la fissió nuclear i nuclis atòmics pesants.	20

Taula 2: Taula que indica l'eficàcia biològica segons les diferents tipus de radiació.
Font: Pròpia (dades extretes de la referència xi)

Per calcular la dosis absorbida (D) és necessària una altra equació en que E és l'energia de radiació i m és la massa:

$$D(\text{Gy}) = \frac{E (\text{J})}{m (\text{kg})}$$

⁶³ Combinació d'un metall (o d'hidrogen) amb el grup O_2^{2-} .

⁶⁴ Unitat de mesura d'absorció de radiació que no té en compte el seu efecte en els éssers vius.

Com ja s'ha esmentat anteriorment, la radiació afecta principalment a la medul·la òssia i la seva incapacitat de generar noves cèl·lules sanguínies provoca la majoria de les morts per radiació. Tot i això, la gravetat dels efectes depèn del temps d'exposició i la dosi de radiació.

Els símptomes en els humans en relació a les dosis equivalents acumulades en un dia es poden apreciar en aquesta taula^{xi}:

Quantitat de Radiació en un dia	Símptomes
0-0.25 Sv	Cap símptoma.
0.25-1 Sv	Nàusees lleus, anorèxia i danys en el sistema hematopoètic (medul·la òssia, ganglis limfàtics i melsa).
1-3 Sv	Nàusees agudes, pal·lidesa, anorèxia, infecció i pèrdua més severa de la medul·la òssia. Recuperació probable.
3-6 Sv	Nàusees severes, hemorràgies, infecció, diarrea, descamació (caiguda de la capa superficial de la pell), esterilitat i mort inevitable si no es fa cap tractament.
6-10 Sv	Símptomes de l'apartat (3-6 Sv) i deteriorament del sistema nerviós central. Mort probable.
Més de 10 Sv	Tots els símptomes anteriors, paràlisis i mort inevitable.

Taula 3: Taula que indica els símptomes segons les diferents quantitats de radiació absorbides en un dia (en Sv).

Font: Pròpia (dades extretes de la referència xi)

Trobar les característiques principals dels materials que absorbeixen més radiació.

Els materials que més absorbeixen la radiació gamma (que és la més penetrant) són aquells que tenen un nombre atòmic molt elevat. Per descomptat, aquests materials han de ser molt estables per així no ser fissionats al atrapar els productes resultants de la reacció. Com més gran sigui l'energia de radiació, més gruixut haurà de ser el material que la retindrà.

Els materials utilitzats es classifiquen i mesuren a partir del gruix necessari per tal de reduir la intensitat de radiació gamma a la meitat. Aquesta mesura s'anomena *Half Value Layer*. Per exemple, una radiació gamma requereix 1 cm de plom per reduir la seva intensitat a la meitat, en canvi, es necessita 6 cm de formigó per obtenir el mateix efecte.

Explicar les definicions i fórmules corresponents a l'acceleració, força G i inèrcia.

L'acceleració és una magnitud física que indica la variació de la velocitat d'un cos relacionant-la amb el temps. Per tant, indica la rapidesa de

l'augment/disminució de la velocitat del moviment o el canvi de la direcció del moviment (per exemple, en l'acceleració centrípeta).

En cinemàtica⁶⁵, l'acceleració instantània es calcula com la derivada del vector velocitat respecte el temps:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Tenint en compte que la velocitat és la derivada de la posició respecte el temps ($\vec{v} = \frac{d\vec{x}}{dt}$) l'acceleració també es pot calcular com la segona derivada de la posició respecte el temps.

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{x}}{dt^2}$$

Al integrar i relacionar les dues primeres fórmules esmentades es pot deduir la següent expressió:

$$x = x_0 + v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2$$

La força gravitacional equivalent o força g és una mesura d'acceleració que relaciona l'acceleració que pateix un cos amb l'acceleració que produiria el camp gravitatori terrestre en aquest objecte si es trobés a la superfície terrestre (valor que es coneix com a 9.81 m/s² segons la Llei de la gravitació universal d'Isaac Newton). És a dir, la força g determina quantes vegades un cos està experimentant la força de la gravetat. Per tant, 1 g és equivalent a 9.81 m/s² i 10g equivaldrien a 98.1 m/s² (10 · 9.81).

Aquesta acceleració s'anomena força (encara que tècnicament no ho sigui) perquè indica quantes vegades estàs experimentant la força del teu pes. Per exemple, el cos d'una persona que rep una acceleració de 3 g està suportant una força equivalent a 3 vegades el seu pes.

La tolerància humana a l'acceleració depèn de la magnitud i direcció de la força g, del temps i de la postura corporal. Fins a cert grau, aquesta tolerància a les forces g es pot millorar a partir d'un entrenament adequat, havent-hi una considerable variació entre diversos individus.

Segons dades de la NASA i la USAF⁶⁶, les forces g aplicades verticalment són més perilloses que les aplicades horitzontalment perquè, quan una persona

⁶⁵ Branca de la mecànica que estudia les lleis del moviment dels cossos sense tenir en compte les causes que el produeixen.

⁶⁶ United States Air Force (Força Aèria dels Estats Units).

pateix una *upward g* (acceleració vertical positiva), la sang del seu cos no pot arribar correctament al cervell (es concentra en les extremitats inferiors). Una persona no entrenada pot suportar fins a 5 g verticals sense perdre el coneixement però amb l'ús de vestimenta especialitzada en forces g i entrenament, alguns pilots d'avió poden arribar a 9 g.

A mesura que les forces g verticals augmenten, l'individu pateix (ordenadament) els següents símptomes:

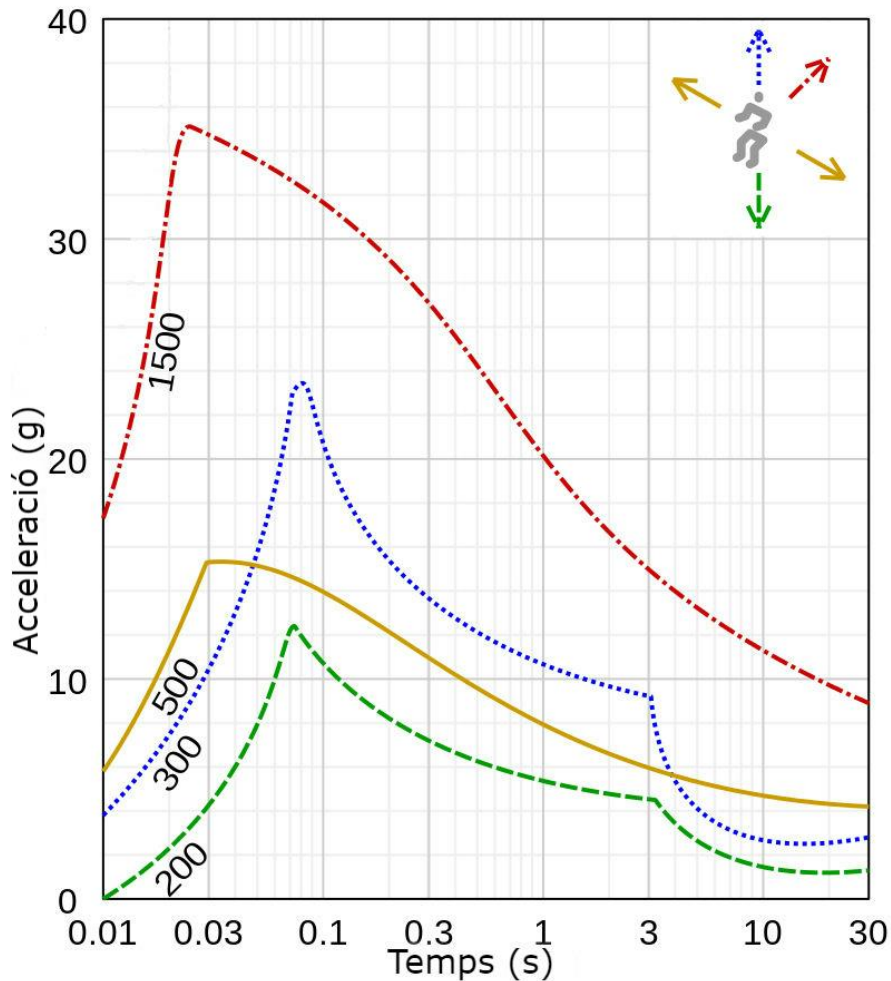
- Pèrdua de nitidesa visual (*Greyout*).
- Pèrdua de la visió perifèrica (*Tunnel Vision*).
- Pèrdua total de la visió causada per la falta de sang al cervell (*Blackout*).
- Pèrdua de la consciència (*G-LOC*).
- Mort.

En canvi, les *downward g* (forces g verticals negatives) provoquen que la sang es centri el cervell, provocant la mínima resistència a l'acceleració. El límit es troba normalment entre -2 g i -3 g. Quan es supera aquest límit, es produeix un *red out* (en comptes d'un *blackout*) i la visió "s'enrogeix" a causa del desplaçament de la parpella inferior carregada de sang cap al camp de visió. A més a més, els vasos sanguinis del cervell i dels ulls poden inflar-se o esclatar amb l'augment de la pressió arterial provocant ceguesa parcial o total.

Els humans poden suportar més acceleració quan les forces g són horitzontals (laterals, frontals i dorsals). Diferents proves realitzades per la USAF indiquen que el cos humà suporta 20 g en 10 segons, 10 g en 1 minut i 6 g en 10 minuts sense cap mena de danys o complicació per dur a terme funcions cognitives. La persona que ha suportat més força g i ha sobreviscut és el pilot de Fórmula 3 Kenny Bräck quan l'any 2003 va tenir un greu accident que va fer que assolís una acceleració de 214 g.

Els símptomes de les forces g horitzontals són iguals als dels verticals excloent-hi el *blackout* i el *red out*.

La següent gràfica indica les forces g màximes que pot suportar una persona no entrenada segons el temps i la direcció de la força. El sentit de la força és indicada a la part superior dreta amb diferents colors: el blau i el verd fan referència a les forces g verticals i, en canvi, el groc i el vermell fan referència a les diferents forces g horitzontals.



Imatge 45: Gràfica semilogarítmica que indica l'acceleració màxima en g que pot suportar una persona humana segons el temps i la direcció.

Font: Robert V. Brulle

Engineering the Space Age: A Rocket Scientist Remembers, (2008)

Segons la Primera llei de Newton (o principi d'inèrcia), un cos lliure sobre el qual no actua cap força (o el sumatori de totes les forces aplicades en el cos és 0) manté el seu estat de moviment, ja sigui en repòs o en moviment rectilini uniforme.

La Segona llei de Newton (o llei fonamental de la dinàmica) explica que tot cos sobre el qual s'hi actua una força es mou de tal manera que el sumatori de les seves forces és igual al producte de l'acceleració per la massa del cos. Per tant, l'equació que fa referència a aquesta llei és la següent:

$$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

En que $\Sigma \vec{F}$ és el sumatori de forces, m la massa del cos i \vec{a} l'acceleració.

En mecànica clàssica, qualsevol força aplicada a un cos realitza un treball quan hi ha un desplaçament del cos en la direcció de la força. Aquest treball és equivalent a l'energia necessària per desplaçar el cos. Per tant, el treball (o l'energia) es pot calcular amb la següent fórmula:

$$W = F \cdot d \cdot \cos\alpha$$

En que W és el treball, F la força, d el desplaçament i α l'angle entre els dos últims.

3.2.3. Estudi pràctic/comparatiu.

Aquest apartat es centra en relacionar les diferents lleis i coneixements previs recollits en els antecedents científics per determinar si un individu podria arribar a sobreviure en cas d'utilitzar l'armadura de Tony Stark.

Mort per intoxicació de pal·ladi?

Anteriorment s'ha esmentat que el pal·ladi és un material poc tòxic en els éssers humans. Tot i això, s'ha de puntualitzar que aquesta afirmació fa referència a la toxicitat provocada per la seva ingesta. En aquest cas, la intoxicació per pal·ladi que pateix Stark no és provocada per la seva ingesta sinó pel fet de tenir-lo a dintre de l'organisme. És de suposar que això podria arribar a afectar a l'individu amb molta més intensitat i que la mort per intoxicació de pal·ladi fos molt més probable.

A més a més, el desgast del pal·ladi (concepte tractat a la qüestió anterior) podria provocar l'augment de la dispersió nociva de l'element pel cos (i pel corrent sanguini). També s'ha de puntualitzar que, a la pel·lícula, el reactor (i el pal·ladi) es col·loca en el centre del seu pit, molt a prop del cor (òrgan encarregat de distribuir la sang.) Això podria provocar que l'absorció de la substància tòxica a la sang fos més ràpida.

Efectivitat de la clorofil·la i el superòxid de liti com a reductors de símptomes:

La clorofil·la podria arribar a eliminar algunes restes de pal·ladi i ajudar mínimament a reduir els símptomes ja que en els antecedents s'ha indicat que té propietats depuradores (és un quelant).

No obstant, la injecció de superòxid de liti no estaria justificada perquè el compost hauria d'estar a menys de -230°C i això, lluny de reduir els símptomes de l'enverinament, provocaria una hipotèrmia greu a l'individu.

Mort per radiació?

A l'apartat anterior s'ha deixat constància que el reactor és nuclear i que aquest produeix radiació. Les cèl·lules de la sang són molt resistents a aquesta radiació

però la medul·la és un dels teixits més vulnerables del cos. La sang reflecteix el dany produït a les cèl·lules mare de la medul·la i, per tant, la radiació del reactor augmentaria la vulnerabilitat del cos a la toxicitat del pal·ladi (esmentada anteriorment).

Ara bé, per argumentar aquesta afirmació s'ha de calcular la quantitat de sieverts que el cos absorbiria si s'utilitzés el reactor i comparar-la amb la taula 3. Per començar s'ha de calcular l'energia captada per l'organisme. En aquest cas no es sap l'energia exacta que Iron Man absorbeix però podem comprovar què passaria si, de manera molt generosa (teòricament possible però pràcticament impossible), donem per fet que les pèrdues energètiques per radiació són del 0.01%.

A la taula 3 (pàg.62) s'indica que els efectes es corresponen a quan la radiació indicada és absorbida en un dia. El reactor d'Iron Man funciona de manera continuada (les 24 hores del dia en funcionament) perquè, com s'ha explicat a l'inici del treball, permet que Tony Stark segueix-hi viu (impedeix que la metralla del seu pit arribi als òrgans vitals).

Com que:

$$P = 3GW \quad P = \frac{E}{t} \quad t = 24 \text{ hores} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1h} = 86400 \text{ s}$$

Aleshores es pot calcular l'energia total (E_t):

$$E_t = P \cdot t = 3 \cdot 10^9 \cdot 86400 = 2.592 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

A partir d'aquesta dada es pot determinar i sabent que:

$$E_{\text{radiació}} = 0.01\% \cdot E_{\text{total}}$$

Es pot calcular l'energia de radiació produïda en un dia (E_R):

$$E_R = \frac{0.01}{100} \cdot 2.59 \cdot 10^{14} = 2.592 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

Segons dades proporcionades per Marvel Entertainment, Tony Stark té una massa de 185 lbs.

Com que:

$$m = 185 \text{ lbs} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lbs}} = 83.92 \text{ kg} \quad E_R = 2.592 \cdot 10^{10} \text{ J} \quad D = \frac{E}{m}$$

Llavors la dosi absorbida és la següent:

$$D = \frac{2.592 \cdot 10^{10}}{83.92} = 3.089 \cdot 10^8 Gy$$

Aquest valor s'ha de relativitzar al tipus de radiació amb el càlcul de dosi absorbida equivalent (H). En el cas d'Iron Man l'elecció de les partícules radioactives seran determinades a partir de les conclusions de la 1a Qüestió. El reactor que encaixava més amb les descripcions fetes a les pel·lícules és el d'electròlisi (fusió freda) que desprèn partícules alfa (àtoms d'heli). A la taula 2 (pàg. 61) es pot veure com la constant d'eficàcia biològica relativa de les partícules alfa és 20.

Com que:

$$D = 3.089 \cdot 10^8 Gy \quad w_R = 20 \quad H = D \cdot w_R$$

Aleshores es pot determinar la dosi absorbida equivalent per a un ésser humà:

$$H = 3.089 \cdot 10^8 Gy \cdot 20 = 6.18 \cdot 10^9 Sv$$

Finalment, per determinar si l'usuari sobreviuria falta comparar els valors de la taula 3 (pàg. 62) amb el valor obtingut. Com es pot observar, la taula no sobrepassa les desenes (a partir de 10 Sv s'indica la mort segura) i, en canvi, la dosi absorbida obtinguda arriba als milions. Per tant, l'usuari de l'armadura d'Iron Man moriria inevitablement per radiació segons les dades proporcionades per Marvel Entertainment.

Viabilitat de l'absorció de radiació amb el nou material:

El nou element creat per Tony Stark seria molt pesant i tindria un nombre atòmic molt elevat (com s'ha argumentat a la 1a qüestió). Aquestes característiques es poden arribar a relacionar amb les característiques principals dels elements que absorbeixen més radiació (els materials més pesants capten més radiació).

No obstant, ja s'ha mencionat que el nou element creat per Tony Stark seria molt inestable i qualsevol pertorbació en els seus nuclis atòmics (com l'absorció de radiació) en provocaria l'escissió. Per tant, es pot determinar que el nou element no serviria com a material d'absorció de radiació, sinó com a probable element emissor de radiació.

Mort per acceleració sobtada?

Com s'ha explicat anteriorment, l'experimentació de forces g molt elevades pot provocar la pèrdua de coneixement i la mort de la persona a la qual se li apliquen aquestes acceleracions.

En aquest cas, s'estudia els efectes que tindria l'acceleració en el cos de Tony Stark durant l'escena filmogràfica seleccionada en l'anàlisi de la filmografia.

La tolerància humana a les forces g varia segons la magnitud, la direcció d'aplicació, el temps i la postura corporal. A la seqüència escollida, es pot apreciar com l'acceleració s'aplica de manera vertical (positiva) a Stark i que la seva postura corporal en el moment d'acceleració és en bipedestació⁶⁷ (sense estar en contacte amb el sòl). Amb l'anàlisi amb Kinovea s'ha pogut obtenir el temps (0.26 s) i, per tant, l'únic factor que falta per determinar és la magnitud.

Aquesta dada (el mòdul de l'acceleració) es pot calcular a partir de les fórmules establides anteriorment i les dades obtingudes amb l'anàlisi de l'escena:

Com que:

$$\Delta x = 15.9579 \text{ m} \quad \Delta t = 0.26 \text{ s} \quad \Delta x = v_0 \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2$$

Llavors tenim que:

$$15.9579 = v_0 \cdot 0.26 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot 0.26^2$$

En aquesta equació tenim dues incògnites, per tant, no és possible calcular l'acceleració. Tot i això, el que si sabem de l'anàlisi anterior és que la velocitat inicial d'Iron Man (v_0) és igual a la velocitat de la càmera (constant en tot el recorregut). Com es pot veure, la part " $v_0 \cdot \Delta t$ " de la fórmula utilitzada fa referència a la distància que el cos hauria recorregut si no hagués accelerat el seu moviment. Per tant, al calcular l'increment de distància a la seqüència ja s'ha tingut en compte aquesta part de l'equació i es pot suprimir (perquè la pròpia càmera ja ha recorregut la distància que hauria fet el cos sense accelerar). Finalment, l'acceleració quedarà així:

$$a = \frac{2 \cdot 15.9579}{0.26^2} \quad a = 472.127 \text{ m/s}^2$$

La força g equivalent és la següent:

$$472.127 \text{ m/s}^2 \cdot \frac{1 \text{ g}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 48.13 \text{ g}$$

La magnitud resultant són 48.13 g. Com es pot comprovar a la gràfica de la Imatge 49 (pàg.63) quan les forces són verticals (línia blava) i s'aplica durant aproximadament 0.26 s, la tolerància màxima en humans és de 14 g.

⁶⁷ Postura en que la columna vertebral es troba alineada verticalment i l'individu es sosté amb el terra partir de les seves extremitats inferiors.

Per tant, es pot afirmar que, en aquesta escena, l'individu que utilitzés l'armadura experimentalment progressivament un *greyout*, *tunnel vision*, *blackout* i pèrdua de consciència. A més a més, el pilot de l'armadura no sobreviuria a la força g (moriria).

Mort per radiació durant la seqüència?

Anteriorment s'ha demostrat que la segons les dades proporcionades per les pel·lícules, Tony Stark moriria inevitablement per radiació. No obstant, a la 1a qüestió ja s'ha comentat que el valor de la potència donada pels guionistes és desorbitat.

Per aconseguir un valor més aproximat al que el reactor hauria de tenir realment es poden utilitzar les dades aconseguïdes anteriorment i calcular, en aquest ordre, la força, el treball (energia) i la potència necessàries durant l'escena escollida.

Segons Marvel, el conjunt de Tony Stark i armadura té una massa de 425 lbs.

Com que:

$$m = 425 \text{ lbs} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lbs}} = 192.78 \text{ kg} \quad a = 472.127 \text{ m/s}^2$$

$$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Aleshores es pot calcular la força necessària per accelerar l'armadura durant la seqüència seleccionada:

$$F = 192.78 \cdot 472.127 = 9.1 \cdot 10^4 \text{ N}$$

A partir d'aquesta dada es pot determinar l'energia necessària durant tota l'escena. A la seqüència es pot observar com les direccions i sentits de la força i del desplaçament són iguals, per tant, formen un angle de 0° . A més a més, el desplaçament és el valor trobat anteriorment a l'anàlisi de la filmografia.

Com que:

$$W = F \cdot d \cdot \cos\alpha \quad \alpha = 0^\circ \quad F = 9.1 \cdot 10^4 \text{ N} \quad d = 15.9579 \text{ m}$$

Llavors, es pot calcular l'energia (treball):

$$E = W = 9.1 \cdot 10^4 \cdot 15.9579 \cdot \cos 0 = 1.45 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Tot i no ser necessari, també es pot calcular la potència que hauria de tenir el reactor en aquesta escena i comparar-la amb la dada proporcionada pels guionistes de la pel·lícula:

Com que:

$$P(\text{anàlisi}) = \frac{E(\text{anàlisi})}{t(\text{anàlisi})} \quad P(\text{pel} \cdot \text{lícula}) = 3 \text{ GW}$$

$$E(\text{anàlisi}) = 1.45 \cdot 10^6 \text{ J} \quad t(\text{anàlisi}) = 0.26 \text{ s}$$

Aleshores, es poden calcular la potència a l'escena (anàlisi) i la relació (en percentatge) entre la potència de l'anàlisi i la potència a la pel·lícula:

$$P(\text{anàlisi}) = \frac{1.45 \cdot 10^6}{0.26} = 5.58 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$\frac{P(\text{anàlisi})}{P(\text{pel} \cdot \text{lícula})} = \frac{5.58 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^9} = 1.86 \cdot 10^{-3} = 0.186\%$$

Com es pot observar la potència necessària durant l'escena és només un 0.186% de la potència donada pels guionistes a la pel·lícula (unes 537 vegades menys).

A més a més, s'ha de tenir en compte que la potència trobada seria una de les més grans a la que el reactor hauria de poder arribar perquè l'escena escollida mostra un dels moments en que es necessita major potència per a fer funcionar l'armadura (quan es troba en repòs l'energia necessària és molt menor). Amb aquesta dada es torna a evidenciar que la potència esmentada a la pel·lícula és molt desorbitada.

A continuació, queda calcular quina seria la dosis de radiació absorbida en un dia. En aquest cas, també donarem per fet que l'energia de radiació és un 0.01% de l'energia necessària per fer l'acceleració i que la radiació acumulada en un dia serà la mateixa que l'absorbida durant la seqüència (com si es volgués determinar la supervivència de l'usuari si aquest utilitzés l'armadura durant l'escena i després la deixés d'utilitzar).

Com que:

$$E_{\text{total}} = 1.45 \cdot 10^6 \text{ J} \quad E_{\text{radiació}} = 0.01\% \cdot E_{\text{total}}$$

Llavors, es pot calcular la radiació en un dia (E_R):

$$E_R = \frac{0.01}{100} \cdot 1.45 \cdot 10^6 = 145 \text{ J}$$

La radiació acumulada en un dia seria de 145 J i la massa de l'usuari seria la de Tony Stark 83.92 kg (dada utilitzada anteriorment).

Com que:

$$m = 185 \text{ lbs} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lbs}} = 83.92 \text{ kg} \quad E_R = 145 \text{ J} \quad D = \frac{E}{m}$$

Llavors la dosis absorbida és la següent:

$$D = \frac{145}{83.92} = 1.73 \text{ Gy}$$

Aquest valor s'ha de relativitzar al tipus de radiació amb el càlcul de dosis absorbida equivalent (H). Com s'ha explicat anteriorment les partícules radioactives utilitzades en el reactor que encaixa més amb les descripcions de la pel·lícula són les alfa. A la taula 2 (pàg. 61) es pot veure com la constant d'eficàcia biològica relativa de les partícules alfa és 20.

Com que:

$$D = 1.73 \text{ Gy} \quad w_R = 20 \quad H = D \cdot w_R$$

Aleshores, es pot determinar la dosis absorbida equivalent per a un ésser humà:

$$H = 1.73 \text{ Gy} \cdot 20 = 34.6 \text{ Sv}$$

Com es pot observar a la taula 3 (pàg. 62), amb una dosis de radiació acumulada en un dia de 34.6 Sv l'usuari de l'armadura moriria inevitablement al realitzar l'acceleració de l'escena.

Mort per inèrcia?

En el cas que l'usuari arribés a sobreviure a la força g i a la radiació, seria impossible que sobrevisqués a la inèrcia que tindria el seu cos quan l'armadura desaccelerés sobtadament.

Per explicar-ho d'una manera més entenedora, en aquest cas, la inèrcia es podria comparar al fet que, quan un cotxe frena ràpidament, el nostre cos es veu desplaçat cap endavant i no portar cinturó de seguretat pot arribar a ser mortal.

Tony Stark no té cap mena de "cinturó", és a dir, la seva armadura no consta de cap d'element que freni el seu cos progressivament o que disminueixi la seva acceleració gradualment (i no pot tenir-ne per qüestions d'espai). Per tant, al frenar sobtadament el seu cap es veuria mogut per la inèrcia i arribaria a col·lidir amb gran força contra el casc (en algunes ocasions⁶⁸, es pot apreciar l'interior del casc i veure que el casc no es troba "ajustat" al cap de Tony i com el

⁶⁸ Per exemple a la pel·lícula *Avengers: Infinity War*, en el minut 24:55 (just abans de l'escena seleccionada per a l'anàlisi).

pot moure mínimament) provocant vessament cerebrals i una mort gairebé assegurada.

3.2.4. Conclusions.

En aquest apartat es valoren els diferents resultats de l'estudi pràctic/comparatiu (apartat anterior) i es respon la pregunta proposada inicialment.

Les conclusions s'estructuren en dos nivells segons l'obtenció de dades (i el seu tractament posterior): es pot diferenciar entre informació proporcionada explícitament per Marvel a les pel·lícules i informació que s'ha extret de manera implícita a partir d'una anàlisi més detallat (dades de la seqüència).

Pel que fa als resultats obtinguts de la informació proporcionada per Marvel, es pot determinar que Tony Stark (o l'usuari de l'armadura) moriria a causa de la intoxicació de pal·ladi i els alts nivells de radiació emesos pel reactor. A més a més, també s'ha comprovat que les diferents solucions que es donen a la pel·lícula per resoldre aquests dos problemes no serien del tot efectives.

D'una banda, la clorofil·la podria arribar a reduir mínimament les restes de pal·ladi perquè funciona com a quelant però no evitaria la intoxicació. La injecció de superòxid de liti tampoc serviria per evitar la intoxicació a la sang i, amb tot això, provocaria una hipotèrmia greu a Stark.

D'altra banda, la substitució del pal·ladi per un altre element no aconseguiria evitar l'emissió de radiació. Això sí, el nou material eliminaria la intoxicació de pal·ladi però la substituiria per la intoxicació del "nou material", per tant no tindria sentit perquè seria un material inestable i, probablement, tòxic.

Els resultats obtinguts amb l'anàlisi de les dades implícites (seqüència) demostren la mort segura de l'usuari al realitzar l'acceleració de l'escena. D'una manera o altra, la persona que estigués dintre de l'armadura acabaria morint per les forces g (acceleració sobtada), per la radiació emesa durant el desplaçament o per la inèrcia en aturar el moviment.

Resposta a la pregunta proposada inicialment: En el cas de que existís l'armadura i el reactor, podria sobreviure un humà a dintre l'armadura quan aquesta es trobés en funcionament?

Un humà no podria sobreviure a dintre de l'armadura quan aquesta es trobés en funcionament ja que aquesta opera amb l'ús d'energia que prové d'un reactor nuclear.

El fet d'utilitzar aquest aparell tindria efectes nocius en l'usuari i, tot i haver establert en els càlculs valors de pèrdues energètiques mínimes (gairebé impossibles), no s'ha aconseguit que l'usuari sobrevisqui a la radiació.

A més a més, suposant que la radiació no provoqués la mort de l'usuari, aquest estaria sotmès als efectes provocats per la variació sobtada de velocitat (forces g, inèrcia...) que acabarien provocant la seva mort.

4. CONCLUSIONS GENERALS

Repasant un a un els objectius proposats a l'inici del treball, es pot considerar que tots han estat assolits. Els objectius que es van plantejar van ser:

1. **Identificar els conceptes científics esmentats a les pel·lícules de Marvel referents a Iron Man.** L'assoliment d'aquest objectiu es mostra al llarg dels dos apartats anomenats "Anàlisi de la filmografia" a les pàgines 11 (1a Qüestió) i 52 (2a Qüestió). Això sí, els conceptes indicats fan referència a les dues preguntes plantejades i la informació que no era útil per la investigació ha estat obviada.
2. **Ampliar el meu coneixement sobre els conceptes emprats a partir d'estudis científics ja realitzats.** La realització d'aquest objectiu s'exposa en els apartats "Antecedents i investigacions científiques prèvies" a les pàgines 16 (1a Qüestió) i 59 (2a Qüestió).
3. **Comparar la informació obtinguda a les pel·lícules amb els coneixements científics actuals i determinar les "incongruències o errors" que els guionistes van cometre al escriure les pel·lícules.** La part comparativa s'ha realitzat en els apartats anomenats "Estudi pràctic/comparatiu" de les pàgines 28 (1a Qüestió) i 66 (2a Qüestió). Els errors i incongruències es troben de manera implícita a les diferents conclusions específiques de cada pregunta (pàgines 50 i 73). Segons l'estudi realitzat es pot determinar explícitament que els "errors" científics comesos a les pel·lícules són els següents:
 - 1) Les característiques del Reactor ARC no encaixen amb els diferents tipus de reaccions nuclears actuals (en el cas d'encaixar, la reacció és només teòrica i no ha estat demostrada).
 - 2) La potència del reactor és desmesurada (perquè el valor donat és molt superior a la dels reactors que s'utilitzen per subministrar energia a gran part de la població) i innecessària (perquè a la segona pregunta s'ha demostrat, amb l'anàlisi de la seqüència, que la potència necessària és un 0.186% de l'esmentada a la pel·lícula).
 - 3) El nou element es crea sota condicions imprecises i amb eines inadequades. Tècnicament és molt improbable crear l'element d'aquesta manera.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

- 4) Tony Stark moriria pels efectes de la radiació i la intoxicació que li proporciona el reactor (perquè les solucions esmentades a la pel·lícula ajuden a reduir símptomes però no són suficients per aconseguir la recuperació total d'Stark).
- 5) El nou material creat tampoc serveix com a solució als efectes que rep Stark (no ajudarien a reduir la intoxicació i la radiació perquè seria un material inestable que es desintegraria impossibilitant l'absorció de radiació i provocant, al seu torn, radiació i intoxicació).
- 6) Les grans acceleracions que s'observen a les pel·lícules matarien a Iron Man (a causa de les forces g que actuen sobre Tony Stark durant el seu desplaçament i la força d'inèrcia que rebria al aturar-se sobtadament).

El propòsit global del treball era respondre la següent hipòtesi en forma de pregunta:

Les pel·lícules d'Iron Man són producte de la ficció o tenen una base científica?

Doncs bé, després d'haver realitzat tot l'estudi i haver assolit tots els objectius trobo que es pot efectuar una resposta definitiva, coherent i argumentada:

A partir d'un anàlisi rigorós i científic de la informació exposada sobre Iron Man al MCU, es pot determinar que les seves pel·lícules, tot i utilitzar conceptes molt tècnics en els camps de la física i la tecnologia, no tenen una base científica perquè s'ha demostrat l'existència d'incongruències o "errors" que no segueixen els principis físics i coneixements tecnològics actuals.

Personalment, la realització del treball m'ha aportat molts coneixements científics sobre l'actualitat de la física nuclear, alguns conceptes de tecnologia i, fins i tot, altres de química (com les propietats d'alguns elements) i biologia (com les característiques de la clorofil·la). També, he adquirit la capacitat de pensar, raonar i analitzar d'una manera lògica i rigorosa seguint un mètode establert inicialment.

A més a més, amb aquest treball m'he adonat que la ficció ha d'anar més enllà dels límits de la ciència perquè, d'aquesta manera, les aspiracions personals dels espectadors són més ambiciosos. Per tant, els principis i mètodes no tenen perquè estar justificats a les pel·lícules de manera lògica i coherent (ja que si es justificués, la ficció no superaria els límits de la ciència). El que sí que s'ha de determinar a les pel·lícules són els reptes que es llancen d'una manera captivadora al món científic per augmentar les expectatives i l'afany de recerca i descobriment.

Un exemple molt clar de la influència de la ficció a les aspiracions científiques és el cas de Jules Verne. Aquest escriptor francès es caracteritza per haver-se anticipat al seu temps i haver “predit”⁶⁹ els viatges espacials en la seva obra *De la Terra a la Lluna*, obra publicada l’any 1865 en que s’explica l’aterratge lunar de tres astronautes.

De la mateixa manera, Marvel enfoca la mirada dels seus espectadors cap a un futur en que la tecnologia està tan avançada que permet millorar les aptituds humanes. En certa manera, aquest objectiu ja ha estat assolit, perquè realitzant una recerca breu sobre l’existència de “pròtesis” que s’inspiren en l’armadura d’Iron Man trobaríem una gran varietat d’exoesquelets⁷⁰ que permeten millorar les aptituds militars (Ratnik 3) i la potència muscular (Raytheon Sarcos XOS 2) o, fins i tot, fer volar a l’usuari (Daedalus Mark1).

En un principi, volia que el meu treball fos creatiu i innovador. No sé si ho he aconseguit però, com a mínim, trobo que el resultat obtingut és inèdit i captivador envers als amants de la ciència i de Marvel.

Si se’m donés la possibilitat de tornar a realitzar el treball, el faria de la mateixa manera perquè trobo que el resultat obtingut és satisfactori. Tot i això, també s’ha de puntualitzar que a l’inici del treball m’havia plantejat dues preguntes més que no han pogut ser realitzades a causa de la gran extensió de les altres dues preguntes.

Les dues preguntes no formulades en el treball són les següents:

- És possible crear una armadura com la d’Iron Man que permeti obtenir una força sobrehumana, volar a grans velocitats i protegir-nos de condicionants externs?
- L’armament (sobretot l’ús d’energia concentrada com a arma de foc) utilitzat per Iron Man té una base científica?

Espero que aquest treball encoratgi a altres amants de la ciència i de Marvel a continuar la recerca i aconseguir donar resposta a les preguntes que no s’han pogut realitzar per falta de temps (i per no acabar fent un treball de recerca de 150 pàgines).

⁶⁹ “Predit” s’escriu amb cometes perquè realment Jules Verne no va predir el futur, sinó que va enfocar la mirada científica cap a l’exploració espacial i això va suposar la posterior arribada a la Lluna l’any 1969.

⁷⁰ Màquina mòbil constituïda per una carcassa externa que recorda la forma d’un esquelet humà i ajuda al portador a realitzar activitats diverses.

BIBLIOGRAFIA, WEBGRAFIA I FILMOGRAFIA

ABAD, Marta. *Riscos físics ambientals* (PDF). IOC, 2008.

ANAV (Associació Nuclear Ascó Vandellós II). *Tres reactores de referencia*. ANAV (2019) <http://www.anav.es/es/anav/instalaciones/>

AREF, Lana ; CULLIGAN, Patricia J.; CZERWINSKI, Kenneth R.; NEPF, Heidi M. *Nuclear Energy: the Good, the Bad, and the Debatable Learn more about nuclear Technology, its benefits, and its danger*. Massachusetts Institut of Technology, 2012

AUDI, G.; BERSILLON, O.; BLACHOT, J; WAPSTRA, A.H. *The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties*. NUBASE, 2004.

BALL, Philip. *¿Cuántos elementos químicos faltan por encontrar?* [en línia]. BBC Earth (21 de gener de 2016). https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/01/160117_vert_earth_cuantos_elementos_quimicos_faltan_yv [Consultat: 01/11/2019].

BASHA, Arif. *Iter Assembly* [en línia]. https://focusfusion.org/wp-content/uploads/2017/08/ITER_Model.jpg [Consultat: 19/08/2019].

BEISER, Arthur. *Conceptos de Física Moderna*. Madrid: Ediciones del Castillo, 1965.

BERLINGUETTE, Curtis P.; CHIANG, Yet-Ming; MUNDAY, Jeremy N.; SCHENKEL, Thomas; FORK, David K.; KONINGSTEIN, Ross.; TREVITHICK, Matthew D. *Revisiting the cold case of cold fusion*. Nature: 27 de maig de 2019.

BIGOT, Bernard. *What is ITER?* [en línia]. ITER Organization. (2019). <https://www.iter.org> [Consultat: 30/09/2019].

BRULLE, Robert V. *Engineering the Space Age: A Rocket Scientist Remembers*. USAF. Alabama: Air University Press, 2008.

CARLYLE, Ryan. *How Iron Man's ARC Reactor (Probably) Works*. [en línia]. Gizmodo. (21 de novembre de 2014). <https://gizmodo.com/how-iron-mans-arc-reactor-probably-works-1661613682> [Consultat: 16/08/2019].

CARLYLE, Ryan. *What is the theory/concept behind the "Miniature Arc Reactor" built by Tony Stark? How did it work?* [en línia]. Quora. (9 de juny de 2013) <https://www.quora.com/What-is-the-theory-concept-behind-the-Miniature-Arc-Reactor-built-by-Tony-Stark-How-did-it-work> [Consultat: 24/08/2019].

CENTRE D'INFORMACIÓ DEL "CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR". *Vandellós I*. Consejo de Seguridad Nacional. (23 de setembre de 2005). https://web.archive.org/web/20070615103516/http://www.csn.es/plantillas/frame_nivel1.jsp?id_nodo=1935&&keyword=&auditoria=F

CHERENKOV, Pavel A. *Visible emission of clean liquids by action of γ radiation*. Sant Petersburg: Academy of Science Leningrad, 1967.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

COL-LABORADORS DE AREACIENCIAS. *¿Que es el plasma?* [en línia]. Areaciencias <https://www.areaciencias.com/fisica/plasma.html> [Consultat: 19/08/2019].

COL-LABORADORS DE ENERGIA-NUCLEAR.NET *Barras de control.* [en línia]. Equip de energia-nuclear.net. (28 d'octubre de 2016). <https://energia-nuclear.net/definiciones/barras-de-control.html> [Consultat: 01/10/2019].

COL-LABORADORS DE ENERGIA-NUCLEAR.NET *Què és l'energia nuclear? Fissió nuclear.* [en línia]. Equip de energia-nuclear.net. (15 de març de 2019). <https://ca.energia-nuclear.net/que-es-l-energia-nuclear/fissio-nuclear> [Consultat: 01/10/2019].

COL-LABORADORS DE ESPACIOCIENCIA. *¿Es posible crear un acelerador de partículas como en Iron Man 2* [en línia]. Espacio ciencia (25 de maig de 2010). <https://espaciociencia.com/es-posible-crear-un-acelerador-de-particulas-como-en-iron-man-2/> [Consultat: 28/08/2019].

COL-LABORADORS DE PHYSICS. *How many times does plasma do a full loop tokamak before fusion?* [en línia]. Physics (16 de maig de 2017). <https://physics.stackexchange.com/questions/333151/how-many-times-does-plasma-do-a-full-loop-tokamak-before-fusion> [Consultat: 19/08/2019].

COL-LABORADORS DE PHYSICS. *Why is hydrogen or helium used in nuclear fusion?* [en línia]. Physics (1 de novembre de 2016). <https://physics.stackexchange.com/questions/290154/why-is-hydrogen-or-helium-used-in-nuclear-fusion> [Consultat: 19/10/2019].

COL-LABORADORS DE QUORA. *¿Cuál es material que absorbe más radiación?* [en línia]. Quora (26 de març de 2019). <https://es.quora.com/Cuál-es-material-que-absorbe-más-radiación> [Consultat: 10/11/2019].

COL-LABORADORS DE REDDIT *Iron Man's arc reactor could theoretically work by using Palladium isotopes, how much energy could this produce and how difficult would it be to make?* [en línia]. (2017) https://www.reddit.com/r/askscience/comments/70zcy2/iron_mans_arc_reactor_could_theoretically_work_by/ [Consultat: 24/08/2019].

COL-LABORADORS DE SCIENCEABC. *Why are certain Elements Radioactive?* [en línia]. Science ABC. (2 de febrer de 2019). <https://www.scienceabc.com/pure-sciences/why-are-certain-elements-radioactive-causes-examples.html> [Consultat: 19/09/2019].

COL-LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Acelerador de partículas* [en línia]. Wikipedia. (14 d'agost de 2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Acelerador_de_part%C3%ADculas [Consultat: 28/08/2019].

COL-LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Accelerador de partícules* [en línia]. Wikipedia. (10 de juny de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Acceleradorde_part%C3%ADcules#Funcionament_dels_acceleradors [Consultat: 07/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Agentes hemotóxicos* [en línia]. Wikipedia (20 de setembre de 2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Agentes_hemot%C3%B3xicos [Consultat: 06/11/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Anexo:Isòtops de paladi* [en línia]. Wikipedia (5 de maig de 2018). https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Is%C3%B3tops_de_paladio [Consultat: 20/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Atomic battery* [en línia]. Wikipedia. (12 de setembre de 2019). https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_battery [Consultat: 19/09/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Cold fusion* [en línia]. Wikipedia. (1 d'octubre de 2019). https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_fusion [Consultat: 01/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Control Rod* [en línia]. Wikipedia (17 de setembre de 2019). https://en.wikipedia.org/wiki/Control_rod [Consultat: 20/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Delta ray* [en línia]. Wikipedia. (30 de juliol de 2019). https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_ray [Consultat: 06/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Efecte Seebeck* [en línia]. Wikipedia (3 de setembre de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte_Seebeck [Consultat: 20/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Elèctrode* [en línia]. Wikipedia. (24 d'agost de 2019). <https://ca.wikipedia.org/wiki/El%C3%A8ctrode> [Consultat: 07/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Electrolysis* [en línia]. Wikipedia. (26 de setembre de 2019). <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrolysis> [Consultat: 07/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Energia cinètica* [en línia]. Wikipedia. (15 de maig de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Energia_cin%C3%A8tica [Consultat: 19/08/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Estabilitat del nucli atòmic* [en línia]. Wikipedia (31 d'agost de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Estabilitat_del_nucli_at%C3%B2mic [Consultat: 19/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Fissió nuclear* [en línia]. Wikipedia. (30 d'agost de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Fissi%C3%B3_nuclear [Consultat: 03/09/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Fusión fría* [en línia]. Wikipedia. (8 de juliol de 2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_fr%C3%ADa [Consultat: 01/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Hemostàsia* [en línia]. Wikipedia (21 de setembre de 2018). <https://ca.wikipedia.org/wiki/Hemostàsia> [Consultat: 09/11/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Inducció electromagnética* [en línia]. Wikipedia (24 d'octubre de 2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Inducci%C3%B3n_electr_omagn%C3%A9tica [Consultat: 26/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Iter* [en línia]. Wikipedia. (11 d'agost de 2019). <https://es.wikipedia.org/wiki/ITER#Historia> [Consultat: 19/08/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Lithium Superoxide* [en línia]. Wikipedia (29 de setembre de 2017). https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_superoxide [Consultat: 10/11/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Marvel Entertainment* [en línia]. Wikipedia (17 de setembre de 2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Marvel_Studios [Consultat: 08/11/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Marvel Studios* [en línia]. Wikipedia (5 de novembre de 2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Marvel_Studios [Consultat: 08/11/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Pal·ladi (element)* [en línia]. Wikipedia. (29 d'agost de 2019). [https://ca.wikipedia.org/wiki/Pal%C2%B7ladi_\(element\)](https://ca.wikipedia.org/wiki/Pal%C2%B7ladi_(element)) [Consultat: 06/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Palladium* [en línia]. Wikipedia. (18 d'agost de 2019). <https://en.wikipedia.org/wiki/Palladium> [Consultat: 27/08/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Període de semidesintegració* [en línia]. Wikipedia. (20 de juny de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Per%C3%ADode_de_semidesintegraci%C3%B3 [Consultat: 06/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Radiació* [en línia]. Wikipedia. (3 de setembre de 2019). <https://ca.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3> [Consultat: 19/09/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Radioactivitat* [en línia]. Wikipedia (19 de setembre de 2019). <https://ca.wikipedia.org/wiki/Radioactivitat> [Consultat: 26/10/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Reactor nuclear de fusión* [en línia]. Wikipedia. (15 de novembre de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Reactor_nuclear_de_fusi%C3%B3 [Consultat: 16/08/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Sang* [en línia]. Wikipedia (1 de novembre de 2019). <https://ca.wikipedia.org/wiki/Sang> [Consultat: 09/11/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Sievert* [en línia]. Wikipedia (7 de novembre de 2019). <https://en.wikipedia.org/wiki/Sievert> [Consultat: 10/11/2019].

COL·LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Tokamak* [en línia]. Wikipedia. (25 d'abril de 2019). <https://ca.wikipedia.org/wiki/Tokamak> [Consultat: 19/08/2019].

COL-LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Universo Cinematográfico de Marvel* [en línia]. Wikipedia (8 de novembre de 2019). https://es.wikipedia.org/wiki/Universo_cinematogr%C3%A1fico_de_Marvel [Consultat: 08/11/2019].

COL-LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Voyager 1* [en línia]. Wikipedia (8 d'octubre de 2019). https://ca.wikipedia.org/wiki/Voyager_1 [Consultat: 21/10/2019].

COL-LABORADORS DE WIKIPEDIA. *Wavefront* [en línia]. Wikipedia. (20 de juny de 2019). <https://en.wikipedia.org/wiki/Wavefront> [Consultat: 07/10/2019].

COL-LABORADORS DE WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Fissió nuclear* [en línia]. World Nuclear Association (2016). <https://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/global-number-of-nuclear-reactors.aspx> [Consultat: 03/09/2019].

CREER, Brent Y.; SMEDAL, Harald A.; WINGROVE, Rodney C. *Centrifuge Study of Pilot Tolerance to Acceleration and the Effects of Acceleration on Pilot Performance*. NASA. Moffett Field: NASA Headquarters, 1960.

CREW, Henry. *The Principles of Mechanics*. Charleston: BiblioBazaar, LLC, 2008.

DE SALAS, Paloma. *Las centrales nucleares en España: seis en activo de entre 29 i 36 años de antigüedad*. RTVE (6 d'agost de 2017) <http://www.rtve.es/noticias/20170806/centrales-nucleares-espana-seis-activo-entre-29-36-anos-antiguedad/1592460.shtml> [Consultat: 10/09/2019]

DE JORGE, Judith. *Google intenta resucitar sin éxito la fusión fría*. [en línia]. ABC Ciencia. (28 de maig de 2019). https://www.abc.es/ciencia/abci-google-intenta-resucitar-sin-exito-fusion-fria-201905272136_noticia.html [Consultat: 06/10/2019].

FEIGE, Kevin; ARAD, Avi (producers); FAVREAU, Jon (director). *Iron Man* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2008.

FEIGE, Kevin; ARAD, Avi; HURD, Gale Anne (producers); LETERRIER, Louis (director). *The Incredible Hulk* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2008.

FEIGE, Kevin (producer); FAVREAU, Jon (director). *Iron Man 2* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2010.

FEIGE, Kevin (producer); WHEDON, Joss (director). *Marvel's The Avengers* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2012.

FEIGE, Kevin (producer); BLACK, Shane (director). *Iron Man 3* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2013.

FEIGE, Kevin (producer); WHEDON, Joss (director). *Avengers: Age of Ultron* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2015.

FEIGE, Kevin (producer); RUSSO, Anthony; RUSSO, Joe (directors). *Captain America: Civil War* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2016.

Iron Man: La ciència de la ciència-ficció

FEIGE, Kevin; PASCAL, Amy (producers); WATTS, Jon (director). *Spider-Man: Homecoming* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, Columbia Pictures, Pascal Pictures, 2017.

FEIGE, Kevin (producer); RUSSO, Anthony; RUSSO, Joe (directors). *Avengers: Infinity War* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2018.

FEIGE, Kevin (producer); RUSSO, Anthony; RUSSO, Joe (directors). *Avengers: Endgame* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, 2019.

FEIGE, Kevin; PASCAL, Amy (producers); WATTS, Jon (director). *Spider-Man: Far From Home* [Cinta cinematogràfica]. USA: Marvel Studios, Columbia Pictures, Sony Pictures, 2019.

GALAN, Rafael. *'Iron Man': Stan Lee estaba convencido de que el personaje y el cómic iban a ser un fracaso para Marvel.* [en línia]. Esquire. (30 d'abril de 2019). <https://www.esquire.com/es/actualidad/cine/a26305986/iron-man-marvel-stan-lee-fracaso/> [Consultat: 04/07/2019].

GRAY, Theodore. *Isotope 46.100* [en línia].Element Collection, Inc. <https://periodictable.com/Isotopes/046.100/index2.full.html> (28 d'octubre de 2017). [Consultat: 06/10/2019].

GRAY, Theodore. *Isotope 46.103* [en línia].Element Collection, Inc. . (28 d'octubre de 2017). <https://periodictable.com/Isotopes/046.103/index.html> [Consultat: 06/10/2019].

GRAY, Theodore. *Isotope 46.107* [en línia].Element Collection, Inc. (28 d'octubre de 2017). <https://periodictable.com/Isotopes/046.107/index2.full.html> [Consultat: 06/10/2019].

GRAY, Theodore. *Isotope 46.109* [en línia].Element Collection, Inc. (28 d'octubre de 2017). <https://periodictable.com/Isotopes/046.109/index2.full.html> [Consultat: 06/10/2019].

GRAY, Theodore. *Palladium* [en línia]. Element Collection, Inc. <https://periodictable.com/Isotopes/046/index.full.html> (28 d'octubre de 2017). [Consultat: 06/10/2019].

INTERNET MOVIE DATABASE. *Robert Downey Jr.* IMDb. (2019) https://www.imdb.com/name/nm0000375/?ref=nr_sr_srsq_3m

JET PROPULSION LABORATORY. *Voyager 1* [en línia]. NASA, California Institute of Technology (2013). <https://www.jpl.nasa.gov/missions/voyager-1/> [Consultat: 21/10/2019].

JOSEPH, Joan; HOYOS, Roger; GARRAVÉ, Jaume; GARÓFANO, Francesc; VILA, Francesc. *Tecnologia Industrial 1r Batxillerat*. Aravaca: McGraw-Hill, 2017.

LEE, Stan; LIEBER, Larry; HECK, Don; GOLDBERG, Stan. *Tales Of Suspense #39*. Marvel Comics. New York: Marvel Worldwide, Inc. 1963.

LOBO, Guillermo. *Qué es la aplasia medular y cómo se trata en la actualidad* [en línia]. ConBienEstar (19 d'abril de 2018). https://tn.com.ar/salud/lo-ultimo/que-es-la-aplasia-medular-y-como-se-trata-en-la-actualidad_863696 [Consultat: 06/11/2019].

MACRAE, Michael. *Cold fusion 25 years later* [en línia]. ASME (American Society of Mechanical Engineers). (7 de maig de 2014). <https://www.asme.org/topics-resources/content/cold-fusion-25-years-later> [Consultat: 07/10/2019].

MERWARTH, Ann C.; STONE, Edward C.; BRUNK, William, E.; MASSEY, Ed B. *Voyager 1* [en línia]. California Institute of Technology, NASA Jet Propulsion Laboratory, NASA Headquarters. (5 de setembre de 2019) <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1977-084A>

NAVES, Carl Rod. *Nuclear fusion* [en línia]. Georgia State University's Department of Physics and Astronomy. Hyperphysics (2017). <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fusion.html>

NICHOLS, Al. *Pd-109 tables*. [en línia]. IAEA, International Atomic Energy Agency, 2009. http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Pd-109_tables.pdf

PEREYRA, Jordi *¿Es posible la fusión fría?* [en línia]. CDS. (28 de desembre de 2015). <https://cienciadesofa.com/2015/12/es-posible-la-fusion-fria.html> [Consultat: 06/10/2019].

REDACTORS DE BATERIAFACIL. *Batería AGM Optima YTS 5.5. 12V. 75Ah. 975A. 325x165x238* [en línia]. Bateria Facil. <https://bateriafacil.com/producto/bateria-optima-yts-55/> [Consultat: 13/10/2019].

REDACTORS DE BOTANICAL-ONLINE. *Propiedades de la clorofila* [en línia]. Botanical-online (28 de març de 2019). <https://www.botanical-online.com/productos-naturales/clorofila-beneficios-propiedades> [Consultat: 09/11/2019].

REDACTORS DE CATSA. *Mecánica básica: Batería, esa gran desconocida*. [en línia]. CATSA. (21 d'agost de 2012) <https://amigosdelmotor.com/cambiar-bateria/> [Consultat: 13/10/2019].

REDACTORS DE GOODFELLOW. *Boro (B)* [en línia]. Goodfellow (2019). <http://www.goodfellow.com/S/Boro.html> [Consultat: 20/10/2019].

REDACTORS DE GOODFELLOW. *Cadmio (Cd)* [en línia]. Goodfellow (2019). <http://www.goodfellow.com/S/Cadmio.html> [Consultat: 20/10/2019].

REDACTORS DE GOODFELLOW. *Paladio (Pd)* [en línia]. Goodfellow (2019). <http://www.goodfellow.com/S/Paladio-Metal.html> [Consultat: 20/10/2019].

REDACTORS NUCLEAR POWER. *Uranium 235 Fission*. [en línia]. Nuclear Power (2008). <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/uranium/uranium-235/uranium-235-fission/> [Consultat: 01/10/2019].

REDACTORS DE TERMCAT. *Taula periòdica dels elements* [en línia]. TERMCAT (2016). <https://www.termcat.cat/ca/recursos/productes-multimedia/taula-periodica-dels-elements> [Consultat: 19/10/2019].

RSNA (Radiology Society of North America). *What is radiation dose?* [en línia]. Radiology Info (15 de maig de 2018). https://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?pg=safety-hiw_09 [Consultat: 02/12/2019].

SANCHEZ, Pilar. *Capítulo 4- Conceptos básicos de física nuclear. 49. ¿Qué son las reacciones nucleares?* [en línia]. Foro nuclear (22 de juny de 2010). <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-4/115664-49-ique-son-las-reacciones-nucleares> [Consultat: 27/08/2019].

SANCHEZ, Pilar. *¿Cómo se genera la primera fisión?* [en línia]. Foro Nuclear (16 de maig de 2016). <https://www.foronuclear.org/es/consultas-al-experto/122364-como-se-genera-la-primera-fision> [Consultat: 19/10/2019].

SCALITER, Juan. *La ciencia de los superhéroes*. Barcelona: Robin Book, 2011.

SEGUÍ, Carlos. *Todo sobre baterías y almacenamiento de energía* [en línia]. Barrio la Pineda (15 d'octubre de 2018). https://www.barriolapineda.es/baterias-almacenamiento-energia/#Baterias_ION_Litio_LiCoO2 [Consultat: 12/10/2019].

SERRA, Salvador; ARMENGOL, Montserrat; MERCADÉ, Joan M. *Física 1r Batxillerat*. Aravaca: McGraw-Hill, 2017.

SERRA, Salvador; ARMENGOL, Montserrat; MERCADÉ, Joan M. *Física 2n Batxillerat*. Aravaca: McGraw-Hill, 2018.

SONZOGNI, Alejandro. *NuDat 2.7 database* [en línia]. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. (6 de setembre de 2019). <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=46&n=57>

VANDEN BOUT, David A. *Nuclear Reactions* [en línia]. University of Texas (2013) <http://ch302.cm.utexas.edu/nuclear/nuclear-change/selector.php?name=nuclear-rxns> [Consultat: 28/08/2019].

VERSYP, Teresa. *Los aceleradores de partículas ¿Para qué sirven?* [en línia]. Cuántica, conciencia y cosmología (23 de novembre de 2017). <https://teresaversyp.com/articulos/aceleradores-particulas/> [Consultat: 28/08/2019].

(Dr.) VILANOVA, Joan Carles. *La influència de les radiacions ionitzants sobre les cèl·lules*. Facultat de Medicina, UdG, 2012.

VILLATORO, Francisco R. *Nature publica es estado actual de la "fusión fría"* [en línia]. Naukas. (28 de maig de 2019). <https://francis.naukas.com/2019/05/28/nature-publica-el-estado-actual-de-la-fusion-fria/> [Consultat: 06/10/2019].

WHITE, Harvey E. *Introduction to Atomic and Nuclear Physics*. New York: D. Van Nostrand Company, Inc. 1964.

X-CRIVAS. *El invencible Iron-Man-El hombre de Hierro* [en línia]. Universo MARVEL (2013). <https://www.universomarvel.com.aq/?art=ironman> [Consultat: 04/07/2019].

YANES, Javier *Fusión fría: anatomía de un “fraude” científico* [en línia]. Open Mind. (22 de març de 2019). <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/fusion-fria-anatomia-de-un-fraude-cientifico/> [Consultat: 06/10/2019].

REFERÈNCIES ESPECÍFIQUES DE DADES

- i. -INTERNET MOVIE DATABASE. *Robert Downey Jr. IMDb*. (2019) https://www.imdb.com/name/nm0000375/?ref=nm_sr_srsq_3m
- ii. -ANAV (Associació Nuclear Ascó Vandellós II). *Tres reactores de referencia*. ANAV (2019) <http://www.anav.es/es/anav/instalaciones/>
- iii. -CENTRE D'INFORMACIÓ DEL "CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR". *Vandellós I*. Consejo de Seguridad Nacional. (23 de setembre de 2005). http://www.csn.es/plantillas/frame_nivel1.jsp?id_nodo=1935&&key_word=&auditoria=F
- iv. -BIGOT, Bernard. *What is ITER?* [en línia]. Iter Organization. (2019). <https://www.iter.org>
- v. -NAVES, Carl Rod. *Nuclear fusion* [en línia]. Georgia State University's Department of Physics and Astronomy. Hyperphysics (2017). <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fusion.html>
- vi. -SONZOGNI, Alejandro. *NuDat 2.7 database* [en línia]. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. (6 de setembre de 2019). <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=46&n=57>
- AUDI, G.; BERSILLON, O.; BLACHOT, J; WAPSTRA, A.H. *The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties*. NUBASE, 2004.
- vii. -MERWARTH, Ann C.; STONE, Edward C.; BRUNK, William, E.; MASSEY, Ed B. *Voyager 1* [en línia]. California Institute of Technology, NASA Jet Propulsion Laboratory, NASA Headquarters. (5 de setembre de 2019) <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1977-084A>
- viii. -REDACTORS DE BATERIAFACIL. *Batería AGM Optima YTS 5.5. 12V. 75Ah. 975A. 325x165x238* [en línia]. Bateria Facil. <https://bateriafacil.com/producto/bateriaoptima-yts-55/>
- ix. -NICHOLS, Al. *Pd-109 tables*. [en línia]. IAEA, International Atomic Energy Agency, 2009. http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Pd-109_tables.pdf
- x. GRAY, Theodore. *Palladium* [en línia]. Element Collection, Inc. <https://periodictable.com/Isotopes/046/index.full.html> (28 d'octubre de 2017). [Consultat: 06/10/2019].

- xi. -AREF, Lana ; CULLIGAN, Patricia J.; CZERWINSKI, Kenneth R.; NEPF, Heidi M. *Nuclear Energy: the Good, the Bad, and the Debatable Learn more about nuclear Technology, its benefits, and its danger*. Massachusetts Institut of Techmology, 2012

-ABAD, Marta. *Riscos físics ambientals (PDF)*. IOC, 2008.

AGRAÏMENTS

Aquest treball de recerca no hauria estat possible sense l'ajuda del meu tutor Manel Palenzuela que, tot i ser professor de matemàtiques, no tenir interès en l'Univers Cinematogràfic de Marvel i no estar especialitzat en física nuclear, m'ha ajudat a conduir el meu treball marcant diferents dates d'entrega (el treball s'havia d'entregar de forma periòdica cada divendres). A més a més, també m'ha aconsellat sobre com havien de ser els aspectes formals del treball i ha contribuït en fer que el treball fos més rigorós i adequat recomanant-me referenciar totes les dades d'una manera més explícita i indicant-me com s'havia de redactar la descripció dels càlculs.

En segon lloc, agrair a en Toni David, treballador de T-Systems graduat en física, que s'ha ofert (de manera "altruista") a fer una lectura detallada de la primera pregunta del treball per corroborar que la informació era actual i correcte, proposar noves idees i verificar que els models de reactors proposats eren científicament factibles.

També agrair a la meva cosina Silvia, llicenciada en Comunicacions d'Audiovisuals, per ajudar-me amb el disseny de la portada.

D'altra banda, vull donar les gràcies al meu pare, Xavier, per haver fet una lectura del treball.

Finalment, agrair a la meva mare, Elena, i a la meva tieta, Mònica, per ajudar-me en tot el procés de realització del treball i, perquè, sense elles aquest treball no seria el mateix.

