

Eduardo López Padilla

**Estudi preliminar de la viabilitat econòmica d'una
hidrogena amb autogeneració al 2030**

Treball Fi de Màster
dirigit pel Dr. Rodríguez Carabias, Joaquín Andrés

Màster en Enginyeria Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2022

Índex

1	Introducció.....	5
1.1	Objecte	5
1.2	Abast	7
1.3	Condicions inicials	7
1.4	Programes de càlcul	7
2	Estudi i selecció de tecnologies	9
2.1	Producció d'hidrogen	9
2.1.1	Tecnologies.....	9
2.1.2	Selecció	11
2.2	Emmagatzematge d'hidrogen	13
2.2.1	Tecnologies.....	13
2.2.2	Selecció	16
2.3	Subministrament d'hidrogen.....	18
2.3.1	Tecnologies.....	18
2.3.2	Selecció	20
2.4	Recipient d'emmagatzemament d'hidrogen.....	21
2.4.1	Tecnologies.....	21
2.4.2	Selecció	22
2.5	Compressió d'hidrogen	22
2.5.1	Tecnologies.....	22
2.5.2	Selecció	24
3	Disseny del procés	25
3.1	Funcionament del procés	25
3.2	Dimensionament d'equips	26
3.2.1	Producció d'hidrogen.....	26
3.2.2	Emmagatzematge.....	31
3.2.3	Subministrament d'hidrogen	45
3.2.4	Planta solar fotovoltaica	46
4	Estudi de la viabilitat econòmica.....	49
5	Conclusió	52
6	Bibliografia.....	54
7	Annex càlculs	57
7.1	Determinació de la demanda d'hidrogen.....	57
7.2	Refrigeració precàrrega.....	60

7.3	Refrigeració subministrament	64
7.4	Planta solar fotovoltaica	67
7.6	Estudi viabilitat econòmica	73
7.6.1	Càlcul cost d'equips.....	73
7.6.2	Càlcul despeses d'operació	79
7.6.3	Càlcul VAN	80
7.7	Fulls API ASPEN EDR	86
8	Annex plànols.....	99

1 Introducció

1.1 Objecte

La influència de l'activitat humana és la principal causant de la pujada de la temperatura mitja global, fet que causarà canvis sense precedents al clima. Aquestes conseqüències estant sent ja materialitzades en la forma de successos climàtics extrems, com onades de calor o fortes precipitacions. El canvi climàtic es tracta d'un risc per l'economia mundial. Una forma de reduir els seus efectes passa per prendre accions per disminuir els principals causants, com poden ser les emissions de carboni [1].

Globalment, s'està portant a terme un pla per descarbonitzar el sector de la mobilitat. A Espanya, es pretén arribar a un objectiu d'emissions 0 pels vehicles lleugers per l'any 2040 [2]. Per fer-ho, s'està duent a terme una transició de vehicles de combustió interna a vehicles elèctrics. El model predominant al sector del vehicle lleuger és el del cotxe amb bateria elèctrica. Tanmateix, pel que fa al sector dels vehicles pesats, degut a l'alt pes de la bateria que seria necessària i els elevats temps de càrrega d'aquestes, fa que aquesta tecnologia sigui poc atractiva. Per aquest motiu, la tecnologia més establerta per vehicles pesats elèctrics es tracta de les piles d'hidrogen, degut al seu reduït pes i temps de recàrrega ràpid, assimilable al de la recàrrega de vehicles de combustió convencionals.

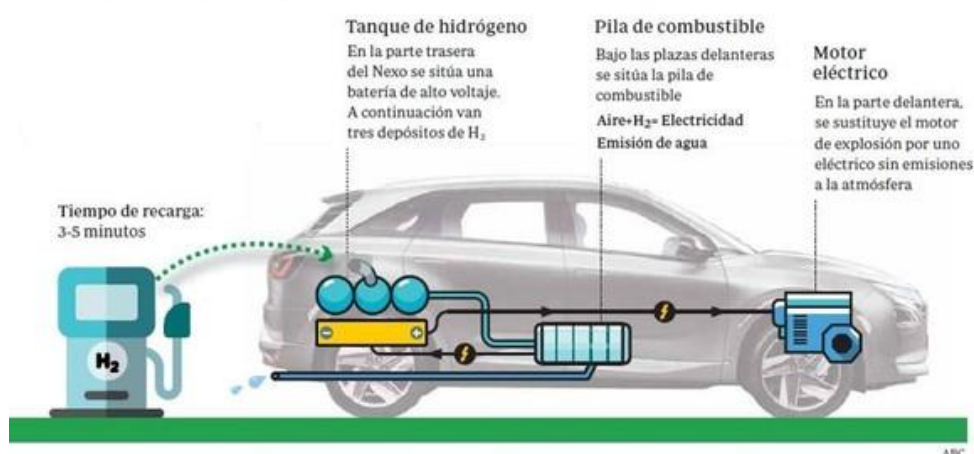


Figura 1. Funcionament d'una pila d'hidrogen [3].

Les piles d'hidrogen es tracten d'un dispositiu electroquímic, en el què un flux continu d'hidrogen i oxigen reaccionen de forma controlada per donar energia elèctrica i aigua.

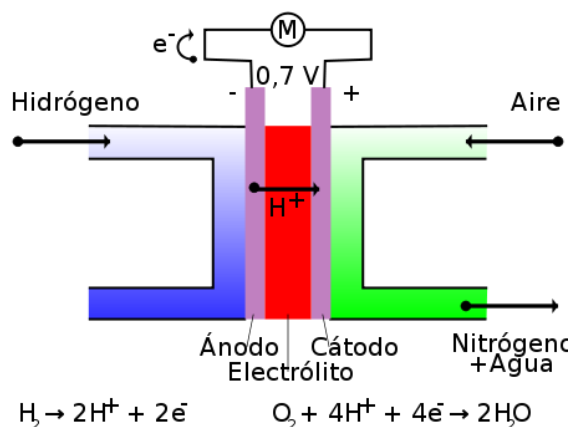


Figura 2. Esquema de funcionament d'una pila de combustible [4].

A dia d'avui, aquesta tecnologia és comú trobar-la en flotes d'autobusos urbans o de vehicles de servei d'aeroports. Recentment, companyies com Hyundai [5], han començat a presentar models de camions que funcionen amb aquesta tecnologia, i moltes més estan treballant en prototips.



Figura 3. Camió de pila d'hidrogen Hyundai Xcient [5].

Per tal que aquesta descarbonització sigui realment efectiva en els vehicles de pila d'hidrogen, és de màxima importància la manera en què es produeix l'hidrogen, atès a que l'origen d'aquest ha de ser verd. L'hidrogen verd s'obté a través de l'electròlisi de l'aigua. Es tracta d'un mètode que, a través d'una corrent elèctrica, es separa l'hidrogen i l'oxigen que formen les molècules d'aigua. Tanmateix, per què aquest hidrogen sigui veritablement verd, l'electricitat emprada ha de venir de fonts renovables, així l'hidrogen produït està lliure de emissions de carboni a l'atmosfera.

L'objectiu d'aquest treball es tracta de realitzar un estudi preliminar de la viabilitat econòmica d'una estació de proveïment d'hidrogen per camions, anomenada hidrogenera, a l'any 2030. Per realitzar aquest estudi, es tindran es dimensionaran els equips principals necessaris per dur a terme el procés, per poder realitzar una estimació econòmica. La hidrogenera produirà l'hidrogen *on site*, i comptarà amb una planta solar fotovoltaica per subministrar la electricitat necessària.

Actualment, l'hidrogen té un preu mig de 9 €/kg [6], però s'espera que per l'any 2030 s'assoleixi un preu mig de entre 2,2 i 5,9 €/kg [7]. Sent que es treballarà amb la suposició que la hidrogenera serà construïda l'any 2030, el factor que determinarà la viabilitat econòmica del projecte serà que el preu del kilogram d'hidrogen es trobi dintre del rang previst per aquesta data.

1.2 Abast

Tenint en compte que l'objectiu del treball és l'estudi de la viabilitat econòmica de la hidrogenera, es trobaran dintre de l'abast d'aquest projecte el desenvolupament dels següents punts:

- Estudi i selecció de les tecnologies involucrades en la producció, emmagatzematge i subministrament d'hidrogen que millor s'adeqüin a la hidrogenera.
- Dimensionament dels equips involucrats en el procés de producció, emmagatzematge i subministrament d'hidrogen, per determinar el cost d'aquests.
- Dimensionament de la planta solar fotovoltaica.
- Estudi de la viabilitat econòmica del projecte.

En aquest treball, quedarà fora de l'abast del projecte:

- Càlcul i dimensionament d'estructures, cimentacions, suports d'equips.
- Disseny del sistema de control del procés.
- Estudi ambiental i de seguretat.
- Aspectes legals.

1.3 Condicions inicials

El projecte serà realitzat sota les següents condicions inicials:

- La hidrogenera ha de ser capaç d'omplir totalment els dipòsits dels vehicles amb hidrogen en forma de gas, els quals tenen pressions màximes de 700 bar. L'hidrogen subministrat als vehicles ha de tenir una puresa del 99,9%, dintre d'un rang de temperatures de -40 °C i 80 °C [8]. Es fixa que el temps d'ompliment dels dipòsits ha de ser com a màxim de 15 minuts.
- Es treballa sota la hipòtesi de que tots els vehicles pesats de combustió interna han estat substituïts per vehicles de pila d'hidrogen. Així doncs, la demanda d'hidrogen serà assimilable a la demanda de dièsel d'una gasolinera comú, tenint en compte la conversió energètica de l'hidrogen al dièsel. La gasolinera actualment subministra 5 milions de litres de dièsel a l'any. La demanda diària d'hidrogen és la mateixa al llarg de tot l'any, però no horàriament.
- El projecte es duu a terme sota la hipòtesi de que la hidrogenera es construeix en l'emplaçament d'una gasolinera, la qual s'ha desmantellat. El cost de desmantellament de la gasolinera i el de la parcel·la no es tenen en compte en aquest projecte.
- L'any on es durà a terme el projecte serà el 2030, per tant, l'estudi i selecció de les tecnologies i els valors d'inflació econòmica s'adapten a aquesta data.
- La planta fotovoltaica es dimensiona per tal d'obtenir un balanç econòmic anual entre la energia comprada i venuda de zero.

1.4 Programes de càlcul

En aquest projecte s'han fet servir diferents *software* de càlcul i disseny, executats a *Microsoft Windows*, per realitzar les següents funcions:

- Microsoft Excel: realització de càlculs i gràfics.

- Aspen Hysys: simulació d'equips del procés.
- Aspen EDR: simulació d'intercanviadors de calor.
- AutoCAD: elaboració de diagrames i plànols.
- EES: obtenció de propietats termodinàmiques i resolució d'equacions.

2 Estudi i selecció de tecnologies

En aquest apartat s'estudiaran i seleccionaran les diferents tecnologies necessàries per la hidrogenera. Dintre del procés es poden diferenciar les següents processos:

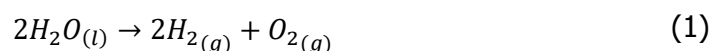


La finalitat d'aquest estudi és seleccionar les tecnologies per a cada procés més avantatjoses pel projecte, i implantar-les. Per fer l'estudi es tenen en compte tant tecnologies ja desenvolupades com tecnologies que es troben en vies de desenvolupament.

El principal criteri per seleccionar les tecnologies és l'aspecte econòmic, tenint en compte les despeses d'equips i consums energètics tant elèctrics com tèrmics. Tot i això, també hi entren en joc criteris qualitius, com poden ser la maduresa de les tecnologies, o necessitats de manteniment, entre d'altres.

2.1 Producció d'hidrogen

La generació d'hidrogen en aquest projecte es realitza mitjançant electròlisi. Aquesta es porta a terme mitjançant l'electrolitzador, un equip en el qual, aplicant un corrent elèctric, es separa un compost en els seus elements fonamentals. En aquest cas, l'aigua es separa per obtenir hidrogen i oxigen:



Seguidament es descriuran les diferents tecnologies mitjançant les quals es pot dur a terme la electròlisi.

2.1.1 Tecnologies

Els principals elements de l'electrolitzador són els elèctrodes (ànode i càtode) sobre els que s'hi aplica la corrent elèctrica, els quals es troben submergits en un electròlit, ja que l'aigua destil·lada per si mateixa no és conductora. Els diferents tipus d'electròlits i els elèctrodes poden variar, i això dona lloc a diversos mètodes per fer l'electròlisi de l'aigua. Actualment es disposa comercialment de tres tipus de tecnologies: l'electròlisi alcalina, l'electròlisi Polymer Electrolyte Membrane (PEM), i l'electròlisi Anionic Exchange Membrane (AEM).

2.1.1.1 Electròlisi alcalina

L'electròlit és una solució líquida alcalina d'hidròxid de potassi (KOH) o hidròxid de sodi (NaOH). Pel que fa als elèctrodes, es fa servir típicament níquel o aliatges d'aquest metall. L'hidrogen es produeix en una cel·la que consta de l'ànode, càtode i una membrana. Aquestes cel·les solen ser muntades en sèrie per produir més hidrogen. Al aplicar corrent, els ions d'hidròxid viatgen a través de l'electròlit des del càtode fins l'ànode generant hidrogen al càtode i oxigen a l'ànode.

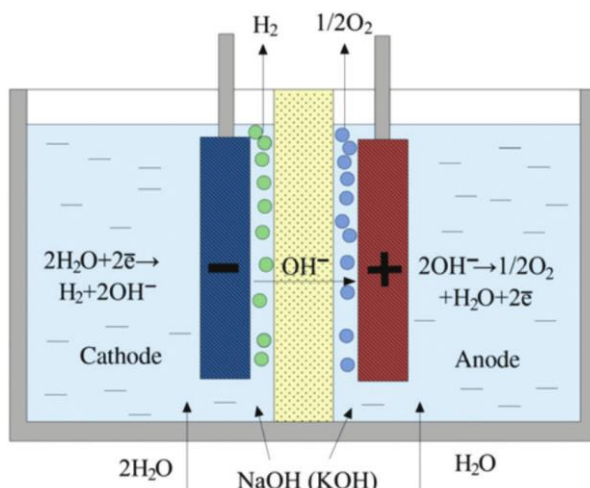


Figura 4. Electròlisi alcalina [9].

2.1.1.2 Electròlisi Polymer Electrolyte Membrane (PEM)

Els electrolitzadors PEM fan servir una membrana d'intercanvi de protons i un electrolít polimèric sòlid. Aplicant corrent es forma hidrogen al càtode. Produïxen hidrogen d'alta puresa i són més fàcils de refrigerar. El fet que faci servir catalitzadors de metalls preciosos incrementa el seu preu.

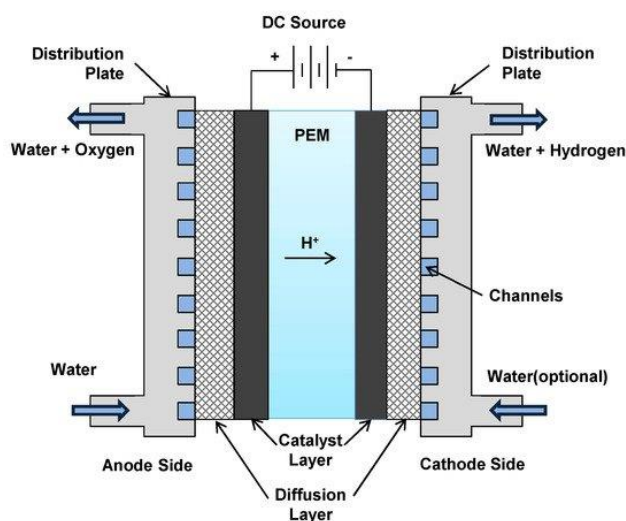


Figura 5. Electròlisi PEM [10].

2.1.1.3 Electròlisi Anionic Exchange Membrane (AEM)

Mitjançant una membrana d'intercanvi aniònic, aconseguïx reduir la presència d'un mitjà aquós alcalí, fent que el medi no sigui tant agressiu amb els materials de construcció, abaratint el seu cost. A més, elimina la necessitat de emprar catalitzadors metàl·lics costosos com és el cas de l'electròlisi PEM [11]. Pot treballar, de igual manera que la PEM, amb càrregues elèctriques variables.

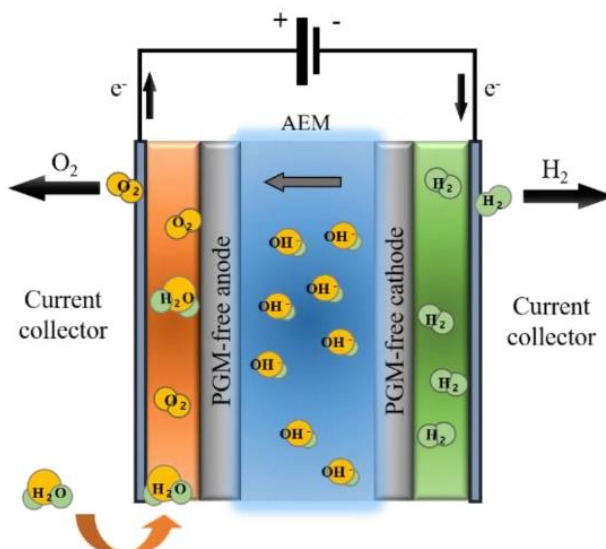


Figura 6. Electròlisi AEM [12].

2.1.2 Selecció

Un cop conegudes les tres principals tecnologies, es fa un estudi per escollir aquella més adient per la hidrogenera. Els paràmetres que determinaran la millor tecnologia són:

- Cost de producció d'un kilogram d'hidrogen (€/kg H₂): es buscarà que sigui el més reduït possible.
- Pressió de l'hidrogen produït: pressions altes que redueixin consums energètics de compressió en etapes posteriors del procés.
- Temperatura de l'hidrogen produït: es busca la tecnologia que produeixi l'hidrogen a temperatures properes a l'ambiental per evitar equips de refrigeració pel seu emmagatzematge.
- Puresa de l'hidrogen produït: es necessita hidrogen amb la major puresa per evitar l'ús d'etapes de purificació posteriors.
- Consum d'aigua: és positiu que aquest consum sigui el més reduït possible.

Per determinar el cost del kilogram d'hidrogen, es té en compte el consum d'energia necessari per produir 1 kilogram d'hidrogen (kWh/kg H₂), el cost de l'equip mitjà per la potència de l'equip (€/kW), la potència de l'equip en qüestió i la vida útil mitja de l'equip. També es té en compte la puresa de l'hidrogen produït, ja que de no estar dins de l'especificació comportarà la necessitat d'afegir una unitat de purificació al procés. Els valors d'aquests paràmetres es mostren a la següent taula:

Taula 1 . Valors del consum i cost de les diferents tecnologies comercials d'electrolitzadors.

Tecnologia	Consum (kWh/kg H ₂)	Cost actual (€/kW)	Puresa H ₂ (%)	Vida útil (h)	Potència elèctrica mínima necessària (% del poder calorífic inferior de l'H ₂)
Alcalina	61,2	800,00	99,990	80.000	15,00
PEM	64,5	1.200,00	99,900	40.000	5,00
AEM	48,96	1.000,00	99,999	35.000	1,00

La electròlisi alcalina i la PEM es tracten de tecnologies madures i esteses, fet que fa que el cost d'aquestes tecnologies no estigui previst que es redueixi en un futur proper. En canvi, la electròlisi AEM es tracta d'una tecnologia molt jove, i és que va ser patentada de ma de la empresa *ENAPTER* l'any 2009 [13]. Actualment, la empresa produeix 100 electrolitzadors mensualment, però ja està en marxa una expansió de la capacitat de producció de 10000 unitats mensuals [14]. Aquest fet fa que el cost €/kW pugui baixar considerablement. En la següent taula es mostren les especificacions dels models actuals i els models planejats per 2023 i 2025 d'*ENAPTER*, així com la predicció de cost a l'any 2030 feta en l' *Initiation Research Pareto 2021*:

Taula 2. Vida útil i cost actual, planejat, i predit [14], [15].

Model	Any	Vida útil (h)	Cost (€/kW)
EL 2.1	2015	30.000,00	3.750,00
EL Model T	2023	40.000,00	1.042,00
EL Multicore	2025	40.000,00	546,00
Predicció <i>Pareto</i>	2030	40.000,00	300,00

Amb la vida útil de l'equip, el consum energètic i el cost de l'equip per kW de potència, es pot calcular de la següent manera el cost corresponent a l'equip del kg d'H₂:

$$\frac{1}{\text{Vida útil (h)}} \cdot \text{Consum} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg H}_2} \right) \cdot \text{Cost equip} \left(\frac{\text{€}}{\text{kW}} \right) = \text{Cost kg H}_2 \left(\frac{\text{€}}{\text{kg H}_2} \right) \quad (2)$$

En la següent taula es mostra tant el resultat obtingut del càlcul del kilogram d'hidrogen com els paràmetres d'operació d'aquestes tecnologies:

Taula 3. Valors del cost del kg H₂ (€/kg H₂) i paràmetres d'operació.

Tecnologia	Cost kg H ₂ (€/kg H ₂)	Consum aigua (l/kg H ₂)	Pressió de l'hidrogen produït (bar)	Temperatura de l'hidrogen produït (°C)
Alcalina	0,61	15,00	30,00	90,00
PEM	1,94	15,00	30,00	80,00
AEM	0,42	12,00	35,00	35,00

Com es pot veure, la tecnologia que assoleix un menor cost per kilogram d'hidrogen produït es tracta de la tecnologia AEM. Addicionalment, té el consum d'aigua més reduït, lliura l'hidrogen a pressions més elevades i temperatures més reduïdes, fet que fa que sigui la millor opció en tots els aspectes, i motiu pel qual es selecciona aquesta tecnologia per produir l'hidrogen.

2.2 Emmagatzematge d'hidrogen

Donat que en moments puntuals la demanda d'hidrogen és superior a l'hidrogen produït, s'ha de considerar establir un sistema d'emmagatzematge per garantir el subministrament als clients. Tenir una reserva d'hidrogen també és necessari pels casos on la producció es pugui veure afectada per talls del subministrament elèctric, o bé per casos on s'hagin de dur a terme accions de manteniment en el sistema de generació i o transport d'electricitat, o les unitats generadores d'hidrogen. S'estableix que la reserva necessària ha de ser la corresponent a la reserva mínima diària més la reserva corresponent necessària per operar durant 1 dia sense generació d'hidrogen.

En aquest apartat s'exposaran les diferents tecnologies per emmagatzemar hidrogen. Cap destacar que, a diferència de la generació d'hidrogen, on només s'analitza l'electrolitzador, en aquest cas entren en joc més equips, com poden ser equips de compressió, liquació, bombes, reactors, o equips de refrigeració. Tenint en compte tots aquests factors, el que es farà en aquest apartat és fer una primera selecció de la tecnologia més òptima en funció de la seva maduresa comercial i els costos d'operació i d'equips generals.

2.2.1 Tecnologies

Avui dia existeixen diversos mètodes per emmagatzemar hidrogen radicalment diferents. L'hidrogen gas té una densitat molt baixa, 1 kg ocupa en condicions normals 11 m³. Per tant, aquesta densitat ha de créixer significativament per reduir el volum del recipient emmagatzemador, que d'altra manera tindria un volum desmesurat. Els diferents mètodes que es definiran a continuació comporten una necessitat d'afegir energia en forma de treball i/o calor.

Es poden dividir en tres categories els diferents mètodes per emmagatzemar hidrogen:

- Emmagatzemament físic, en forma de gas pressuritzat o líquid.
- Per adsorció, on l'hidrogen molecular és adsorbit dins de materials gràcies a les forces de Van der Waals.
- Emmagatzemament químic, en forma de hidrurs metàl·lics i hidrurs químics, on l'hidrogen atòmic s'enllaça a compostos químics (absorció).

Tot seguit es descriuran amb més detall aquest mètodes.

2.2.1.1 Emmagatzemament físic

2.2.1.1.1 Hidrogen comprimit

En aquest sistema, l'hidrogen gas es comprimeix amb un compressor fins la pressió final desitjada. Per poder obtenir densitats raonables, de l'ordre de 40 kg/m³, s'ha de comprimir el gas fins a pressions properes als 700 bar a 35° C, fet que repercuteix considerablement en el cost del recipient contenidor. Per altra banda, el consum elèctric del compressor comparat amb les demandes elèctriques d'altres mètodes d'emmagatzematge, és relativament baix. Mentre que el cost del recipient és alt, assegura un emmagatzematge estable, mantenint la puresa de l'hidrogen. Es tracta d'un procés desenvolupat i madur.

2.2.1.1.2 Hidrogen líquid

Un altre mètode per augmentar la densitat de l'hidrogen és la líquefacció d'aquest. En estat líquid, la seva densitat és de 70 kg/m³. El principal problema d'aquest mètode es tracta del procés de líquefacció, i és que es tracta d'un procés molt demandant elèctricament, atès a la seva baixa temperatura d'ebullició de l'hidrogen, i el fet de que aquest gas no es refreda quan s'expansiona en el líquidor per temperatures superiors a -73 °C.

Un cop líquat, s'ha d'emmagatzemar en un tanc amb un bon aïllament tèrmic que redueixi les pèrdues per ebullició, el qual comporta no només pèrdues energètiques, sinó pèrdues de l'hidrogen degut a que eventualment aquest ha de ser venut si no es disposa d'un sistema de recuperació. El tanc d'emmagatzematge criogènic té un cost significativament menor al del tanc d'hidrogen pressuritzat depenent de la pressió.

2.2.1.2 Emmagatzemament per adsorció

L'emmagatzemament d'hidrogen via adsorció aprofita les forces de Van der Waals entre hidrogen molecular i un material amb una gran superfície específica. Degut a la debilitat d'aquests enllaços, baixes temperatures i elevades pressions solen ser necessàries per assolir densitats significatives.

Diferents materials adsorbents, com materials porosos basats en carboni, estructures metàl·liques-orgàniques, materials porosos polimèrics o zeolites. En contrast amb els emmagatzemaments de hidrogen a pressió o líquid, hi ha poca experiència en l'aplicació d'aquests mètodes. Els recipients més desenvolupats només es troben en estudi actualment.

2.2.1.3 Emmagatzemament químic

2.2.1.3.1 Hidrurs metàl·lics

Mitjançant aquest mètode, l'hidrogen queda enllaçat dins de l'hidruir metàl·lic. Aquests enllaços es tracten d'enllaços molt més forts que els enllaços de Van der Waals de l'adsorció. Per tant, és necessària més energia per separar aquests enllaços i obtenir de nou hidrogen. Per altre banda, aquests enllaços més forts permeten majors densitats d'emmagatzematge. Per lliurar l'hidrogen, depenent de l'hidruir, és necessari dur a terme una termòlisi o hidròlisi. Encara que s'han investigat molts hidrurs metàl·lics per emmagatzematges basats en termòlisi, pocs han estat investigats per la hidròlisi.

2.2.1.3.1.1 Hidrurs metàl·lics elementals

L'hidruir metàl·lic considerat més prometedora es tracta de l'hidruir de magnesi (MgH_2) i l'hidruir d'alumini (AlH_3):

- MgH_2 : Té una capacitat d'emmagatzemament teòricament alta, i el magnesi metàl·lic es troba disponible amb un cost relativament baix. L'enllaç que es forma és relativament fort. La seva entalpia de deshidrogenació es de 75 kJ/mol, i les cinètiques dels processos d'hidrogenació i deshidrogenació són lentes. Per poder superar aquest problema, es fa necessari dur a terme la deshidrogenació a temperatures per sobre dels 300 °C. Altres estratègies han sigut estudiades amb relatiu èxit a escala de laboratori, reduint la mida de partícula del magnesi i afegint altes additius metàl·lics, però segueix sent necessària altes temperatures.
- AlH_3 : A diferència del MgH_2 , la entalpia de deshidrogenació és molt menor, de 7 kJ/mol, i el procés es pot dur a terme de forma ràpida a temperatures de 100 °C. Per contrapartida, el procés és irreversible. Actualment s'està estudiant diferents mètodes per regenerar l'hidruir d'alumini, que poden ser assolits a temperatures de 75 °C. Per contrapartida, es un procés que es necessita dur a terme a pressions per sota de l'atmosfèrica, fent necessari un alt consum elèctric per les bombes de buit.

2.2.1.3.1.2 Hidrurs intermetàl·lics

El concepte darrere del mètode de fer servir hidrurs intermetàl·lics és el de que una aliatge $A_xB_yH_z$ consistent d'un element A que enllaça l'hidrogen fortament, i un element B que enllaça l'hidrogen dèbilment, tindrà les propietats d'emmagatzemar l'hidrogen a mig camí entre

els seus consecutius elements [16]. Com els elements A i B poden variar molt, així com la seva relació, molts hidrurs intermetàl·lics són possibles. A la pràctica, poques estructures han sigut estudiades per emmagatzemar hidrogen, principalment les d'estructura AB_2 . Generalment, l'hidrur AB_2 pot assolir densitats de 65 kg/m³.

2.2.1.3.1.3 Hidrurs intermetàl·lics complexes

En els hidrurs intermetàl·lics complexes, l'hidrogen forma part d'un complex anió que es troba enllaçat a un catió metàl·lic. La majoria d'aquests compostos requereixen altes temperatures per la seva deshidrogenació via termòlisi, i només uns pocs poden ser deshidrogenats reversiblement, generalment en presència de catalitzadors o additius [17].

- Alanats: el més estudiat per l'emmagatzematge d'hidrogen es tracta del tetrahidroalanat de sodi ($NaAlH_4$). En presència d'un catalitzador basat en titani, és possible fer hidrogenar els productes de la seva deshidrogenació a temperatures per sobre dels 100 °C, però amb pressions relativament altes, al voltant de 100 bar [18].
- Hidrurs de bor: tenen la major densitat dels hidrurs metàl·lics complexes. Per contrapartida, en el procés de deshidrogenació es poden formar hidrurs elementals estables, com LiH, reduint així la capacitat disponible del recipient emmagatzemador. Els hidrurs de bor tendeixen a formar enllaços més forts que els dels alanats, com el $LiBH_4$, per tant temperatures més altes són necessàries per alliberar l'hidrogen, generalment per sobre de 300 °C. La cinètica de la reacció de hidrogenació i deshidrogenació són molt lentes, el que fa necessari fer servir catalitzadors per pal·liar aquesta problemàtica [19].
- Amides: els sistemes basats en amides per emmagatzematge consisteixen d'una combinació de dos elements: una amina metàl·lica, i un hidrur elemental. Sense l'hidrur elemental, l'amina alliberaria amoníac en comptes d'hidrogen al dur a terme la termòlisi. Encara i així, s'alliberen petites quantitats d'amoníac durant el procés de deshidrogenació, el qual comportaria afegir una unitat per separar l'amoníac de l'hidrogen, ja que l'amoníac és altament perjudicial per les piles de combustible dels vehicles. La amida més destacable és el $LiNH_2$ amb MgH_2 .

2.2.1.3.2 Hidrurs químics

Els hidrurs químics consisteixen en elements més lleugers que els hidrurs metàl·lics, amb la gran diferència de que els hidrurs químics són generalment líquids en condicions normals.

- Metanol: es tracta de l'alcohol més simple. La seva síntesi es pot dur a terme a partir de la hidrogenació de CO_2 , i la seva deshidrogenació es pot dur a terme de diferents maneres, com la reacció amb aigua en un *steam reforming*, o l'oxidació parcial amb oxigen, o termòlisi del metanol [19], [20]. El *steam reforming* té l'avantatge de ser l'única reacció que allibera 3 mols d'hidrogen en comptes de 2. Aquesta reacció requereix temperatures entre 230 i 300 °C, a més de ser necessari l'ús de catalitzadors ($Cu/ZnO/Al_2O_3$).
- Àcid fòrmic: el 2010 BASF va patentar un procés de producció d'àcid fòrmic basat en la hidrogenació del CO_2 . Fent servir un medi bàsic, es desplaça l'equilibri de la reacció cap a la formació d'àcid fòrmic [21]. Donada la termodinàmica de la reacció de descomposició de l'àcid fòrmic, es poden obtenir altes pressions d'hidrogen, però amb traces de CO i CO_2 .

2.2.2 Selecció

Per seleccionar la forma d'emmagatzemar l'hidrogen més òptima es tenen en compte els següents paràmetres:

- Maduresa tecnològica: és positiu que la tecnologia sigui madura, i que hi hagi estudis científics que determinin els processos òptims.
- Costos operatius: es busquen les tecnologies que tinguin uns consums elèctrics i tèrmics més reduïts.

En les següents taules es mostren els costos operatius dels diferents mètodes d'emmagatzematge en termes de calor, electricitat, i temperatures, separant els costos relacionats amb el procés d'emmagatzematge, i els costos relacionats amb el procés de descàrrega d'hidrogen (el qual es correspon als processos de deshidrogenació dels emmagatzematges químics) [22]. Si el procés de deshidrogenació és exotèrmic o neutre tèrmicament, no s'especificarà cap cost:

Taula 4. Costos operatius en termes de calor i electricitat per l'emmagatzematge.

Mètode	Calor (kWh/kg H ₂)	Electricitat (kWh/kg H ₂)	Temperatura (°C)	Pressió (bar)
Emmagatzematge físic				
Gas (100 bar, 35 °C)	-	1,00	35,00	100,00
Gas (200 bar, 35 °C)	-	1,20	35,00	200,00
Gas (700 bar, 35 °C)	-	1,60	35,00	700,00
Líquid	-	12,50	-253,00	-
Hidrurs intermetàl·lics				
MgH ₂	-	0,70	300,00	30,00
AlH ₃	54,00	10,00	70,00	-
AB ₂	-	0,80	80,00	50,00
NaAlH ₄	-	1,00	125,00	100,00
LiBH ₄	-	0,80	350,00	50,00
Amides				
LiNH ₂ -MgH ₂	-	0,90	150,00	70,00
Hidrurs químics				
Metanol	-	1,80	250,00	50,00
Àcid fòrmic	64,00	6,70	110,00-180,00	105,00

Taula 5. Costos operatius en termes de calor i electricitat pel lliurament.

Mètode	Calor (kWh/kg H ₂)	Temperatura (°C)
Emmagatzematge físic		
Gas (100 bar, 35 °C)	-	-

Mètode	Calor (kWh/kg H ₂)	Temperatura (°C)
Gas (200 bar, 35 °C)	-	-
Gas (700 bar, 35 °C)	-	-
Líquid	-	-
Hidrurs intermetàl·lics		
MgH ₂	10,30	350,00
AlH ₃	1,00	100,00
AB ₂	6,00	80,00
NaAlH ₄	5,70	160,00
LiBH ₄	6,40	350,00
Amides	-	-
LiNH ₂ -MgH ₂	5,60	150,00
Hidrurs químics		
Metanol	6,70	250,00
Àcid fòrmic	4,30	<100,00

Com es pot veure, menys l'emmagatzematge físic, tots necessiten aportacions de calor per lliurar l'hidrogen. Encara que hi ha diferents maneres d'assolir altes densitats d'emmagatzematge (tal i com es mostra a la Figura 7), poques d'aquestes han assolit un nivell de maduresa comercial, i estan sent investigades activament.

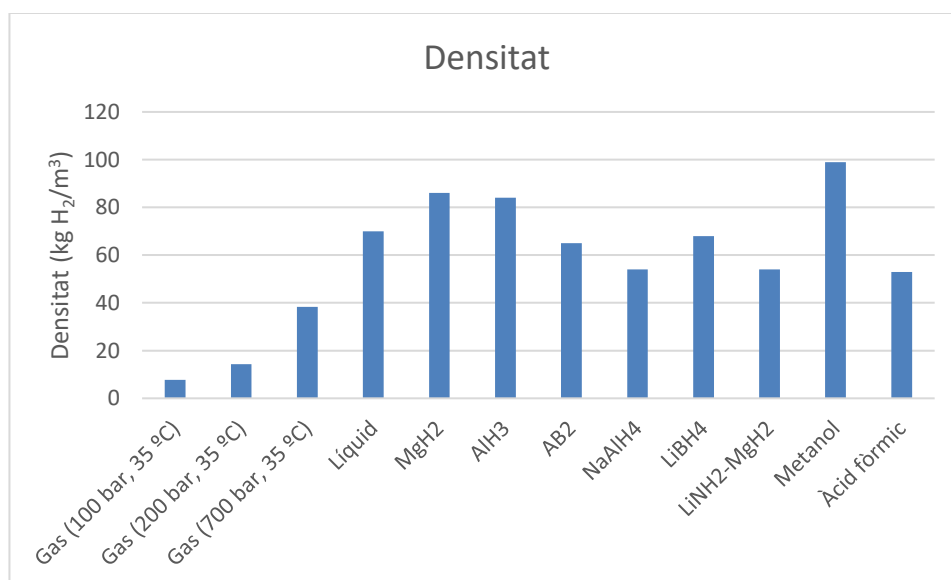


Figura 7. Densitats dels diferents mètodes d'emmagatzematge d'hidrogen.

Pel que fa als processos òptims per emmagatzemar mitjançant hidrurs metàl·lics i químics, encara no han sigut determinats mitjançant estudis científics. Per exemple, aspectes clau com el disseny dels reactors, o la forma de subministrar les demandes tèrmiques, que en

el cas d'un sistema aïllat com pot ser la hidrogenera, no quedaria més remei que utilitzar part de l'hidrogen produït per cobrir aquesta necessitat. Per tant, una anàlisi econòmica detallada d'aquests mètodes, i la estimació del cost dels equips, no seria acurat ni proper a la realitat. A la Figura 8 es mostren els valors dels costos energètics pels processos d'emmagatzematge i lliurament d'hidrogen dels diferents mètodes.

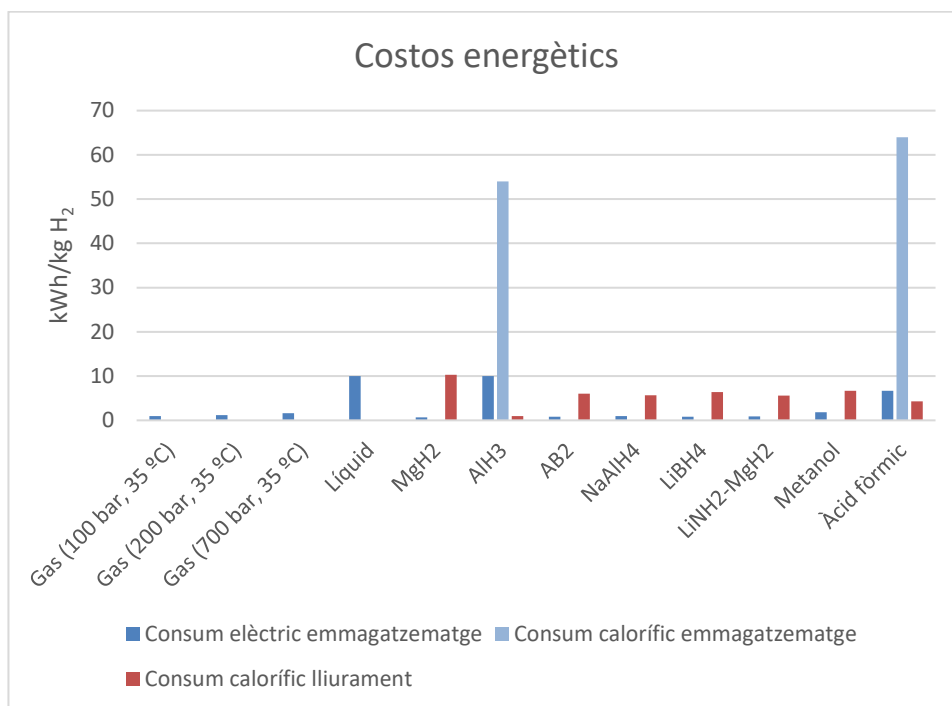


Figura 8. Costos energètics dels diferents mètodes d'emmagatzematge d'hidrogen.

Els mètodes d'emmagatzematge més viables per la seva maduresa a nivell tant tecnològic com comercial, i pels seus reduïts costos operatius i d'inversió d'equips són l'emmagatzematge físic en forma de gas pressuritzat i l'emmagatzematge d'hidrogen líquid. Aquests sistemes, a més, tenen l'avantatge sobre els altres mètodes de que l'hidrogen s'emmagatzema en estat pur, eliminant per tant la necessitat de etapes posteriors de separació i recirculació de reactius, fet que pot alleugerar la càrrega econòmica que comporta la inversió en aquests equips.

Encara que el cost del recipient d'emmagatzematge líquid és més reduït que el del recipient pressuritzat, el cost elèctric de liquidar l'hidrogen, 12,5 kWh/kg H₂ davant del cost per pressuritzar, 1,6 kWh/kg H₂ és el factor que fa que es triï l'emmagatzematge pressuritzat.

2.3 Subministrament d'hidrogen

El subministrament d'hidrogen es tracta de la etapa final del procés. En aquest, es du a terme la càrrega de hidrogen des del emmagatzemament fins al vehicle. En el següent apartat s'exposen les diferents tecnologies.

2.3.1 Tecnologies

Els tancs dels vehicles que arriben a la hidrogenera a ser carregats necessiten hidrogen gas a unes pressions entre 300 i 750 bar, en un rang de temperatures entre -40 i 80 °C. En tot cas, el gas ha de ser subministrat en fase gas, i si l'emmagatzemament és líquid, aquest haurà de ser evaporat. Per tant, les formes de subministrar l'hidrogen al vehicle seran les

mateixes per cada sistema d'emmagatzemament. Tot seguit es descriuran dos mètodes per omplir els tancs: el sistema de cascada i el sistema de compressió directa.

2.3.1.1 Cascada

Es tracta d'un sistema en el que s'emmagatzema l'hidrogen en tancs de pressions més elevades que la pressió del dipòsit del vehicle. Quan es connecta la mànega del sortidor al vehicle, s'obre el tanc pressuritzat, fluint l'hidrogen al tanc del vehicle per diferència de pressions. Un cop el dipòsit del vehicle arriba a la pressió desitjada, el procés acaba.

És habitual fer servir tancs pressuritzats a diferents pressions, omplint el dipòsit des dels de baixa pressió i anar canviant als de pressions més elevades conforme el dipòsit del vehicle iguala les pressions d'aquests tancs. Així es redueix la necessitat de refrigerar el gas per evitar que la temperatura d'aquest incrementi com a conseqüència del procés de compressió que experimenta. A més, omplir aquests tancs a diferents pressions pot optimitzar el consum dels compressors, ja que aquest creix quan la pressió de descàrrega necessària creix.

Fent servir el software *Aspen HYSYS* es mostra aquest fenomen, on es grafica la potència requerida per comprimir un cabal d'hidrogen en funció de la pressió a la sortida del compressor. El compressor treballa sota les següents condicions:

- Cabal: 88,09 kg/h d'hidrogen.
- Temperatura d'entrada al compressor: 35 °C.
- Pressió d'entrada al compressor: 35 bar.
- Eficiència adiabàtica: 75%.
- Eficiència politròpica: 75%.

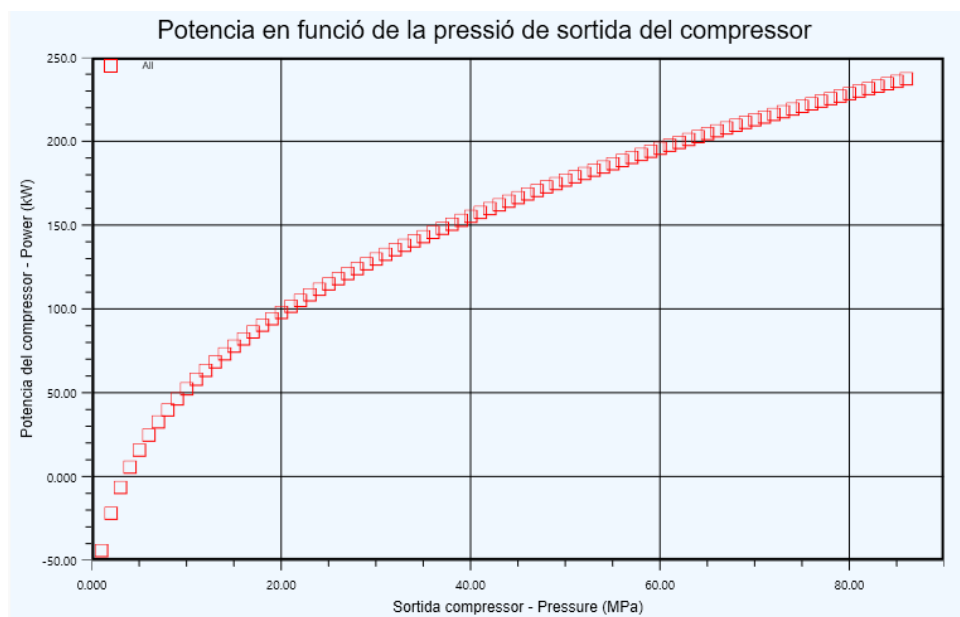


Figura 9. Potència del compressor en funció de la pressió de sortida del compressor.

A la Figura 10 es mostra un esquema del sistema de cascada de subministrament de baixa, mitja i alta pressió:

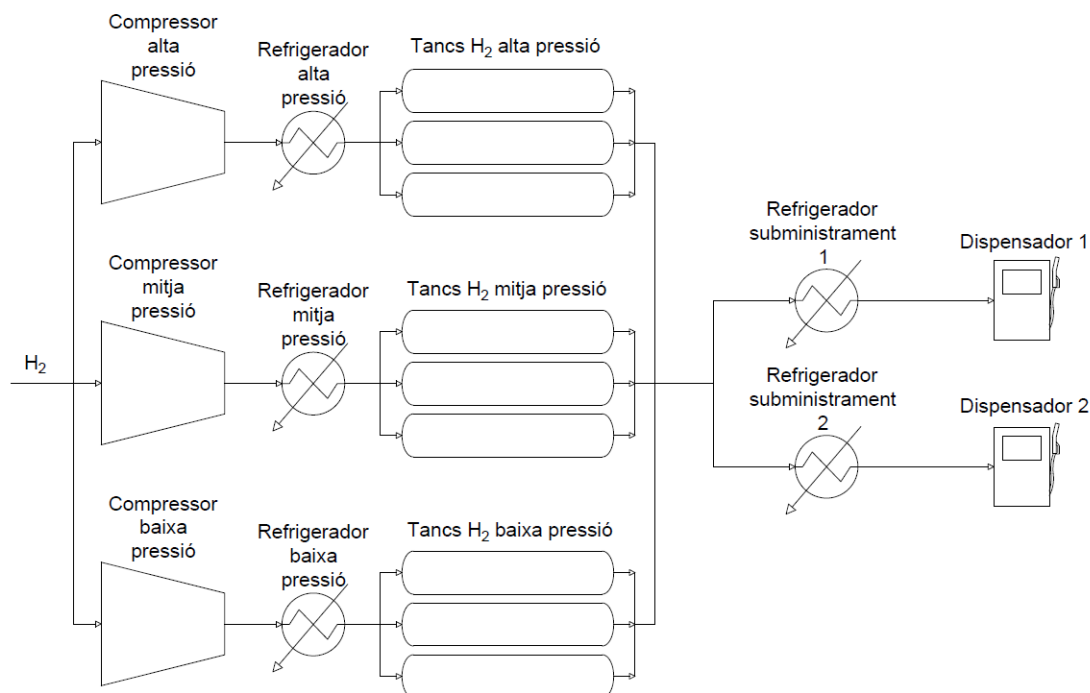


Figura 10. Sistema de cascada.

2.3.1.2 Compresió directa

Aquest procés de subministrament d'hidrogen es basa en la utilització d'un compressor per carregar directament el tanc del vehicle des del emmagatzematge d'hidrogen. Quan l'usuari connecta la mànega de l'assortidor al dipòsit del vehicle, el compressor es connecta i carrega el dipòsit fins la pressió desitjada. De mateixa forma, és necessari refrigerar el corrent d'hidrogen abans de carregar-lo al vehicle per tal que no excedeixi les temperatures màximes del dipòsit. En la següent figura es mostra aquest procés:

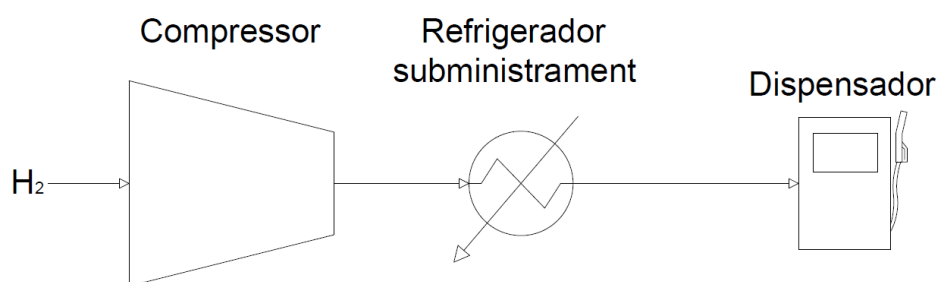


Figura 11. Sistema de compressió directa.

2.3.2 Selecció

Ambdós sistemes necessiten compressors i refrigeració, però el sistema de cascada necessita tancs per emmagatzemar i subministrar el gas, fet que fa que el seu cost d'inversió sigui major que el sistema de compressió directa.

El sistema de compressió directa requereix engegar i parar el compressor cada cop que un usuari vol carregar el vehicle, fet que redueix significativament la seva vida útil. Per altre banda, el sistema de cascada pot tenir suficients tancs per tal que el compressor sempre estigui en marxa carregant-los amb cabals menors que el sistema de compressió directa.

Un altre punt a favor pel sistema de cascada és que es poden tenir suficients tancs de reserva de cascada per poder operar sota condicions de tall de subministrament elèctric, ja que aquests ja es troben carregats, i els costos del generador d'emergència necessari per operar les vàlvules de la cascada seria molt menor que el cost per alimentar el compressor en el sistema de compressió directa.

Per últim, el sistema de cascada pot fer les vegades de sistema d'emmagatzematge pressuritzat, combinant els processos d'emmagatzematge i subministrament en un de sol.

Per aquests fets, es considera que el sistema de subministrament de cascada es superior al de compressió directa, i serà el sistema escollit per la hidrogenera.

2.4 Recipient d'emmagatzemament d'hidrogen

Com a resultat de l'estudi de les tecnologies d'emmagatzematge d'hidrogen en l'apartat 2.2, es determina que és necessari estudiar procés d'emmagatzematge pressuritzat, donat que entren en joc diversos equips dels quals es necessari seleccionar les millors opcions. En aquest apartat i es determina quines són les millors opcions.

2.4.1 Tecnologies

Els recipients pressuritzats són emprats comunament en àmbits industrials, comercials i aeroespacials, des de petites ampolles fins grans tancs. Alguns metalls es troben subjectes al fenomen de la fragilització per hidrogen, causat per absorció i dissociació de l'hidrogen en les superfícies d'aquests metalls. Aquest fenomen pot ser evitat fent servir els materials adequats, com els acers inoxidable austenítics, com l'acer 316 i 316 L [23]. Tot i això, és comú trobar tipologies de tancs en les quals no es fa servir únicament acer, sinó combinacions d'acer i altres components. A continuació es descriuen els recipients més emprats:

- Recipient pressuritzat ASME: recipients pressuritzats fets completament d'acer inoxidable, seguint el codi ASME.
- Sense soldadura: es tracta de recipients fets de tubs sense cap mena de soldadura, fets d'acer inoxidable. La seva pressió màxima d'operació és de 650 bar i el seu volum està limitat a 0,41 m³ [24].
- MSLV: els *multifunctional layered stationary hydrogen storage vessels*, o MSLV, es tracten de recipients format per tres capes. La capa interior, formada per plaques d'acer austenític, la segona capa que consisteix en cintes d'acer de baix aliatge, i la tercera capa, la exterior, que consisteix en plaques d'acer de baix aliatge. La capa interior, al ser d'acer inoxidable 316 L el fa compatible per hidrogen a temperatura ambiental i alta pressió.

Encara que teòricament no hi ha restriccions en els paràmetres de disseny dels MSLV, la seva manufactura es veu limitada per les capacitats de les màquines de bobinat involucrades en el procés de fabricació d'aquests.

Comercialment es poden trobar els MSLV en pressions de 860, 430 i 160 bar a preus de 600, 450 i 350 €/kg H₂ [24], amb volums que varien de 0,5 a 25 m³.

- Acer-ciment: Oak Ridge National Laboratory ha desenvolupat recipients que consisteixen en una capa interior d'acer inoxidable, seguit d'una capa externa de ciment. Actualment han finalitzat el desenvolupament d'un tanc de 875 bar a un preu de 700 €/kg H₂ [25].

- Resina: comercialment coneguts com *Type IV*, aquests recipients estan fets d'una capa interior de polímer recobert per una capa de fibra de carboni i resina epoxy. Aquest tipus de recipients és comú trobar-los als dipòsits dels vehicles.

2.4.2 Selecció

Donat que l'emmagatzematge i subministrament es portarà a terme mitjançant un sistema de cascada, els recipients necessaris per emmagatzemar han d'arribar a emmagatzemar l'hidrogen a unes pressions superiors a 700 bar.

Els únics recipients capaços d'arribar a aquestes pressions són els ASME, MSLV, els d'Acer-ciment i els de resina.

Els recipients ASME, al igual que els de resina són recipients molt més costosos que els MSLV i Acer-ciment. L'opció que ofereix un preu menor del kilogram d'hidrogen es tracta dels MSLV, que a més té recipients a pressions menors aptes per un sistema de cascada amb diferents pressions de càrrega.

Per aquests motius, s'escull l'opció d'emmagatzemar hidrogen pressuritzat en els recipients MSLV.

2.5 Compressió d'hidrogen

L'hidrogen produït per l'electrolitzador es troba a una pressió de 35 bar, mentre que els dipòsits dels vehicles necessiten carregar-se a pressions de 350 i 700 bar. Per augmentar la pressió de l'hidrogen produït és necessari la utilització de compressors. Hi ha dos tipus de compressors comunament utilitzats per comprimir hidrogen, els compressors recíprocs i els compressors centrífugs [26].

2.5.1 Tecnologies

2.5.1.1 Recíprocs

Es tracta de compressors de desplaçament positiu. Un eix fa moure de forma recíproca un diafragma o un pistó, que són els elements que comprimeixen el gas. Són útils quan és necessari altes relacions de compressió.



Figura 12. Compressor recíprocant de pistó [27].

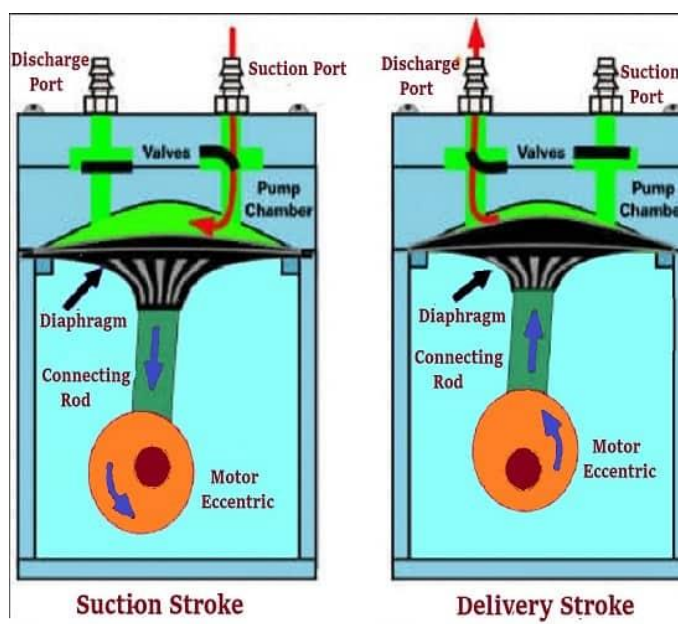


Figura 13. Compressor recíproc de diafragma [28].

Recentment, *Linde* ha desenvolupat un nou tipus de compressor recíproc i està sent utilitzat en hidrogenares [29]. Es tracta dels compressors iònics. Aquests consten una sèrie de cilindres, els quals es mouen hidràulicament. A cada cilindre hi ha el "líquid iònic", gràcies al qual s'assoleix una major eficiència en la compressió, on el refredament del gas es dona dintre del cilindre sense necessitat d'equips de refrigeració. El líquid iònic té funció autolubricant. A a més, redueix el nombre de parts mòbils dintre del compressor, per tant reduint el desgast dels components mecànics.

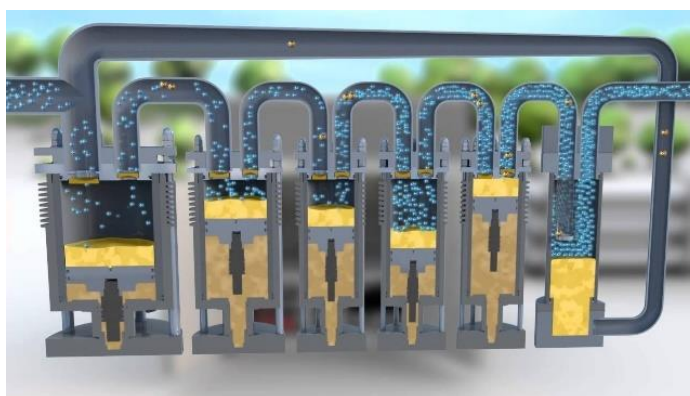
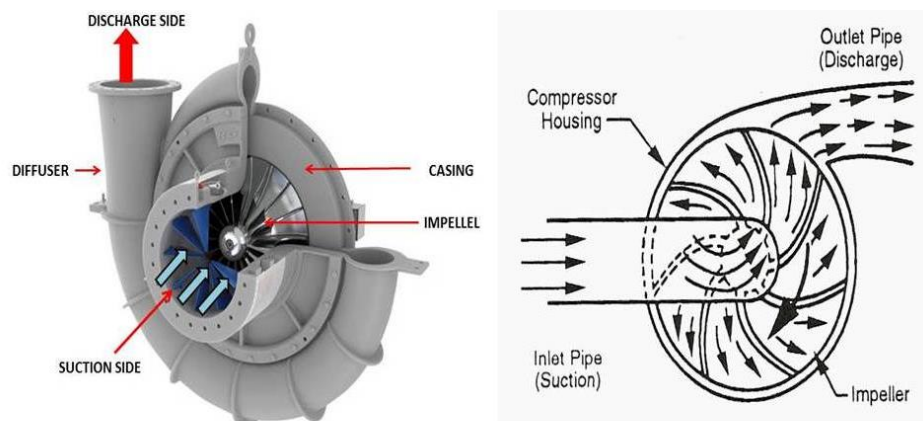


Figura 14. Compressor iònic Linde [29].

2.5.1.2 Centrífugs

Els compressors centrífugs, o dinàmics, apliquen energia cinètica al gas incrementant la seva velocitat mitjançant un element rotatiu, per després convertir aquesta energia cinètica a energia potencial en forma de pressió. Entre cada etapa de compressió el gas es refreda per intercanviadors de calor per incrementar la eficiència de la compressió.



CENTRIFUGAL COMPRESSOR

Figura 15. Compressor centrífug [30].

2.5.2 Selecció

Donat que pot aconseguir relacions de compressió més elevades i, en el cas del nou compressor iònic, la dissipació passiva de calor i la vida més prolongada dels seus components mecànics, la millor opció per comprimir l'hidrogen gas es tracta del compressor reciprocant de Linde, el compressor iònic.

3 Disseny del procés

Un cop determinats quines seran les tecnologies per generar hidrogen, emmagatzemar-lo i subministrar-lo, el següent pas és determinar els processos i dimensionar els equips i la instal·lació fotovoltaica. L'objectiu és precisar els paràmetres que permetran determinar el cost dels equips i el seu consum energètic, per poder així calcular en l'apartat 4 el valor de la inversió econòmica en equips i les despeses d'operació.

3.1 Funcionament del procés

El procés de producció, emmagatzematge i subministrament d'hidrogen es plasma en la següent figura:

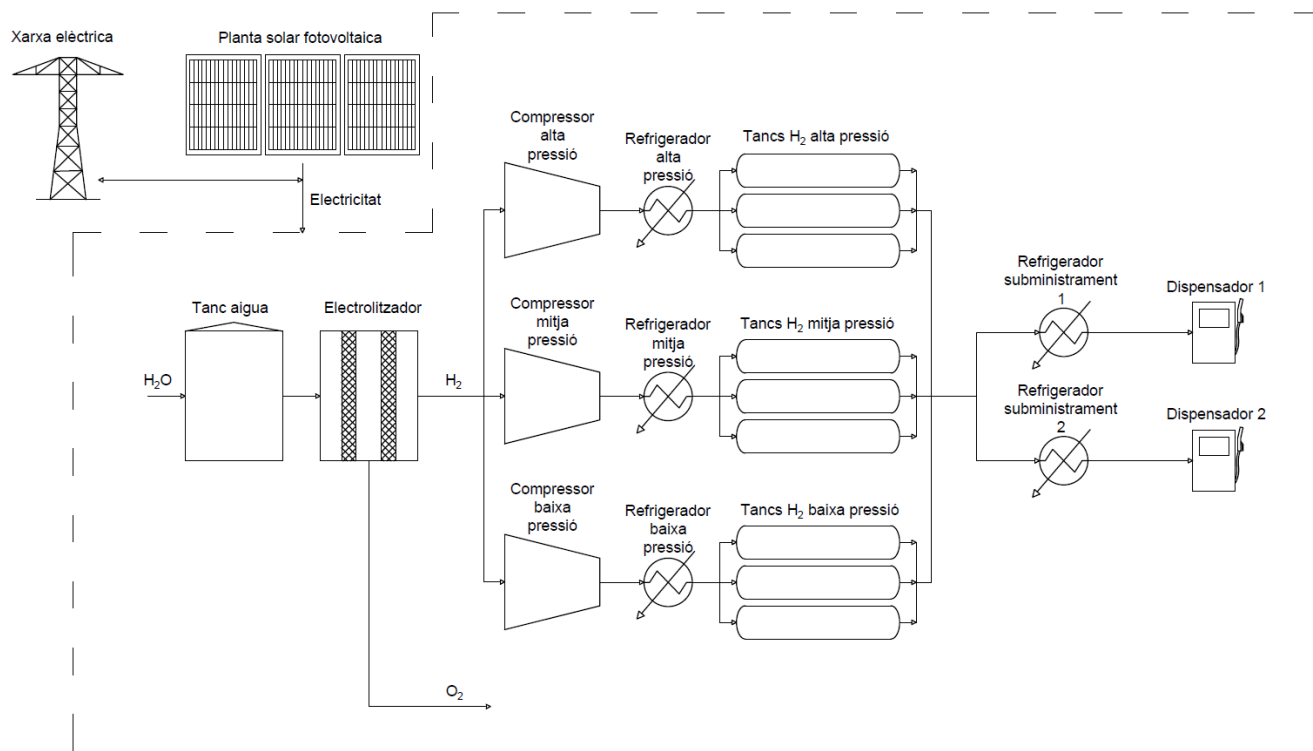


Figura 16. Diagrama de flux de la hidrogenera d'alta pressió.

El propòsit de cada equip és el següent:

- **Planta solar fotovoltaica:** converteix l'energia solar en electricitat i la subministra a la hidrogenera.
- **Tanc aigua:** emmagatzema l'aigua necessària per poder cobrir la demanda diària de l'electrolitzador i l'aigua necessària per operar durant un dia sense subministrament. El tanc es carrega amb aigua de xarxa. Opcionalment, es pot connectar la xarxa d'aigua directament als electrolitzadors durant accions de manteniment. Els electrolitzadors incorporen bombes per vehicular l'aigua del tanc.
- **Electrolitzador:** produeix l'hidrogen a una pressió de 35 bar i 35 °C. Rep aigua des del tanc d'aigua i subministra hidrogen als compressors d'alta, mitja i baixa pressió. L'oxigen generat es ventaja a la atmosfera.
- **Compressors d'alta, mitja i baixa pressió:** pressuritzen l'hidrogen per carregar els tancs d'emmagatzematge. Comprimeixen l'hidrogen de 35 bar fins a 860, 430 i 160 bar emmagatzemar l'alta, mitja i baixa pressió. Cada compressor carrega un

tanc alhora, carregant els tancs d'alta pressió de 700 a 860 bar, els de mitja pressió de 350 a 430 bar i els de baixa pressió de 100 a 160 bar. Quan es carrega per complet un tanc, mitjançant transmissors de pressió s'envia senyal per tancar la vàlvula del tanc i carregar-ne el següent.

- Refrigeradors d'alta, mitja i baixa pressió: refrigeren els corrents d'hidrogen de sortida dels compressors per evitar que durant el procés de càrrega dels tancs la temperatura es mantingui dintre el rang d'operació d'aquests, i que la temperatura final de l'hidrogen emmagatzemat es trobi a 55 °C. Es tracta d'un cicle de refrigeració amb amoníac.
- Tancs d'emmagatzematge d'hidrogen d'alta, mitja i baixa pressió: emmagatzemen l'hidrogen necessari per poder operar diàriament i poder operar durant un dia sense subministrament d'hidrogen. A la vegada, formen part del sistema de subministrament d'hidrogen, conformant el sistema de cascada. Consta d'una sèrie tancs pressuritzats a alta, mitja i baixa pressió. Quan arriba el vehicle, el dispensador registra la seva pressió. Un cop registrada, envia una senyal a la vàlvula de descàrrega del tanc de baixa pressió, que descarrega hidrogen al dipòsit fins que aquest assoleix 100 bar. Un cop assolits, es tanca la vàlvula del tanc de baixa pressió i s'obre el de mitja pressió, que, repetint el procés, carrega el dipòsit fins a 350 bar, moment en el qual es passa al tanc d'alta pressió que omple el dipòsit fins a 700 bar.
- Refrigerador subministrament: refrigera l'hidrogen per tal que durant el procés de càrrega del dipòsit aquest es trobi dintre del seu rang d'operació de -40 i 80 °C, i que la temperatura al final del procés de càrrega sigui de 80 °C.
- Dispensador: mesura la pressió del dipòsit del vehicle, comunicant-se amb el sistema de control per regular les vàlvules de la cascada mentre dispensa l'hidrogen al vehicle.

En l'apartat 8 figuren els diagrames de fluxos del procés (PFD) amb els seus respectius balanços de matèria.

3.2 Dimensionament d'equips

3.2.1 Producció d'hidrogen

3.2.1.1 Tanc d'aigua

L'aigua és la matèria primera per produir l'hidrogen, i és necessari disposar d'un tanc per emmagatzemar-la. El paràmetre per estimar el cost del tanc d'aigua és el volum d'aquest.

El volum del tanc ha de ser suficient per cobrir la demanda diària de l'electrolitzador i tenir una reserva suficient per operar 1 dia sense subministrament d'aigua de xarxa. Per determinar aquest volum, es proposa estudiar com varien les existències en funció del consum i l'ompliment del tanc al llarg del temps.

La producció d'hidrogen és de 2114,3 kilograms diaris, centrada la seva producció de 10:00 del matí a 17:00 de la tarda. El procés per determinar aquest valor es detalla en l'apartat 7.1.

Primerament, es determina quin és el consum d'aigua durant l'operació dels electrolitzadors. El fabricant dona el consum d'aigua per mòdul, i el nombre de mòduls es calcula en l'apartat 3.2.1.2. Per tant:

$$\text{Consum aigua} = \text{Número de mòduls} \cdot \dot{v}_{H_2O \text{ Mòdul}} \quad (3)$$

On:

- $\dot{m}_{H_2O \text{ Mòdul}}$: consum d'aigua per mòdul.

Seguidament, es determina quin és el cabal volumètric d'aigua necessari per omplir el tanc de la següent manera:

$$\text{Cabal d'ompliment del tanc d'aigua} = \frac{\text{Consum aigua} \cdot t_{\text{operació diari}}}{t_{\text{ompliment tanc}}} \quad (4)$$

On:

- $t_{\text{ompliment tanc}}$: temps d'ompliment del tanc

Els resultats obtinguts són els següents:

Taula 6. Resultats consum d'aigua diari.

Número de mòduls	$\dot{v}_{H_2O \text{ Mòdul}} \left(\frac{L}{h}\right)$	$t_{\text{operació diari}} (h)$	$t_{\text{ompliment tanc}} (h)$	Consum d'aigua (m3/h)	Cabal d'ompliment del tanc d'aigua (m3/h)
5883	0,45	8,00	24,00	2,66	0,89

Determinats el consum d'aigua i el cabal d'ompliment del tanc d'aigua, ja es pot determinar el volum del tanc necessari per operar diàriament. Primerament, es defineix un emmagatzemament hipotètic aleatori a una determinada hora del dia, per calcular com evolucionen les existències d'aigua al llarg de les hores i identificar el mínim d'existències. Un cop identificat aquest mínim, es modificarà el valor de l'emmagatzemament hipotètic per fer que el mínim d'existències sigui de 0,00 m3. Es defineix per tant un emmagatzemament hipotètic inicial de 10,00 m3 a una hora on la demanda és mínima. Per calcular les existències a l'hora escollida, es fa el següent càlcul:

$$\text{Existències}_x = \text{Emmagatzemament hipotètic} - \text{Consum}_x + \text{Ompliment}_x \quad (5)$$

On:

- Existències_x: existències en l'hora x.
- Emmagatzemament hipotètic: reserva hipotètica d'aigua.
- Consum_x: consum d'aigua durant l'hora x.
- Ompliment_x: ompliment d'aigua durant l'hora x.

Un cop calculades les existències a l'hora escollida x , es procedeixen a calcular les existències a la resta d'hores del dia com:

$$Existències_i = Existències_{i-1} - Demanda_i + Producció_i \quad (6)$$

On:

- Existències_i: existències d'aigua a l'hora i .
- Existències_{i-1}: existències d'aigua a l'hora prèvia a l'hora i .
- Consum_i: demanda d'aigua durant l'hora i .
- Ompliment_i: ompliment d'aigua durant l'hora i .

Els resultats obtinguts són els següents:

Taula 7. Evolució de les existències d'aigua amb un emmagatzemament hipotètic.

Hora (h)	Consum (m ³ /h)	Ompliment (m ³ /h)	Existències (m ³)
0	0,00	0,89	6,17
1	0,00	0,89	7,05
2	0,00	0,89	7,94
3	0,00	0,89	8,83
4	0,00	0,89	9,72
5	0,00	0,89	10,60
6	0,00	0,89	11,49
7	0,00	0,89	12,38
8	0,00	0,89	13,26
9	0,00	0,89	14,15
10	2,66	0,89	12,38
11	2,66	0,89	10,61
12	2,66	0,89	8,84
13	2,66	0,89	7,08
14	2,66	0,89	5,31
15	2,66	0,89	3,54
16	2,66	0,89	1,77
17	2,66	0,89	0,00
18	0,00	0,89	0,89
19	0,00	0,89	1,77
20	0,00	0,89	2,66
21	0,00	0,89	3,55
22	0,00	0,89	4,44
23	0,00	0,89	5,32

Seguidament, és necessari trobar quin és el valor mínim d'existències, i modificar el valor de l'emmagatzemament hipotètic perquè aquest valor mínim tingui un valor de 0,00 m³. En aquest cas, el mínim es troba a les 17:00 hores, amb 4,72 m³.

Un cop identificat el mínim d'existències, es pot calcular l'emmagatzemament mínim de la següent manera:

$$\text{Emmagatzemament mínim} = \text{Emmagatzemament hipotètic} - \text{Valor mínim d'existències}_m \quad (7)$$

On:

- Emmagatzemament mínim: valor que torna 0,00 el valor mínim d'existències.
- Valor mínim d'existències: valor mínim d'existències al llarg de les hores del dia.

Un cop calculat aquest valor, que dona com a resultat 5,28 m³, es realitza el mateix procediment de càlcul emprat per calcular les existències al llarg de les hores del dia. Es fan servir les expressions (5) i (6) substituint el valor de la reserva hipotètica pel valor de la reserva mínima calculada. En la següent figura es mostra l'evolució de les existències d'aigua al llarg del dia, tant com pel cas d'un emmagatzematge inicial hipotètic de 10 m³, com per l'emmagatzematge optimitzat:

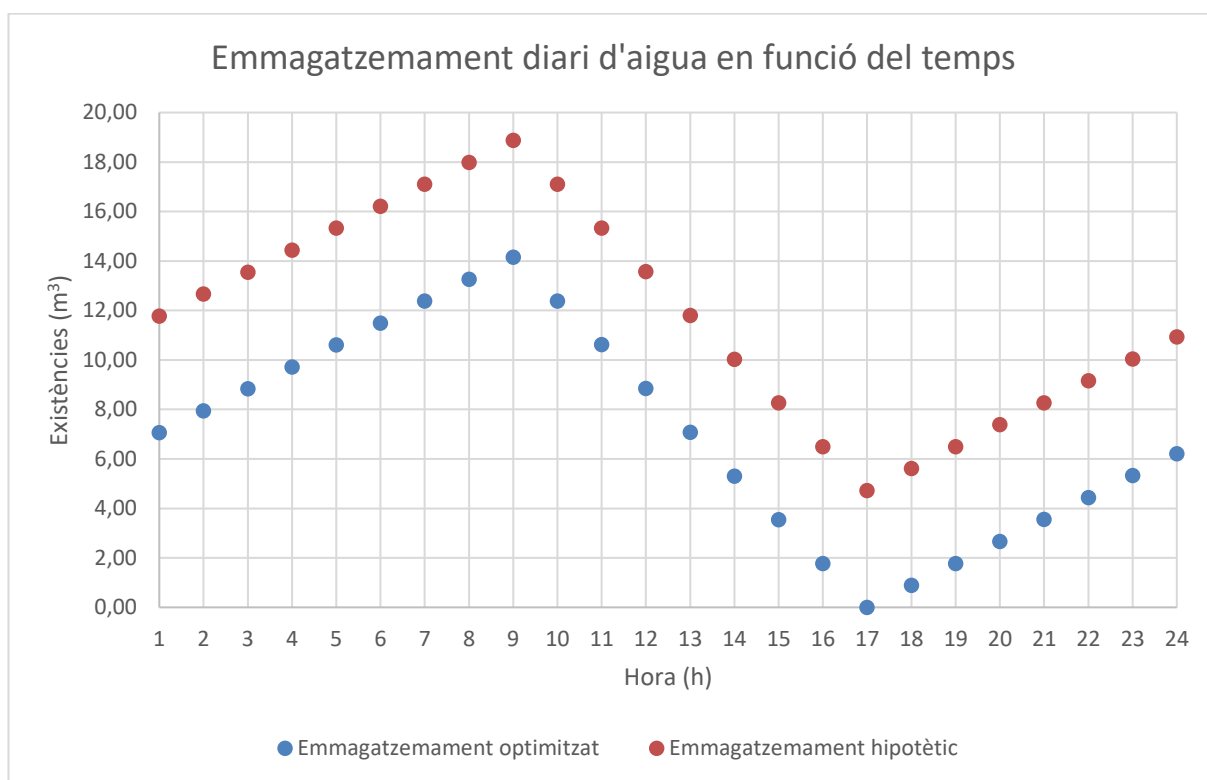


Figura 17. Optimització del volum del tanc d'aigua.

El volum necessari del tanc per poder garantir l'operació diària dels electrolitzadors és de 14,15 m³. Tenint en compte que es desitja tenir addicionalment una reserva d'aigua per operar sense subministrament durant 1 dia, el volum total del tanc es calcula com:

$$Volum\ tanc\ d'aigua = Volum\ operació\ diària + Volum\ reserva \quad (8)$$

Calculant el volum de la reserva com:

$$Volum\ reserva = Consum\ aigua \cdot t_{operació} \quad (9)$$

I dona com a resultat:

Taula 8. Volum del tanc d'aigua.

Volum operació diària (m ³)	Volum reserva (m ³)	Volum tanc (m ³)
14,15	21,29	35,44

3.2.1.2 Electrolitzador

És l'equip que porta a terme la producció d'hidrogen. En aquest cas, en l'estudi d'alternatives, ja s'ha trobat un fabricant i un estudi que indica el preu estimat per l'equip. El paràmetre necessari per calcular aquest cost es tracta del cost pel kilowatt de potència de l'equip. Per tant, és necessari determinar la potència total en kilowatts de l'electrolitzador.

El fabricant produeix els electrolitzadors en forma de petits mòduls, la potència dels quals és coneguda, de 2,2 kW per mòdul. Cada mòdul és capaç de produir 1,08 kg d'hidrogen al dia. Amb aquesta informació, és possible calcular el número de mòduls totals i la potència total requerida:

$$Número\ de\ mòduls = \frac{\dot{m}_{H_2\text{Diari}}}{\dot{m}_{H_2\text{Mòdul}}} \cdot \frac{t_{dia}}{t_{operació\ diari}} \quad (10)$$

On:

- $\dot{m}_{H_2\text{Diari}}$: cabal màssic d'hidrogen produït diàriament.
- $\dot{m}_{H_2\text{Mòdul}}$: cabal màssic d'hidrogen produït per mòdul.
- t_{dia} : temps dia.
- $t_{operació\ diari}$: temps d'operació diari.

Un cop determinats els mòduls totals, es calcula la potència total de la següent manera:

$$Potència\ total = Número\ de\ mòduls \cdot Potència\ mòdul \quad (11)$$

Els resultats obtinguts són els següents:

Taula 9. Resultats càlcul potència total de l'electrolitzador.

$\dot{m}_{H_2 \text{Diari}} \left(\frac{kg}{dia} \right)$	$\dot{m}_{H_2 \text{Mòdul}} \left(\frac{kg}{dia} \right)$	$t_{dia} (h)$	$t_{operació \text{ diari}} (h)$	Número de mòduls	Potència mòdul (kW)	Potència total (kW)
2.114,23	1,08	24,00	8,00	5.883	2,2	12.942,60

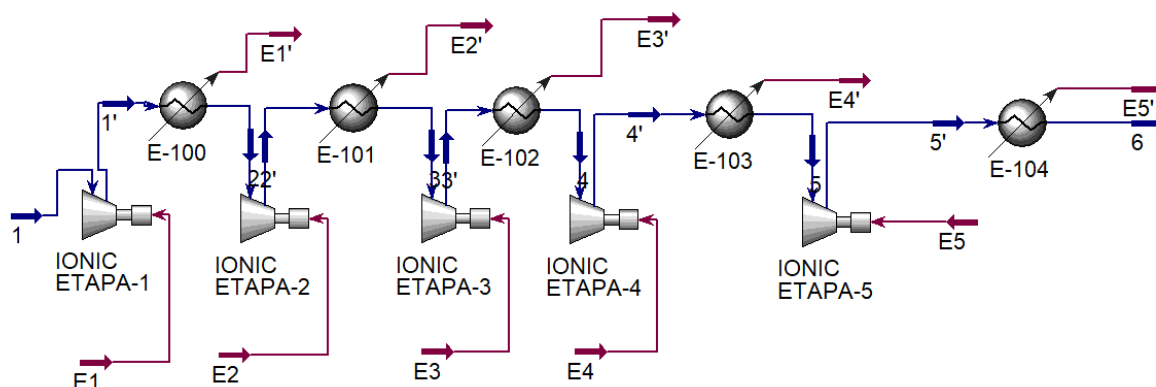
3.2.2 Emmagatzematge

3.2.2.1 Compressors d'alta, mitja i baixa pressió

En l'estudi d'alternatives es determina que es faran servir els compressors iònics de *Linde* per carregar els tancs d'emmagatzematge [31]. El fabricant no dona dades del seu cost, així que serà necessari estimar el seu preu, i, per fer-ho, és necessari conèixer la seva potència.

Per falta de dades de condicions d'operació per part del fabricant, es decideix simular el funcionament del compressor mitjançant el software *Aspen HYSYS*, fent servir dades que dona el fabricant i prenent hipòtesis on no hi ha informació.

Linde, en els seus fulls d'especificacions, afirma que els seus compressors compten amb cinc etapes. Per tant, dintre d'*Aspen HYSYS*, se simula amb una relació de compressió constant per cada etapa, un total de 5 etapes de compressió. Entre etapes s'introdueix una unitat de refrigeració fictícia, que simula l'efecte de la dissipació de calor passiva que es duu a terme en el pistó. Al no tenir dades de temperatures de sortida de compressor o etapes ni calor dissipada, es treballa amb la hipòtesi que l'hidrogen comprimit es refreda fins a 55 °C abans d'entrar a la següent etapa.

Figura 18. Simulació compressor iònic amb *Aspen HYSYS*.

Aquests són els següents paràmetres generals definits al *software* per dimensionar cada etapa:

- Mode d'operació: reciproc.
- Eficiència adiabàtica: 75 %.
- Eficiència motor elèctric: 85 %.
- Quantitat de cilindres: 1.
- Temperatura d'alimentació del compressor: 35 °C.

- Temperatura de l'hidrogen alimentat a cada etapa: 35 °C.

Per dimensionar cada compressor, però, farà falta definir un últim paràmetre: el cabal màssic. Aquest paràmetre està directament relacionat amb la quantitat d'hidrogen que s'emmagatzema a cada tanc a les diferents pressions. Aquest càlcul es detalla en l'apartat 3.2.2.3. El càlcul que es realitza, en resum, és la proporció d'hidrogen que ha de aportar cada tanc a les diferents pressions al dipòsit del vehicle. Aquest càlcul reflexa que l'alta pressió representa un 40,92 % de l'hidrogen emmagatzemat, la mitja pressió el 39,80 % i la baixa pressió el 19,29 %. Per tant, el cabal de cada compressor es calcula com:

$$Cabal\ compressor = \dot{m}_{H_2\ Horari} \cdot \%_{H_2\ Emmagatzemat\ a\ P_i} \quad (12)$$

On:

- $\dot{m}_{H_2\ Horari}$: cabal màssic d'hidrogen produït pels electrolitzadors.
- $\%_{H_2\ Emmagatzemat\ a\ P_i}$: proporció d'hidrogen emmagatzemat a una determinada pressió.

Els cabals calculats són els següents:

Taula 10. Resultats càlcul cabal màssic dels compressors.

Compressor	$\dot{m}_{H_2\ Horari} \left(\frac{kg}{h}\right)$	$\%_{H_2\ Emmagatzemat\ a\ P_i}$	Cabal compressor (kg/h)
Alta pressió	264,28	40,92	108,13
Baixa pressió	264,28	39,80	105,18
Mitja pressió	264,28	19,29	50,98

Finalment, en la següent taula es mostren els paràmetres específics pels compressors d'alta, mitja i baixa pressió, així com la potència calculada pel programa:

Taula 11. Resultats càlcul potència total dels compressors.

Compressor	Relació compressió per etapa	Pressió d'entrada (bar)	Pressió de sortida (bar)	Cabal màssic (kg/h)	Potència total (kW)
Alta pressió	1,90	35,00	860,00	108,13	213,61
Baixa pressió	1,65	35,00	430,00	105,18	101,57
Mitja pressió	1,36	35,00	160,00	50,98	41,89

3.2.2.2 Refrigeració d'alta, mitja i baixa pressió

A conseqüència de l'etapa de compressió d'hidrogen, aquest experimenta un increment en la seva temperatura. Aquest fet causa una disminució de la seva densitat, fent que la quantitat d'hidrogen emmagatzemada sigui menor. Addicionalment, el procés d'ompliment dels tancs d'emmagatzematge causen un increment de la temperatura dins d'ells com a conseqüència de l'increment de la pressió.

Aquest increment de temperatura, per tant, té un impacte negatiu tant per la disminució en la massa d'hidrogen emmagatzemat com per l'increment, i la possible superació, de la temperatura d'operació dels tancs d'emmagatzematge, que es troba entre -40 i 80 °C. En conseqüència, és necessari establir una etapa de refrigeració que permeti que l'hidrogen un cop emmagatzemat al tanc es trobi a 55°C i que durant el procés de càrrega la temperatura es trobi dintre del rang d'operació del tanc.

Primerament, s'ha de determinar el mètode per refrigerar. Per fer-ho, es determinarà fins a quina temperatura és necessari refredar-lo, ja que aquest factor determinarà el mètode de refrigeració: per temperatures properes a l'ambiental es poden fer servir aerorefrigeradors, i per temperatures per sota de l'ambiental és necessari refrigerar amb cicles de refrigeració, que fan servir gasos refrigerants, en aquest cas, l'amoniac.

Per determinar aquesta temperatura, primer es parteix de les equacions d'ompliment de tanc. Es considera que es tracta d'un procés adiabàtic:

$$\Delta U = \dot{m}_c h_c t \quad (13)$$

On:

- ΔU : variació d'energia interna (kJ).
- \dot{m}_c : cabal màssic del compressor (kg/s).
- h_c : entalpia de l'hidrogen a la sortida del compressor (kJ/kg).
- t : temps (s).

Gràcies a aquesta expressió, es pot saber l'energia interna dintre del dipòsit en funció del temps per un cabal d'hidrogen fix. Per fer-ho, fent servir el software *EES*, és possible obtenir gràcies a les seves bases de dades de propietats termodinàmiques quina és temperatura i pressió del sistema en funció de l'energia interna i el volum específic del sistema per un temps donat.

No obstant això, s'ha d'adaptar l'expressió (13) per poder introduir-la a *EES*. L'objectiu és aïllar l'energia interna per al moment " t ".

El producte del cabal màssic per un temps determinat és igual a l'acumulació de massa, on M_t és la massa total del sistema en el moment t , i M_0 és la massa inicial del sistema:

$$\dot{m}_c t = M_t - M_0 \quad (14)$$

La variació d'energia interna és la diferència de l'energia interna en un temps determinat menys la energia interna inicial:

$$\Delta U = M_t u_t - M_0 u_0 \quad (15)$$

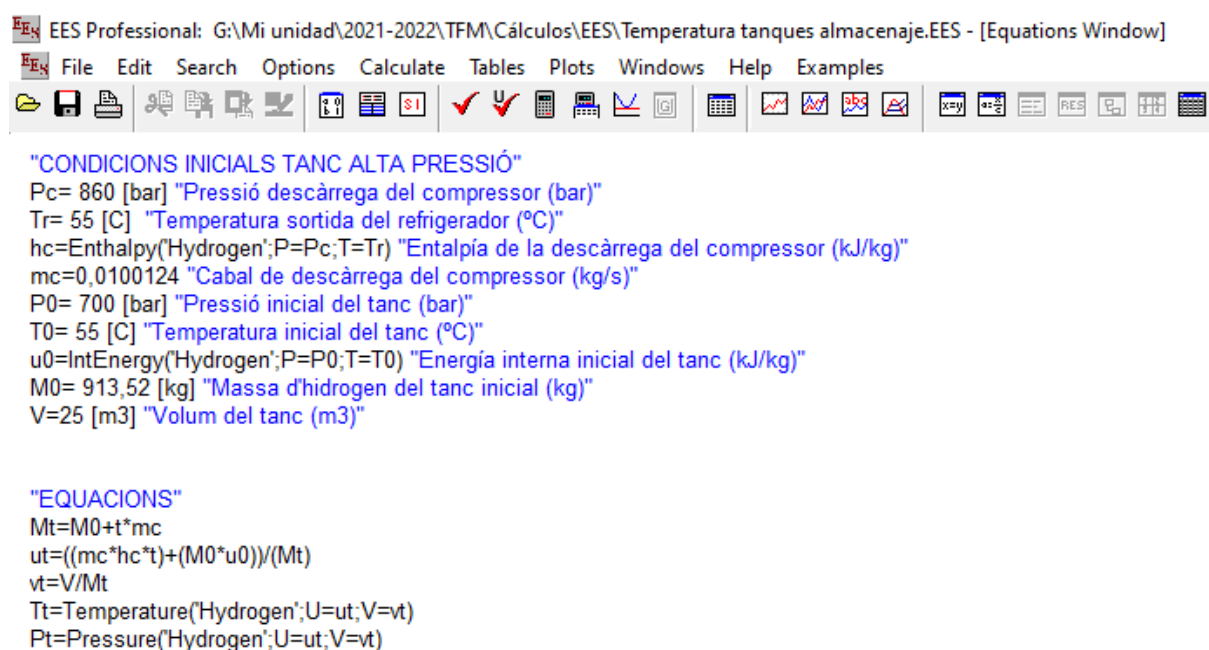
Substituint aquests dos termes en l'equació (13), s'obté l'equació (16):

$$\dot{m}_c h_{c,t} = (M_0 + \dot{m}_c t) u_t - M_0 u_0 \quad (16)$$

El següent pas és aïllar el terme u_t de l'equació (16):

$$u_t = \frac{\dot{m}_c h_{c,t} + M_0 u_0}{M_0 + \dot{m}_c t} \quad (17)$$

Tot seguit, dintre de *EES*, es defineixen les condicions inicials i s'introdueix l'expressió (17). Per finalitzar el codi, s'introdueixen els paràmetres T_t i P_t , els quals tornen la temperatura i la pressió del sistema en funció de la energia interna en el moment t . Tot seguit es mostra el codi introduït al *software* per determinar la temperatura a alta pressió. Els codis per determinar la temperatura a mitja i baixa pressió es troben en l'apartat 7.2, en la Figura 37, Figura 38 i Figura 39.



```

EES Professional: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\Cálculos\EES\Temperatura tanques almacenaje.EES - [Equations Window]
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

"CONDICIONS INICIALS TANC ALTA PRESSIÓ"
Pc= 860 [bar] "Pressió descàrrega del compressor (bar)"
Tr= 55 [C] "Temperatura sortida del refrigerador (°C)"
hc=Enthalpy('Hydrogen';P=Pc;T=Tr) "Entalpia de la descàrrega del compressor (kJ/kg)"
mc=0,0100124 "Cabal de descàrrega del compressor (kg/s)"
P0= 700 [bar] "Pressió inicial del tanc (bar)"
T0= 55 [C] "Temperatura inicial del tanc (°C)"
u0=IntEnergy('Hydrogen';P=P0;T=T0) "Energia interna inicial del tanc (kJ/kg)"
M0= 913,52 [kg] "Massa d'hidrogen del tanc inicial (kg)"
V=25 [m3] "Volum del tanc (m3)"

"EQUACIONS"
Mt=M0+t*mc
ut=((mc*hc*t)+(M0*u0))/(Mt)
vt=V/Mt
Tt=Temperature('Hydrogen';U=ut;V=vt)
Pt=Pressure('Hydrogen';U=ut;V=vt)
    
```

Figura 19. Codi càlcul pressió i temperatura al tanc amb EES.

Ara ja és possible generar una taula amb l'opció "*New parametric table*", per obtenir la pressió i temperatura del tanc d'emmagatzematge. En les següents gràfiques es mostren els resultats obtinguts pels tancs d'alta, mitja i baixa pressió en el cas que no hi hagués refrigeració després del compressor, la sortida del qual es troba a una temperatura de 55 °C.

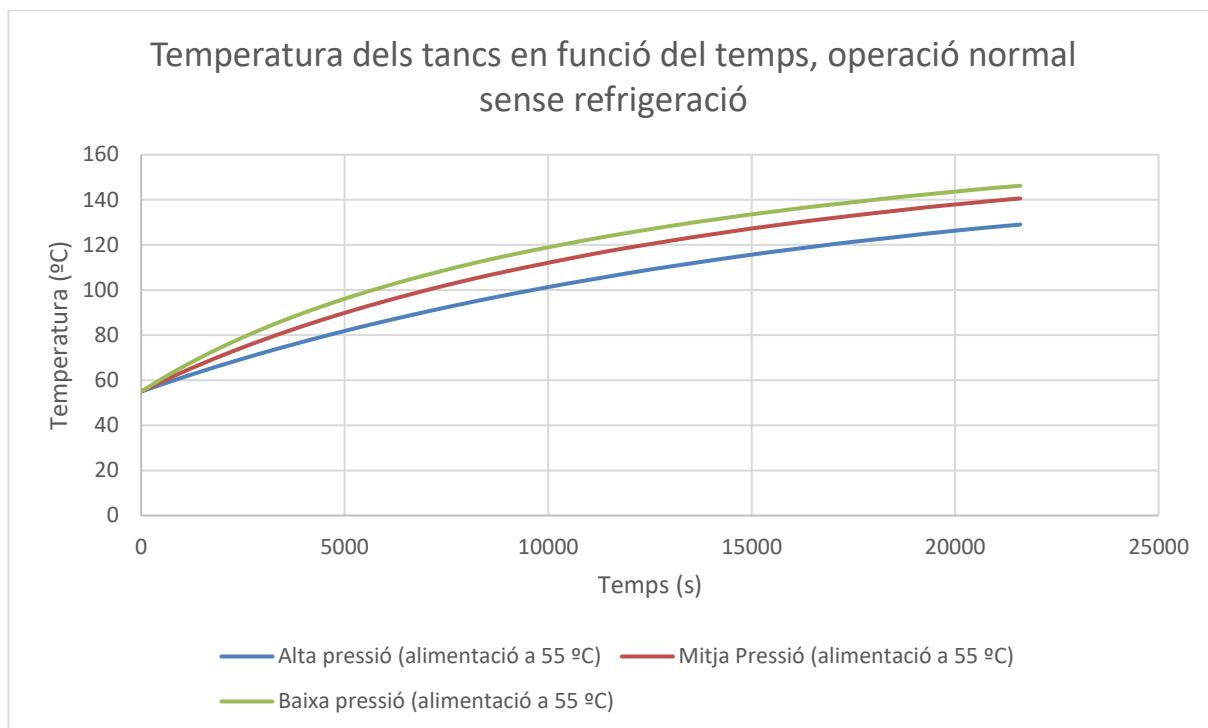


Figura 20. Temperatura de l'hidrogen dels tancs en funció del temps, alimentació a 55 °C, operació normal.

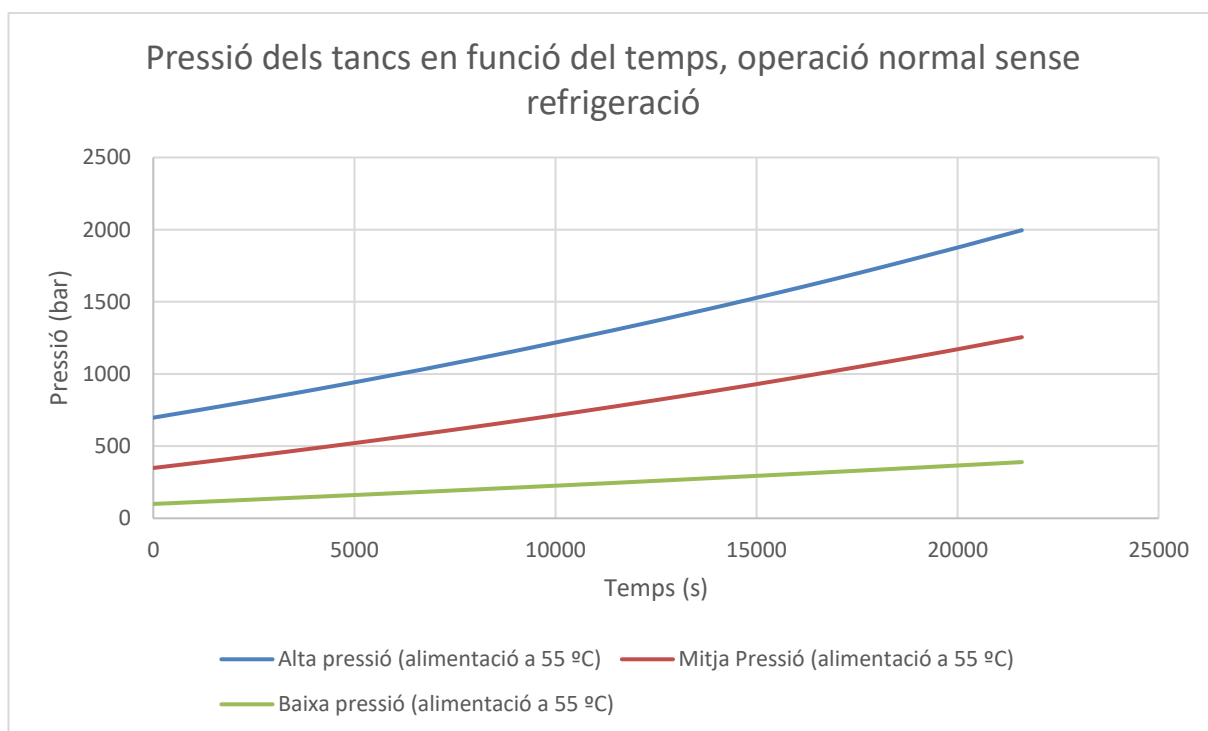


Figura 21. Pressió de l'hidrogen dels tancs en funció del temps, alimentació a 55 °C, operació normal.

Amb les dades obtingudes, es realitza una interpolació per obtenir quina és la temperatura de l'hidrogen en els moments que els tancs assoleixen la seva pressió màxima

d'operació. Per fer la interpolació es fa servir la funció d'Excel "PRONOSTICO", on introduint la pressió i temperatura desitjada i els valors tabulats pel *software*, torna el valor desitjat. Els resultats són els següents:

Taula 12. Temperatures de l'hidrogen dels tancs d'emmagatzematge.

Tipus de tanc	Pressió màxima d'operació (bar)	Temperatura a pressió màxima d'operació (°C)	Temperatura de sortida del refrigerador (°C)
Alta pressió	860,00	76,01	55,00
Mitja pressió	430,00	79,48	55,00
Baixa pressió	160,00	92,10	55,00

Com es pot observar, en el cas de l'alta i mitja pressió, cauen dintre del rang de temperatures d'operació del tanc, mentre que el de baixa pressió sobrepassa el límit. Canviant el valor de la temperatura de sortida del refrigerador " T_r " al codi d'EES, es va iterant fins a trobar les temperatures que fan que la temperatura màxima del procés d'ompliment del tanc sigui de 55°C. A la Taula 13 es mostren aquestes temperatures, i a la figura Figura 32 i Figura 33 es mostra l'efecte de la temperatura i la pressió en funció del temps durant el procés d'ompliment en l'operació normal de la planta.

Adicionalment, es comprova si durant el procés de posada en marxa de la planta, on els tancs es carreguen des de pressió atmosfèrica, la temperatura supera els 55 °C amb les mateixes temperatures de sortida dels refrigeradors. Es determina que en cap moment es superen. A la Figura 34 i Figura 35 es mostra l'evolució de la temperatura i pressió dels tancs per aquests casos.

Taula 13. Temperatures de l'hidrogen dels tancs d'emmagatzematge en operació normal.

Tipus de tanc	Pressió màxima d'operació (bar)	Temperatura a pressió màxima d'operació (°C)	Temperatura de sortida del refrigerador necessària (°C)
Alta pressió	860,00	54,99	-83,20
Mitja pressió	430,00	54,94	-62,01
Baixa pressió	160,00	54,76	-48,56

Les temperatures necessàries per refrigerar es troben molt per sota de la temperatura ambiental, per tant, mètodes de refrigeració com els aerorefrigeradors queden descartats. Es fa necessari, per tant, emprar un cicle de refrigeració. Es proposa fer servir un cicle de refrigeració senzill, utilitzant amoníac com a gas refrigerant:

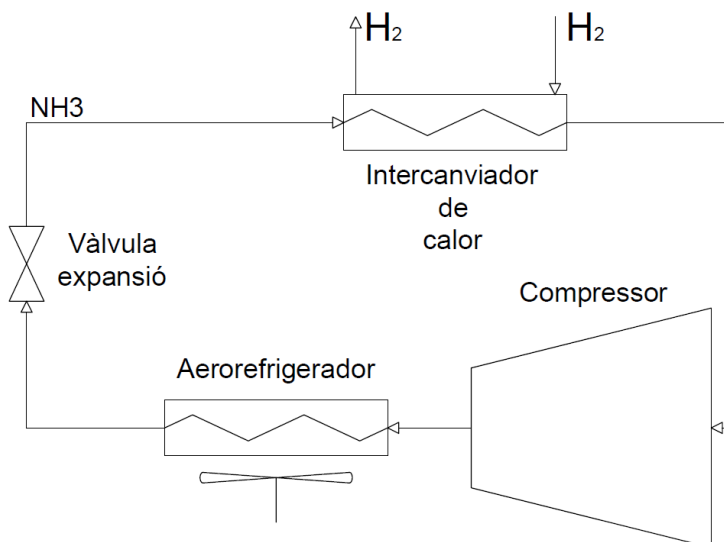


Figura 22. Cicle de refrigeració proposat.

Aquest cicle està compost per un compressor, el qual eleva la pressió de l'amoniac, un aerorefrigerador, el qual el refreda fins a temperatures properes a la temperatura ambient, una vàlvula d'expansió, on el gas s'expandeix de forma adiabàtica donant lloc a una caiguda de la seva temperatura, i, per últim, un intercanviador de calor on l'amoniac refreda l'hidrogen fins a les temperatures desitjades.

Els paràmetres per estimar els costos dels equips són la potència del compressor, l'àrea d'intercanvi de l'aerorefrigerador i l'àrea d'intercanvi de l'intercanviador de calor. No s'han trobat preus ni formes d'estimar el cost de la vàlvula d'expansió.

Per dimensionar aquests equips es farà servir els *softwares Aspen HYSYS* i *Aspen EDR*. Amb *Aspen Hysys* es simularà el procés i s'obindrà la potència del compressor i l'àrea d'intercanvi de l'intercanviador de calor. Amb *Aspen EDR* s'obindrà l'àrea d'intercanvi dels aerorefrigeradors. En la següent figura es mostra el diagrama de blocs de la simulació realitzat amb *Aspen HYSYS*:

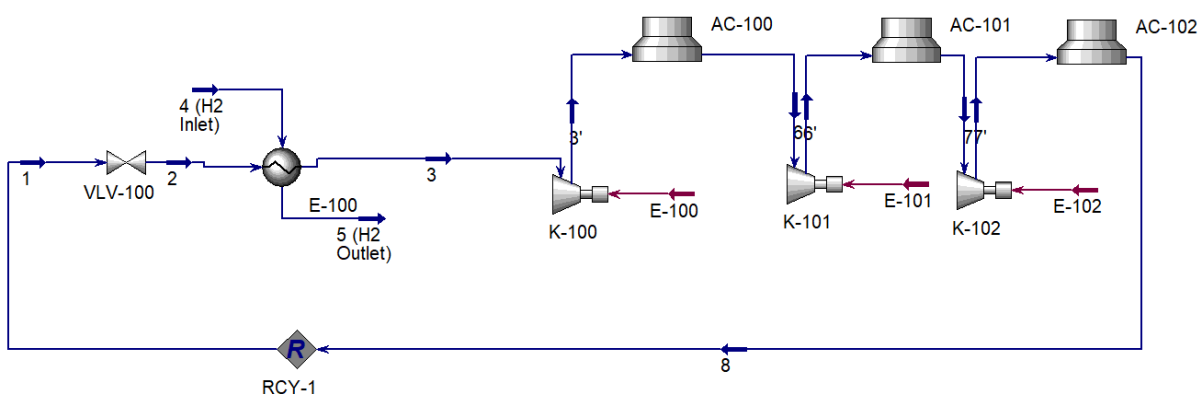


Figura 23. Simulació cicle de refrigeració amb Aspen Hysys.

Se simula el compressor d'amoníac com un compressor de 3 etapes, amb relacions de compressió fixes. Aquests són els paràmetres introduïts al software per dimensionar els compressors:

- Mode d'operació: centrífug.
- Relació de compressió per etapa: 9,21.
- Eficiència adiabàtica: 75 %.
- Eficiència motor elèctric: 85 %.

Entre cada una de les etapes hi ha unitats aerorefrigeradores. Es defineix que la temperatura de sortida de cada aerorefrigerador sigui de 55 °C. Seguidament, a la sortida del compressor s'introdueix un bloc "recycle", per tal que el programa interpreti que la corrent s'està reciclant. Aquesta corrent es porta a una vàlvula d'expansió, passant seguidament per l'intercanviador de calor i finalitzant en la entrada del compressor.

A la sortida de la vàlvula d'expansió es defineix la temperatura desitjada de l'amoníac, i el programa estableix la caiguda de pressió necessària. A continuació, s'estableix el cabal i la temperatura del corrent d'hidrogen d'entrada del intercanviador (corrent 4), i es defineix la temperatura desitjada del corrent de sortida (corrent 5). Amb aquestes dades, el programa estableix el cabal d'amoníac necessari i la potència del compressor i àrea d'intercanvi de l'intercanviador.

No obstant, *HYSYS* no dimensiona els aerorefrigeradors, i per poder obtenir l'àrea d'intercanvi és necessari fer servir el software *Aspen EDR*. Dintre del software, s'estableixen les temperatures de sortida de l'amoníac i el cabal d'aire de refrigeració:

		Tube Side	
		In	Out
Fluid name		Amoníac	
Mass flow rate (total)	kg/s	0,0528	
Temperature	°C	311,1	55
Vapor mass fraction			
Operating pressure (absolute)	kPa	27,62	
Heat exchanged	kW		
Estimated pressure drop	bar	0	
Allowable pressure drop	bar	0,02	
Fouling resistance	m ² -K/W	0	

Figura 24. Condicions element refrigerat, aerorefrigerador AC-100 alta pressió.

The screenshot shows the 'Outside Tube' configuration window in Aspen EDR. It includes the following fields and values:

- Fluid name: Aire
- Air/Gas mass flow rate: 55,5556 kg/s
- Face velocity: m/s
- Required bundle pressure drop: Pa
- Air/Gas dry bulb design temperatures: 45°C (In), Out
- Minimum ambient temperature: 0°C
- Operating pressure specification: Altitude and Gauge pressure
- Altitude above sea level: 0 m
- Inlet pressure (gauge): 0 Pa
- Inlet pressure (absolute): bar
- Allowable pressure drop: 0,002 bar
- Fouling resistance: 2E-05 m²-K/W
- Inlet humidity parameter: (dropdown)
- Humidity ratio: (dropdown)
- Relative humidity (%): (dropdown)
- Flow fraction of air to this service: (dropdown)

Figura 25. Condicions element refrigerant, aerorefrigerador AC-100 alta pressió.

Amb aquestes dades, *Aspen EDR* és capaç de donar l'àrea d'intercanvi i la potència dels ventiladors. A les següents taules es mostren els resultats obtinguts per la potència dels compressors, àrees d'intercanvi dels intercanviadors i àrees d'intercanvi i potències dels aerorefrigeradors pels cicles de refrigeració d'alta, mitja i baixa pressió. Aquests valors són necessaris per estimar el cost dels equips.

Taula 14. Resultats dimensionament dels equips del cicle de refrigeració d'alta pressió.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	95,77	kW
Aerorefrigerador AC-100	894,80	m ²
Aerorefrigerador AC-101	894,80	m ²
Aerorefrigerador AC-102	878,00	m ²
Intercanviador de calor	10,05	m ²

Taula 15. Resultats dimensionament dels equips del cicle de refrigeració de mitja pressió.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	79,72	kW
Aerorefrigerador AC-100	349,70	m ²
Aerorefrigerador AC-101	267,40	m ²
Aerorefrigerador AC-102	266,50	m ²
Intercanviador de calor	6,03	m ²

Taula 16. Resultats dimensionament dels equips del cicle de refrigeració de baixa pressió.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	33,73	kW
Aerorefrigerador AC-100	185,10	m ²
Aerorefrigerador AC-101	143,10	m ²
Aerorefrigerador AC-102	107,10	m ²
Intercanviador de calor	5,68	m ²

En la següent taula es mostra la potència dels aerorefrigeradors, dada necessària en l'apartat 7.6.2 per calcular les despeses d'operació:

Taula 17. Potència dels aerorefrigeradors.

Cicle de refrigeració	Potència (kW)
Aerorefrigeradors cicle alta pressió	54,50
Aerorefrigeradors cicle mitja pressió	11,06
Aerorefrigeradors cicle baixa pressió	0,94

En l'annex 7.7 s'adjunten els fulls de resultats generats per Aspen EDR pels aerorefrigeradors.

3.2.2.3 Tancs d'emmagatzematge d'hidrogen

El paràmetre per determinar el cost dels tancs d'emmagatzematge és la quantitat de kilograms emmagatzemats.

La demanda al llarg del dia no és constant, sinó que té un perfil assimilable a una distribució normal amb els pics de consum centrats a les 14:00 i 15:00 hores:

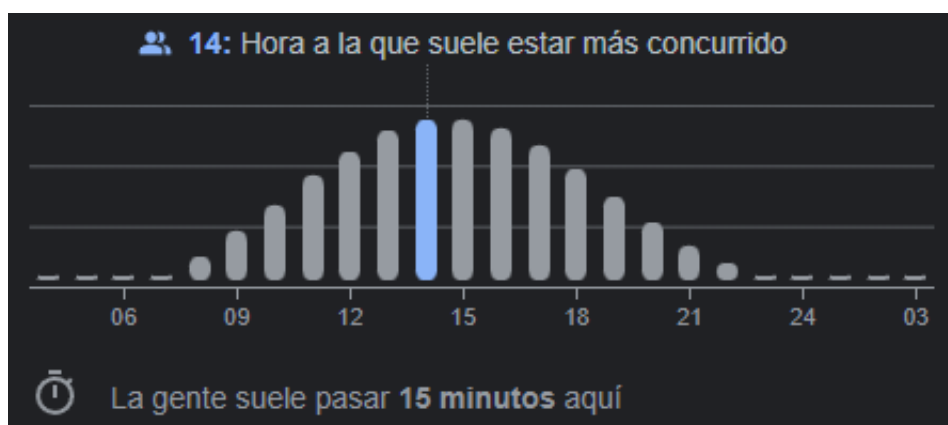


Figura 26. Gràfica demanda en funció del temps.

Si no es disposés d'una reserva mínima d'hidrogen, no seria possible cobrir la demanda, atès que els pics d'aquesta sobrepassen els kilograms de producció d'hidrogen. Tal com succeeix amb el tanc d'aigua, es fa necessari calcular quants kilograms d'hidrogen que com a mínim són necessaris per poder subministrar hidrogen sense problemes d'estoc i assegurar una reserva equivalent a 1 dia de producció per operar en casos d'avaries o manteniments en la planta.

El procés de càlcul és idèntic al procés realitzat en l'apartat 3.2.1.1. Resumint el procés, primerament es calcula l'emmagatzematge mínim necessari per operar diàriament: es calcula un emmagatzematge hipotètic a una hora on la demanda es mínima de 1000 kg d'hidrogen, i es grafica l'evolució de les existències al llarg del dia. Es localitza el punt mínim d'existències i es modifica l'emmagatzematge hipotètic per tal que el punt mínim d'existències es torni de 0,00 kilograms. Així, el punt màxim d'existències correspon a la capacitat en massa que s'ha d'emmagatzemar per operar diàriament. En la següent figura es representa l'evolució de les existències d'hidrogen al llarg del dia:

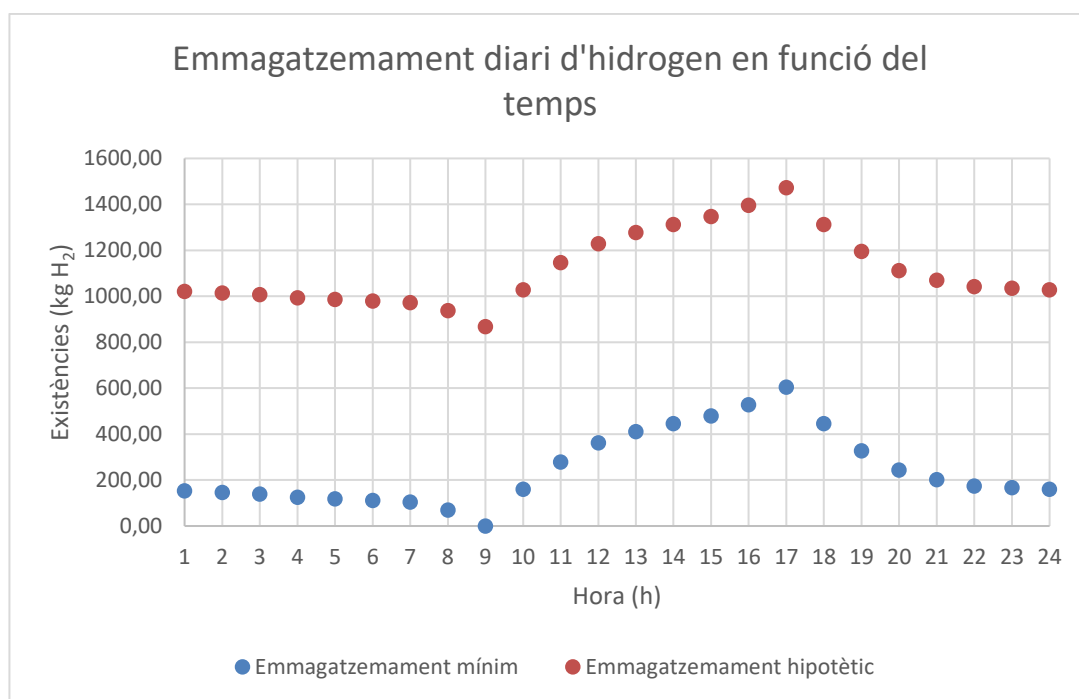


Figura 27. Emmagatzemament diari mínim d'hidrogen en funció del temps.

La capacitat d'emmagatzematge mínim d'hidrogen en aquest cas és de 605,06 kg, corresponent al màxim d'estoc a les 17:00 hores. A aquest valor s'ha de sumar la quantitat corresponent a 1 dia de producció:

$$\text{Hidrogen emmagatzemat} = 605,06 + 2114,23 = 2719,29 \text{ kg H}_2 \quad (18)$$

Un cop calculada la massa d'hidrogen que és necessària tenir emmagatzemada, s'ha de calcular la distribució dels tancs. Aquests tenen tres pressions: 860, 430 i 160 bar. Per començar, s'ha de determinar la distribució d'aquests tancs. És necessari calcular quants kilograms d'hidrogen aporta cada tanc de la cascada al dipòsit del vehicle. El dipòsit d'aquests

vehicles tenen una capacitat de 50 kg a 700 bar, amb un volum de 1,32 m³. El sistema de cascada carrega els dipòsits a 700, 350 i 100 bar. Fent servir l'expressió (19), l'equació dels gasos ideals amb factor de compressibilitat, és possible determinar la quantitat de mols del dipòsit en les diferents fases de càrrega d'aquest, determinant quanta massa aporta cada tanc. El factor de compressibilitat Z s'obté mitjançant el software *EES*.

$$n_i = \frac{P_i V_i}{Z_i R T} \quad (19)$$

On:

- P: pressió del dipòsit del vehicle.
- V: volum del dipòsit del vehicle.
- Z: factor de compressibilitat de l'hidrogen a P_i i T.
- n: mols d'hidrogen.
- R: constant dels gasos ideals ($8,31 \cdot 10^{-5} \frac{m^3 bar}{K mol}$).
- T: temperatura del tanc del vehicle (40 °C).

I, fent servir la següent expressió, es converteixen els mols a kilograms d'hidrogen:

$$Kilograms\ d'hidrogen = n_i \cdot M_{H_2} \quad (20)$$

On:

- M_{H_2} : massa molar de l'hidrogen (2,01 kg/kmol)

Fent la diferència entre la massa del dipòsit carregat a una pressió menys la massa del dipòsit carregat a la pressió de càrrega anterior, es pot conèixer la massa aportada per cada pressió de la cascada:

Taula 18. Resultats del càlcul de la proporció de masses aportada per la cascada.

Pressió descàrrega cascada (bar)	Pressió dipòsit (bar)	Factor compressibilitat Z	Massa dipòsit vehicle (kg)	Massa aportada per la cascada (kg)	% aportat per la cascada al dipòsit
860	700	1,43	50	20,46	40,92
430	350	1,21	29,54	19,90	39,80
160	100	1,06	9,64	9,64	19,29

Corresponent l'emmagatzematge d'hidrogen a 2719,29 kg, i tenint el % de kilograms aportat per cada tanc a les seves corresponents pressions al dipòsit, la massa d'hidrogen emmagatzemada correspon a:

Taula 19. Emmagatzemament útil de la cascada.

Pressió cascada	emmagatzematge	% aportat per la cascada al dipòsit	Emmagatzemament útil de la cascada (kg)
Alta pressió		40,92	1112,64
Mitja pressió		39,80	1082,21
Baixa pressió		19,29	524,43

L'emmagatzemament útil correspon a l'hidrogen utilitzat per carregar el dipòsit, però no correspon a l'emmagatzematge total del tanc. Prenem per exemple el tanc d'alta pressió: aquest descarrega de 860 bar fins 700 bar. Aquest es l'emmagatzemament útil, ja que per sota de 700 bar es deixa de carregar el dipòsit per diferències de pressió. És necessari per tant, calcular també la massa necessària per pressuritzar els tancs de la cascada fins les pressions en les quals deixen de poder carregar el dipòsit.

Per realitzar aquest càlcul es planteja fer un sistema d'equacions, on cada equació és l'equació dels gasos ideals amb factor de compressibilitat en els moments en què el tanc es troba carregat a la seva pressió màxima i on el tanc es troba a la pressió on està descarregat:

$$\begin{cases} P_c V = n_c Z_c R T \\ P_d V = n_d Z_d R T \end{cases} \quad (21)$$

On:

- P_c : pressió del tanc carregat.
- P_d : pressió del tanc descarregat.
- n_c : mols tanc carregat.
- n_d : mols tanc descarregat.
- Z_c : factor compressibilitat tanc carregat.
- Z_d : factor compressibilitat tanc descarregat.
- R: constant dels gasos ideals ($8,31 \cdot 10^{-5} \frac{m^3 bar}{K mol}$).
- T: temperatura del tanc (55°C).
- V: volum del tanc (25 m³).

En aquest sistema les incògnites desconegudes són n_c i n_d . El terme n_c es pot expressar com:

$$n_c = n_d + n_u \quad (22)$$

On:

- n_u : mols d'emmagatzemament útil.

Els mols d'emmagatzemament útil són els mols utilitzats per carregar el dipòsit, calculats en forma de massa en la Taula 19. Per resoldre el sistema es comença aïllant el volum del segon terme:

$$V = \frac{n_d Z_d R T}{P_d} \quad (23)$$

Tot seguit, es substitueix en la primera equació els termes n_c i V obtinguts en les equacions (22) i (23):

$$P_c \frac{n_d Z_d R T}{P_d} = (n_d + n_u) Z_c R T \quad (24)$$

I, aïllant el terme n_d s'obté la expressió que permet calcular els mols quan el tanc es troba descarregat:

$$n_d = \frac{-n_u P_d Z_c}{P_d Z_c - P_c Z_d} \quad (25)$$

Per últim, substituint el resultat de l'equació (25) a l'equació (22), s'obté el valor dels mols totals carregats a cada tanc. En la següent taula es mostren els resultats obtinguts per a cada un dels tancs:

Taula 20. Resultats resolució sistema d'equacions de gasos per un tanc.

Pressió cascada	P_c (bar)	P_d (bar)	Z_c	Z_d	V (m ³)	T (°C)	n_u (kmol)	n_d (kmol)	n_c (kmol)
Alta pressió	860,00	700,00	1,51	1,41	25,00	55,00	69,03	454,49	523,52
Mitja pressió	430,00	350,00	1,25	1,20	25,00	55,00	48,39	266,72	315,11
Baixa pressió	160,00	100,00	1,09	1,06	25,00	55,00	47,63	86,81	134,45

En la següent taula es mostren els resultats obtinguts convertits a kilograms, així com el nombre de tancs necessaris per cada pressió:

Taula 21. Massa total emmagatzemada teòrica.

Pressió cascada	Massa emmagatzemada teòrica (kg)	Massa emmagatzemada total per tanc (kg)	Tancs totals teòrics
Alta pressió	8438,05	1052,27	8,02
Mitja pressió	7047,06	633,38	11,13
Baixa pressió	1480,26	270,24	5,48

El resultat obtingut és la massa total emmagatzemada a cada pressió de forma teòrica, però el fabricant fabrica tancs de 25 m³ i els resultats obtinguts s'han d'ajustar a un nombre de tancs sencer:

Taula 22. Massa total emmagatzemada real.

Pressió cascada	Massa total emmagatzemada real (kg)	Tancs totals reals
Alta pressió	9470,40	9
Mitja pressió	7600,54	12
Baixa pressió	1621,43	6

3.2.3 Subministrament d'hidrogen

3.2.3.1 Refrigerador subministrament

Pel refrigerador de subministrament es fa servir el mateix cicle de refrigeració fet servir per refrigerar l'alta, mitja i baixa pressió. De mateixa manera, el paràmetre per estimar el cost del refrigerador és la potència del compressor i les àrees d'intercanvi de l'intercanviador i els aerorefrigeradors del cicle de refrigeració.

Seguint el mateix procediment, s'obtenen els resultats mitjançant *Aspen HYSYS*. Per aquest cicle de refrigeració s'ha de calcular la temperatura de sortida del refrigerador seguint el mateix procediment que en l'apartat 3.2.2.2., on, mitjançant *EES*, es troba la temperatura a la qual al finalitzar el procés de càrrega del dipòsit la temperatura es manté en un rang de -40 i 80 °C. Es determina que la temperatura de sortida del refrigerador ha de ser de -51,23 °C per que al finalitzar la càrrega la temperatura del dipòsit es trobi a 80 °C. En la següent figura es mostra l'evolució de la temperatura en funció del temps. A la Figura 39, Figura 40 i Figura 41, en els annexos, s'adjunten els codis emprats a *EES* per determinar l'evolució de la temperatura.

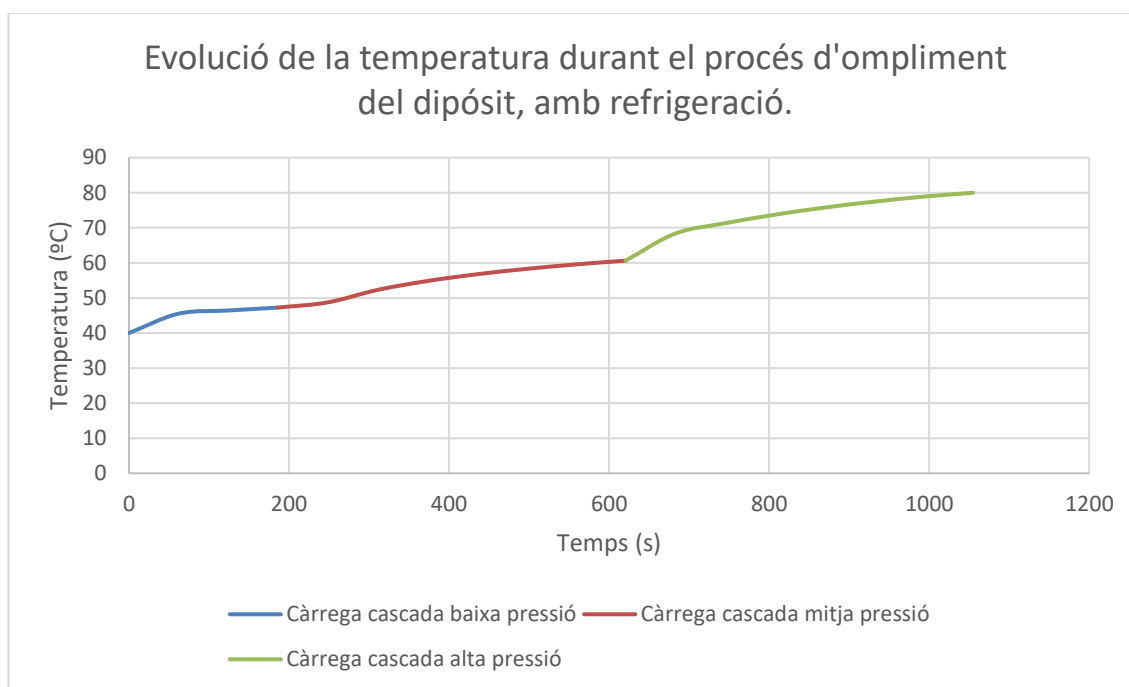


Figura 28. Evolució de la temperatura del dipòsit en funció del temps.

Determinada la temperatura de sortida del refrigerador, falta definir el cabal d'hidrogen a refrigerar. La hidrogenera compta amb 2 assortidors d'hidrogen. Cada vehicle té una capacitat màxima de 50 kg a carregar en 15 minuts, per tant:

$$\frac{50 \text{ kg}}{\text{assortidor}} \cdot \frac{60 \text{ minuts}}{1 \text{ hora}} = 200 \text{ kg/h} \quad (26)$$

Per tant, cada refrigerador ha de refredar fins a -51,23 °C un cabal de 200 kg/h d'hidrogen. Introduint aquestes condicions a la simulació d'Aspen HYSYS realitzada a l'apartat 3.2.2.2, s'obtenen els següents resultats:

Taula 23. Resultats dimensionament dels equips del cicle de refrigeració de subministrament.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	135,25	kW
Aerorefrigerador AC-100	447,30	m ²
Aerorefrigerador AC-101	447,30	m ²
Aerorefrigerador AC-102	447,30	m ²
Intercanviador de calor	18,6	m ²

3.2.4 Planta solar fotovoltaica

Per poder estimar el cost de la planta, és necessari obtenir el valor de la potència instal·lada i la superfície que ocupa aquesta.

Es dimensiona la planta per tal que el balanç econòmic entre la venda i la compra d'energia elèctrica anual sigui zero. Per tant, és necessari fer un balanç econòmic anual lligat a la potència de la planta.

Per calcular la potència, es fan servir els valors mitjans de la generació solar fotovoltaica horària durant cada mes a la península Ibèrica [32]. Coneixent la potència instal·lada total a la península, és possible obtenir la relació entre els megawatts hora i els megawatts instal·lats. D'aquesta manera, es pot traslladar aquesta relació a la planta solar de la hidrogenera i dimensionar-la.

$$F_i = \frac{E_i}{P_{ins}} \quad (27)$$

On:

- F_i = factor dimensionament de la instal·lació a l'hora i .
- E_i = megawatts hora a l'hora i .
- P_{ins} = megawatts solar instal·lada a la península ibèrica.

Actualment hi ha instal·lats 15048 MW de solar fotovoltaica. Per calcular el factor a les 9 del matí de gener, el càlcul seria:

$$F_{9h\ Gener} = \frac{370,88\ MWh}{15048\ MW} = 2,46 \cdot 10^{-2}\ h \quad (28)$$

A la Taula 31 dels annexos figuren els valors de l'electricitat generada a la península a cada hora durant els dotze mesos de l'any. A la Taula 32, es mostren els resultats del factor de dimensionament de la instal·lació per cada hora.

Imposant una potència inicial de la planta solar i multiplicant aquest valor pel factor d'instal·lació s'obté el valor de la energia generada cada hora. Restant el valor de l'energia generada menys el valor de la energia consumida per la planta, es coneix quan es genera un excedent d'electricitat que es pot vendre, i quan es necessita comprar energia a la xarxa:

$$Compra/Venta\ energia \begin{cases} Compra & si & E_{generada} - E_{consumida} > 0 \\ Venta & si & E_{generada} - E_{consumida} < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Així es pot realitzar el balanç econòmic diari, mensual i anual. Mitjançant Microsoft Excel, amb la funció solver, s'estableix com a objectiu que el balanç econòmic de la planta sigui de 0 €, canviant la variable de la potència de la planta.

A la Taula 33 als annexos es mostra el valor de la compra i venda d'energia horàriament, el balanç econòmic diari i el balanç econòmic mensual. En la següent taula es mostra el preu al qual es compra i ven l'electricitat i la potència de la planta [33]:

Taula 24. Preu de compra, venda i potència de la planta solar fotovoltaica.

Preu venda electricitat (€/MW)	Preu compra electricitat (€/MW)	Potència planta (MW)
50,00	70,00	27,57

Amb la potència de la planta calculada, es pot calcular quina superfície ocupa aquesta. Prenent com a referència un estudi sobre una planta de potència similar a la península [34], es pren la relació de la superfície ocupada per aquesta per la seva potència:

$$\frac{55 \text{ hectàrees}}{30 \text{ MW}} = 1,85 \frac{\text{ha}}{\text{MW}} \quad (30)$$

$$1,85 \frac{\text{ha}}{\text{MW}} \cdot 27,57 \text{ MW} = 51,00 \text{ ha} \quad (31)$$

En la següent taula es mostren els resultats obtinguts:

Taula 25. Resultats dimensionament de la planta solar fotovoltaica.

Potència planta (MW)	Superfície planta (ha)
27,57	51,00

4 Estudi de la viabilitat econòmica

En aquest apartat es determinarà a quin preu s'ha de vendre el kilogram d'hidrogen per tal que el projecte sigui rentable. Per fer-ho, es farà servir el mètode del valor actual net (VAN). El VAN es tracta d'un criteri d'inversió econòmica que consisteix a actualitzar els cobraments i pagaments del projecte per conèixer quant es guanyarà o perdrà amb la inversió. Per fer-ho, trasllada tots els fluxos de caixa al moment en el qual el projecte comença, descomptant-los a una taxa d'interès. És a dir, el VAN reflexa els beneficis econòmics que donarà el projecte.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+k)^t} \quad (32)$$

On:

- CF: flux de caixa anual.
- t: període anual.
- k: taxa d'interès anual exigida a la inversió.

El flux de caixa anual comprèn les despeses d'operació, les inversions en equips i els beneficis obtinguts amb la venda de l'hidrogen:

$$CF = \text{Beneficis} - \text{Despeses operació} - \text{Inversió equips} \quad (33)$$

Per considerar un projecte com a viable, el VAN ha de ser igual o major a 0. Per poder realitzar aquest càlcul, és necessari calcular abans la inversió en equips. És a dir, el cost dels equips del projecte. També s'ha de calcular el consum de matèries primeres, en aquest cas, aigua, i el cost del terreny de la planta solar. El cost de l'electricitat és nul a conseqüència d'haver dimensionat la planta solar amb aquest objectiu.

Per estimar el cost de tots aquells equips pels quals no s'ha trobat informació ni a catàlegs ni a estudis, s'ha fet servir el model d'estimació de costos d'equips CAPCOST [35], el qual, a partir de paràmetres com la potència dels equips i el material del que estan fets dona una estimació del seu cost. El procés de càlcul d'estimació dels costos de tots els equips es troba als annexos, apartat 7.6.1. Els valors de les despeses d'operació es reflecteixen en l'apartat 7.6.2.

Un cop calculades les despeses d'operació i la inversió en equips, el valor dels beneficis serà el que donarà el cost de venda del kilogram d'hidrogen. Per resoldre l'equació (33), es fa servir a Microsoft Excel la eina "solver". Introduint la fórmula del VAN, s'estableix com a objectiu que el seu resultat sigui 0, canviant la variable dels beneficis. En el apartat d'annexos 7.6.3 s'adjunta la taula on figura les inversions, despeses d'operació i els beneficis del projecte per un període de vida del projecte de 30 anys i una taxa d'interès del 3%.

Obtinguts els beneficis anuals, es calcula el preu de venda del kilogram d'hidrogen com:

$$\text{Preu de venda d'hidrogen} \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \frac{\text{Beneficis anuals (€)}}{\text{Producció d'hidrogen anual (kg)}} \quad (34)$$

Hi han diverses opcions pel que fa al període de vida del projecte i la taxa d'interès. En aquest cas, es decideix estudiar com varia el preu del kilogram d'hidrogen amb una taxa d'interès fixa del 3% en funció de diferents temps de vida del projecte:

Taula 26. Resultats preu de venda del kilogram d'hidrogen.

Anys	Taxa d'interès (%)	Preu de venda (€/kg)
10	3,00	7,93
15	3,00	6,02
20	3,00	4,86
30	3,00	3,85

Adicionalment, un altre indicador de la viabilitat econòmica és la equivalència entre el preu del kilogram d'hidrogen i el litre de dièsel. Per comprovar-ho, es calculen els kilograms d'hidrogen consumits per recórrer 100 km mitjançant les dades dels continguts energètics del dièsel i l'hidrogen i les eficiències del dipòsit a la roda:

$$\frac{30 \text{ L dièsel}}{100 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot \frac{850 \text{ kg dièsel}}{1 \text{ m}^3} \cdot \frac{11,83 \text{ kWh}}{1 \text{ kg dièsel}} \cdot \frac{23 \text{ kWh}_{\text{real}}}{100 \text{ kWh}} \cdot \frac{100 \text{ kWh}}{45 \text{ kWh}_{\text{real}}} \cdot \frac{1 \text{ kg H}_2}{33,3 \text{ kWh}} = 4,63 \frac{\text{kg H}_2}{100 \text{ km}} \quad (35)$$

Per tant, es pot calcular el cost de recórrer 100 km amb hidrogen:

$$\text{Cost de } 100 \text{ km}_{\text{H}_2} = 4,63 \frac{\text{kg H}_2}{100 \text{ km}} \cdot \text{Preu kg H}_2 \quad (36)$$

I, coneixent el cost de recórrer 100 km amb pila d'hidrogen, es pot calcular quin hauria de ser el preu de dièsel per recórrer la mateixa distància:

$$\text{Preu de venda dièsel} = \frac{\text{Cost de } 100 \text{ km}_{\text{H}_2}}{\frac{30 \text{ L dièsel}}{100 \text{ km}}} \quad (37)$$

En la següent taula es mostren els resultats finals de l'estudi de la viabilitat econòmica:

Taula 27. Preu de venda del kilogram d'hidrogen i de dièsel.

Anys	Preu de venda H ₂ (€/kg)	Preu de venda dièsel (€/L)
10	7,93	1,22
15	6,02	0,93
20	4,86	0,75
30	3,85	0,59

El preu mig del dièsel a Espanya es d'1,2 €/L. Amb un preu de venda de 7,93 €/kg d'H₂ el preu de venda del dièsel hauria de ser d'1,22 €/kg, valor molt proper a la mitja del dièsel. La resta de preus de venda d'hidrogen comporten que el preu del dièsel hauria de ser menor que el preu mig històric, fet que reflexa que l'hidrogen seria més econòmic que el dièsel.

5 Conclusió

Mitjançant l'estudi d'alternatives, es determina que la millor tecnologia per produir hidrogen es tracta de l'electròlisi AEM. Aquesta tecnologia, pel fet que els materials amb els quals es troba fabricat són més barats, i que produeix hidrogen de forma més eficient energèticament, fa que sigui l'opció idònia per generar hidrogen.

Per emmagatzemar hidrogen, donada la seva baixa densitat, es realitza l'estudi de diferents mètodes, la majoria dels quals es troben encara en vies de desenvolupament. Per la seva maduresa tecnològica i simplicitat, els millors mètodes d'emmagatzematge es tracten de l'emmagatzematge d'hidrogen pressuritzat i l'emmagatzematge d'hidrogen líquid. Encara que els equips necessaris per dur a terme l'emmagatzematge mitjançant la líquidació de l'hidrogen, en conjunt, poden arribar a ser més econòmics que l'emmagatzematge pressuritzat, es determina que la líquidació de l'hidrogen és un procés molt més demandant energèticament, motiu pel qual s'escull l'emmagatzematge pressuritzat.

El subministrament d'hidrogen al vehicle es realitzarà a través del mètode de cascada. En aquest sistema es disposa de tancs pressuritzats amb hidrogen a diferents pressions. A l'hora de carregar el dipòsit del vehicle, es connecta aquest al tanc de la cascada de baixa pressió, que, per diferència de pressió, deixa fluir l'hidrogen al vehicle. Al arribar a una pressió determinada, el tanc de baixa pressió es tanca i s'obre el tanc de mitja pressió, tornant a repetir el procés fins a arribar al tanc d'alta pressió fins que el dipòsit del vehicle es troba omplert. S'escull aquest mètode ja a que pot combinar-se amb l'emmagatzematge pressuritzat, fent la cascada de sistema d'emmagatzematge d'hidrogen. A més, es descarta el mètode de compressió directa, mitjançant el qual es carrega el vehicle des d'un compressor, degut a que la necessitat de posar en marxa i parar el compressor cada vegada que arriba un camió, a la llarga redueix la seva vida.

Pel que fa als recipients d'emmagatzematge estudiats, es determina que els tancs MSLV, per les seves pressions d'operació, material i preu, els fan la millor opció. Es decideix emmagatzemar l'hidrogen pressuritzant-lo en baixa, mitja i alta pressió, reduint així el cost total de la instal·lació i el consum elèctric dels compressors.

Els compressors d'hidrogen escollits es tracten dels compressors iònics, la llarga vida dels quals, gràcies al fet que disposa d'un reduït nombre de parts mòbils, i la dissipació de calor duta a terme sense necessitat de refrigeracions externes, els tornen la tecnologia escollida.

A causa de la compressió d'hidrogen produïda durant la càrrega, tant dels tancs d'emmagatzematge, com del dipòsit del vehicle, es determina la aparició d'un increment de temperatura durant el procés el qual fa que el tanc es trobi fora de la temperatura d'operació. Per aquest motiu s'implementen cicles de refrigeració que redueixen la temperatura de l'hidrogen a temperatures les quals assegurin que durant el procés de càrrega les temperatures es trobin dintre dels rangs desitjats. Aquests cicles de refrigeració treballen amb amoníac ja a que el seu índex de escalfament global (GWP), és de zero.

Finalment, es dimensionen tots els equips del procés per dur a terme una estimació del cost de la planta i el seu consum d'aigua i de matèries primeres. L'estudi de la viabilitat econòmica del projecte, realitzat mitjançant el mètode del VAN, dona com a resultat que per períodes d'operació de 10 i 15 anys preus superiors a la previsió de cost màxim de 5,9 €/kg. Per períodes de vida de 20 i 30 anys, s'obtenen preus de venda de l'hidrogen de 4,86 i 3,85 €/kg, indicant la viabilitat del projecte. Addicionalment, el preu del dièsel necessari per poder recórrer la mateixa distància que amb hidrogen es troba a 1,22 €/L per la hidrogenera de 10 anys. Sent el preu mig del dièsel d'1,20 €/L, l'hidrogen tindria pràcticament el mateix cost que el dièsel, mentre que per la resta de casos, aquest és més econòmic.

Aquest treball es tracta d'un estudi preliminar. Els costos dels equips i la inflació són estimacions subjectes a canvi amb el pas del temps. Estudis més detallats sobre els aspectes legals i de seguretat de tindre emmagatzemat hidrogen pressuritzat, o la dificultat per disposar de terreny suficient per instal·lar una planta solar fotovoltaica podrien determinar la inviabilitat del projecte per qualsevol cas. Addicionalment, no s'ha estudiat l'opció de pressuritzar i vendre l'oxigen generat a l'electrolitzador, el qual podria incrementar el marge de benefici de la hidrogenera i reduir el cost de l'hidrogen venut. Donat que una xarxa de gasoductes d'hidrogen per cobrir tot el territori nacional requereix d'altres inversions, i que el transport d'hidrogen amb camions té un cost econòmic i energètic significatiu, la instal·lació d'hidrogeneres acoplades a plantes solars properes als punts de consum d'hidrogen són una bona opció per resoldre el problema del transport i emmagatzematge d'hidrogen.

6 Bibliografía

- [1] | «Naciones Unidas,» 06 04 2022. [En línia]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change#:~:text=Cada%20aumento%20del%20calentamiento%20global,y%20a%20mantener%20un%20clima%20habitabile.>
- [2] | «Ley 7/2021. Ley de cambio climático y transición energética. Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.,» 30 05 2021. [En línia]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7.>
- [3] | P. Fernandez, «ABC Motor,» 05 07 2019. [En línia]. Available: https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-desmontando-mitos-sobre-coche-hidrogeno-201905060136_noticia.html.
- [4] | «Wikipedia,» 06 07 2022. [En línia]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible#/media/Archivo:Fuel_cell_ES.svg.
- [5] | «Hyundai,» 12 05 2022. [En línia]. Available: <https://trucknbus.hyundai.com/global/es/products/truck/xcient-fuel-cell.>
- [6] | «Hidrógeno verde,» 13 05 2022. [En línia]. Available: <https://hidrogeno-verde.es/precio-del-hidrogeno/#:~:text=Teniendo%20en%20cuenta%20todos%20estos,y%2010%20euros%20por%20kilogramo.>
- [7] | World energy council, EPRI and PwC, 13 05 2022. [En línia]. Available: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_Hydrogen_Demand_And_Cost_Dynamics_-_September_2021.pdf?v=1634916141.
- [8] | N. de Miguel, «The effect of defueling rate on the temperature evolution of on-board hydrogen tanks,» 13 05 2022. [En línia]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915015232#:~:text=Standards%20and%20regulations%20for%20on,8%5D%2C%20%5B9%5D.>
- [9] | «ResearchGate,» 13 05 2022. [En línia]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-alkaline-electrolysis-cell-34_fig4_327179309.
- [10] | S. Sood, «MDPI. Generic Dynamic Model of PEM Eectrolyser under Intermittent Sources,» 15 05 2022. [En línia]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/24/6556.>
- [11] | «IONOMR,» 14 04 2022. [En línia]. Available: <https://ionomr.com/wp-content/uploads/2021/02/FM-7024-A-Hydrogen-Production-Cost-by-AEM-White-Paper-copy.pdf.>
- [12] | «Scientific reports.,» 15 05 2022. [En línia]. Available: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-80683-6/figures/1.>
- [13] | «Google Patents,» 16 04 2022. [En línia]. Available: <https://patents.google.com/patent/EP2451992B1.>

- [14] | «Pareto Securities AS Equity Research,» 16 04 2022. [En línia]. Available: <https://enapterag.de/wp-content/uploads/2021/08/H2O-Enapter-Initiation-Research-Pareto2021-08-18.pdf>.
- [15] | «Enapter,» 16 04 2022. [En línia]. Available: <https://www.enapter.com/newsroom/h2-view-exclusive-calculating-the-cost-of-green-hydrogen>.
- [16] | G. Sandrock, «Science Direct. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view.,» 16 05 2022. [En línia]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838899003849>.
- [17] | K. Moller, «MDPI. Complex Metal Hydrides for Hydrogen, Thermal and Electrochemical Energy Storage.,» [En línia]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1645>.
- [18] | M. Felderhoff, «Publishing. Hydrogen storage: the remaining scientific and technological challenges.,» [En línia]. Available: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2007/CP/b701563c>.
- [19] | P. Plerdsranoy, «Science Direct. Compaction of LiBH₄-MgH₂ doped with MWCNTs-TiO₂ for reversible hydrogen storage.,» [En línia]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319916333560>.
- [20] | O. Özcan, «Science Direct. Thermodynamic analysis of methanol steam reforming to produce hydrogen for HT-PEMFC: An optimization study.,» 16 04 2022. [En línia]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919300060?via%3Dihub>.
- [21] | J. Klankermayer, «Wiley Online Library. Selective Catalytic Synthesis Using the Combination of Carbon Dioxide and Hydrogen: Catalytic Chess at the Interface of Energy and Chemistry.,» [En línia]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201507458>.
- [22] | J. Andersson, «Science Direct. Large-scale storage of hydrogen.,» [En línia]. Available: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919310195#:~:text=borohydrides,LiBH4\)%20%5B94%5D](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919310195#:~:text=borohydrides,LiBH4)%20%5B94%5D).
- [23] | C. S. Marchi, «SANDIA REPORT,» 28 05 2022. [En línia]. Available: https://h2tools.org/sites/default/files/SAND2012_7321.pdf.
- [24] | A. M. Elberry, «Science Direct. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems.,» [En línia]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921005838>.
- [25] | «Oak Ridge.,» 12 06 2022. [En línia]. Available: <https://www.ornl.gov/news/hydrogen-coming-station-near-you>.
- [26] | K. Burn, «Hydrogen Compression,» 02 07 2022. [En línia]. Available: <https://www.elliott-turbo.com/Files/Admin/Articles/hydrogen-compression.pdf>.
- [27] | «Neuman.,» 26 07 2022. [En línia]. Available: <https://www.neuman-esser.de/en/compressors/hydrogen-compressors/>.

- [28] | «Mechanical Boost,» 26 07 2022. [En línia]. Available: <https://mechanicalboost.com/diaphragm-compressor/>.
- [29] | «Linde Gas,» 27 07 2022. [En línia]. Available: https://www.linde-gas.com/en/processes/hydrogen_energy_h2/h2_one_stop_shop/h2_fuelling_technologies/index.html.
- [30] | «Mech4Study,» 26 07 2022. [En línia]. Available: <https://www.mech4study.com/2017/11/centrifugal-compressor.html>.
- [31] | «Linde,» 29 07 2022. [En línia]. Available: https://www.linde-engineering.com/en/images/LE_LHRT_datasheet_IC90_30_Ionic_Compressor_tcm19-634422.pdf.
- [32] | «Demanda red eléctrica,» 10 08 2022. [En línia]. Available: <https://demanda.ree.es/visiona/seleccionar-sistema>.
- [33] | «Ministro de comercio y turismo,» 10 08 2022. [En línia]. Available: https://www.mincotur.gob.es/es-es/IndicadoresyEstadisticas/BoletinEstadistico/Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/4_12.pdf.
- [34] | IGNIS, «Plan estratégico sobre el impacto en el empleo local y la cadena de valor industrial de una planta solar fotovoltaica de 30 MW,» 2021.
- [35] | R. Turton, *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*, 2022.
- [36] | O. A. Hjelkrem, «Science Direct,» 03 05 2022. [En línia]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920309752>.
- [37] | C. Cuanan, «MDPI,» [En línia]. Available: <https://www.mdpi.com/2571-8797/3/2/28/html>.
- [38] | «The engineering toolbox,» 03 04 2022. [En línia]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html.
- [39] | «Google,» 02 04 2022. [En línia]. Available: https://www.google.com/search?q=alas+central&rlz=1C1GCEA_enES984ES984&oq=alas+central&aqs=chrome..69i57.1958j0j1&sourceid=chrome&ie=UTF-8.
- [40] | «Towering skills,» 13 08 2022. [En línia]. Available: <https://www.toweringskills.com/financial-analysis/cost-indices/>.
- [41] | «Hydrogen fueling station model,» 03 08 2022. [En línia]. Available: <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hdsam>.
- [42] | E. Vartiainen, «Wiley Online Library,» 05 08 2022. [En línia]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.3189>.
- [43] | H. Handige, «Wikipedia,» 12 05 2022. [En línia]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible#/media/Archivo:Fuel_cell_ES.svg.

7 Annex càlculs

7.1 Determinació de la demanda d'hidrogen

L'objectiu és determinar la demanda horària d'hidrogen per tal de dimensionar els equips de la hidrogenera. Com s'ha comentat a les condicions inicials, es treballa sota la hipòtesi de que tots els vehicles pesats de combustió interna han estat substituïts per vehicles de pila d'hidrogen. Per tant, la demanda d'hidrogen serà assimilable a una demanda de dièsel de 5 milions de litres a l'any. També es treballa amb la hipòtesi de que la demanda és la mateixa cada dia al llarg de l'any, però no horàriament.

Primerament es partirà de la demanda anual en litres de dièsel i es convertirà a l'equivalent en kilograms d'hidrogen diaris. Tot seguit, és determinarà la demanda d'hidrogen horària al llarg del dia, la qual no és constant.

Es parteix de la demanda de dièsel anual de 5 milions de litres. Per fer la conversió de litres de dièsel a kilograms d'hidrogen, es fa servir el *tank to wheel efficiency* (eficiència del tanc a la roda): és la relació entre l'energia de les rodes del vehicle amb el contingut energètic del combustible emmagatzemat al vehicle. El *tank to wheel efficiency* (a partir d'ara, TTW), és determinat per les pèrdues totals del procés de conversió de l'energia del combustible a l'energia utilitzada per moure les rodes. En vehicles de combustió interna aquestes pèrdues es donen principalment per pèrdues tèrmiques i mecàniques, mentre que pels vehicles elèctrics aquestes pèrdues venen donades per pèrdues òhmiques i magnètiques [36]. En les següents taules es mostren els valors mitjans del TTW per vehicles de combustió interna i per vehicles de pila de combustible d'hidrogen [37], així com els valors dels continguts energètics del dièsel i l'hidrogen [38].

Taula 28. Valors mitjans del *tank to wheel efficiency*.

Vehicle	TTW (%)
Combustió interna	23,00
Pila de combustible d'hidrogen	45,00

Taula 29. Valors dels continguts energètics del dièsel i l'hidrogen.

Combustible	Poder calorífic inferior (kWh/kg)
Dièsel	11,83
Hidrogen	33,33

Sabent la demanda anual de dièsel, els valors del TTW, el poder calorífic inferior (LHV), i que la densitat del dièsel és de 850 kg/m^3 , fent el següent factor de conversió s'obté la demanda diària en kilograms d'hidrogen:

$$5000000 \frac{l \text{ dièsel}}{\text{any}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot \frac{850 \text{ kg}_{\text{dièsel}}}{1 \text{ m}^3} \cdot \frac{11,83 \text{ kWh}}{1 \text{ kg}_{\text{dièsel}}} \cdot \frac{23 \text{ kWh}_{\text{real}}}{100 \text{ kWh}} \cdot \frac{100 \text{ kWh}}{45 \text{ kWh}_{\text{real}}} \cdot \frac{1 \text{ kg } H_2}{33,3 \text{ kWh}} \cdot \frac{1 \text{ any}}{365 \text{ dies}} = 2114,23 \frac{\text{kg } H_2}{\text{dia}} \quad (38)$$

Un cop determinada la demanda diària, és necessari determinar la demanda horària. La demanda horària no és constant. Per determinar-la, es fa servir el buscador d'internet *Google*, el qual genera gràfics de la quantitat de clients que hi ha en un establiment en funció del temps. En aquest cas, s'han fet servir les dades d'una gasolinera real [39].



Figura 29. Gràfica assistència en funció del temps.

Com es pot observar, no dóna valors de la quantitat de consumidors. No obstant, fent servir *Microsoft Excel* es pot realitzar una aproximació. Es realitza una captura de pantalla de la gràfica i s'enganxa en un full d'*Excel*. Es baixa l'opacitat de la captura fins que les cel·les del full són visibles, tal i com es mostra a la següent figura.



Figura 30. Gràfica assistència en el full d'*Excel*.

Com es pot veure, és possible ara realitzar una mesura de les barres de dades de la gràfica d'assistència utilitzant les cel·les del full. Per fer-ho, amb el ratolí es seleccionen les cel·les que queden contingudes dintre de cada una de les barres de la imatge capturada, i es pinten de blau, com si d'un calc es tractés. D'aquesta manera, es pot obtenir el gràfic de la figura següent. S'introdueix a cada cel·la de color blau un 1, i utilitzant la funció "CONTAR.SI", que compta les cel·les dintre del rang especificat sota un condicionant, es compten les cel·les contingudes a cada hora. En aquest cas, el condicionant és que compti les cel·les que continguin un 1.

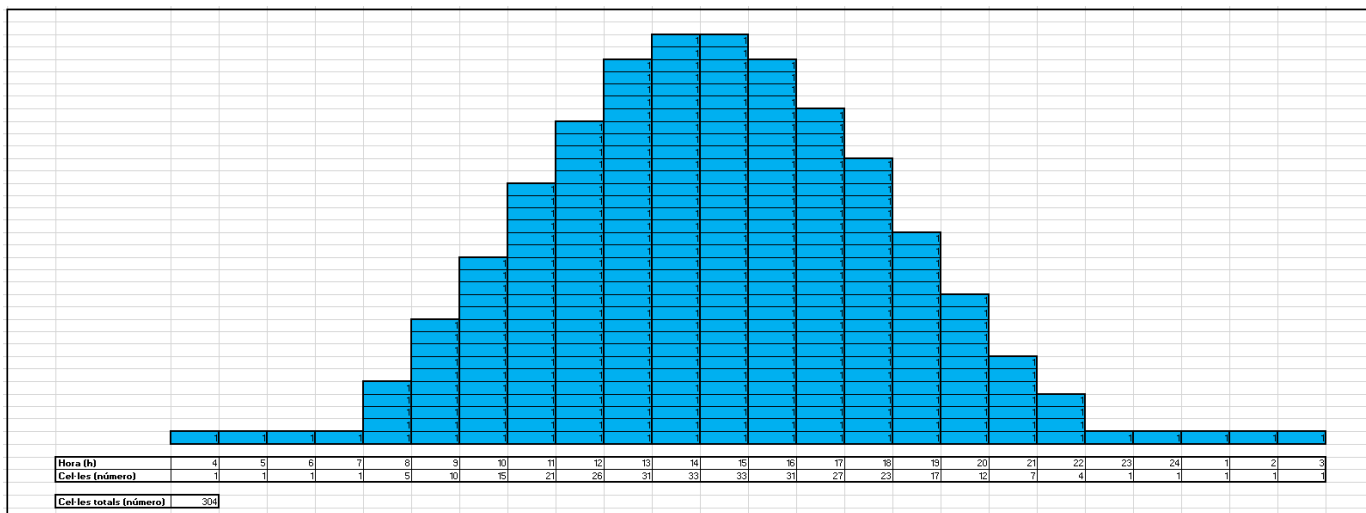


Figura 31. Recompte del número de cel·les en funció de l'hora.

Així es té quantitzat el número de cel·les en funció de cada hora. Sabent que la demanda d'hidrogen és la mateixa cada dia, i que el recompte de cel·les total és de 304, es pot fer la equivalència entre el número total de cel·les i els kilograms d'hidrogen totals diaris, obtenint així la demanda d'hidrogen horària:

$$\frac{2114,23 \frac{kg H_2}{dia}}{304 \text{ cel} \cdot \text{les}} = 6,95 \frac{kg H_2}{\text{cel} \cdot \text{la} \cdot \text{dia}} \quad (39)$$

Per tant, cada cel·la representa 6,95 kg d'hidrogen. La demanda horària d'hidrogen es presenta a la següent taula:

Taula 30. Demanda horària d'hidrogen.

Hora (h)	Cel·les (número)	Demanda d'hidrogen (kg)
1	1	6,95
2	1	6,95
3	1	6,95
4	1	6,95
5	5	6,95
6	10	6,95
7	15	6,95
8	21	34,77
9	26	69,55
10	31	104,32
11	33	146,05
12	33	180,82
13	31	215,60
14	27	229,51

Hora (h)	Cel·les (número)	Demanda d'hidrogen (kg)
15	23	229,51
16	17	215,60
17	12	187,78
18	7	159,96
19	4	118,23
20	1	83,46
21	1	48,68
22	1	27,82
23	1	6,95
24	1	6,95

7.2 Refrigeració precàrrega

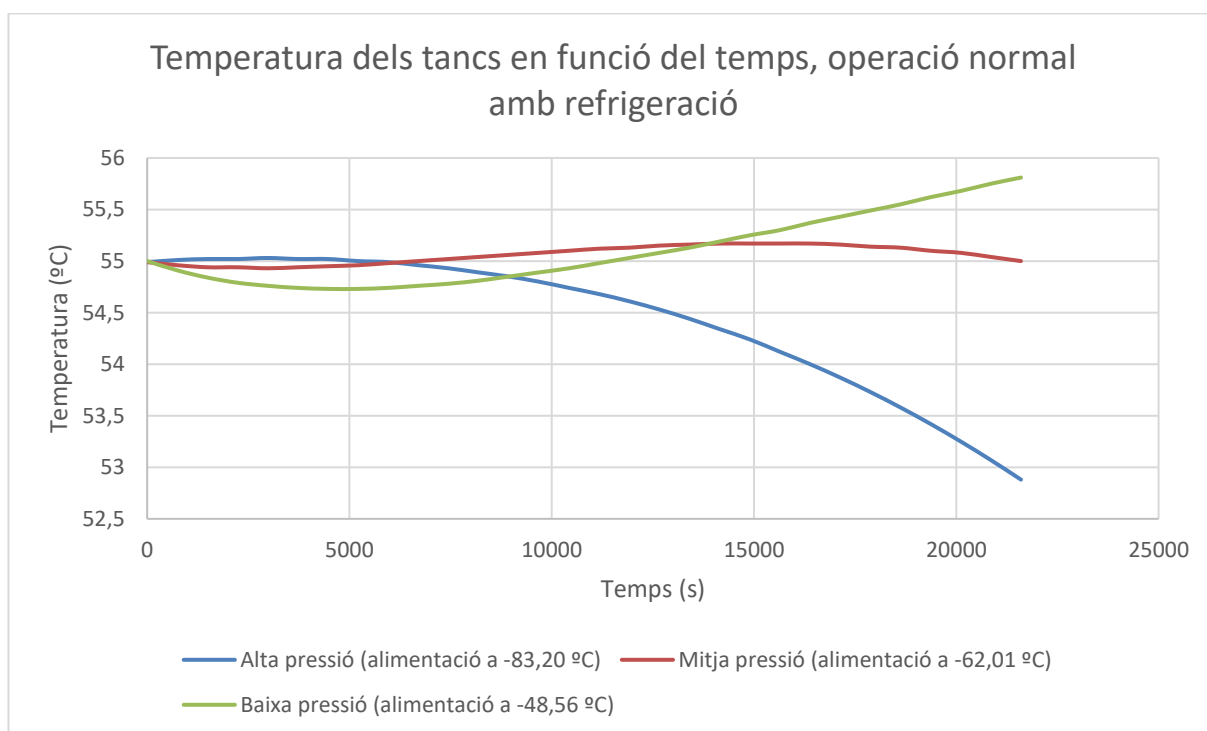


Figura 32. Temperatura de l'hidrogen dels tancs en funció del temps, alimentacions refrigerades, operació normal.

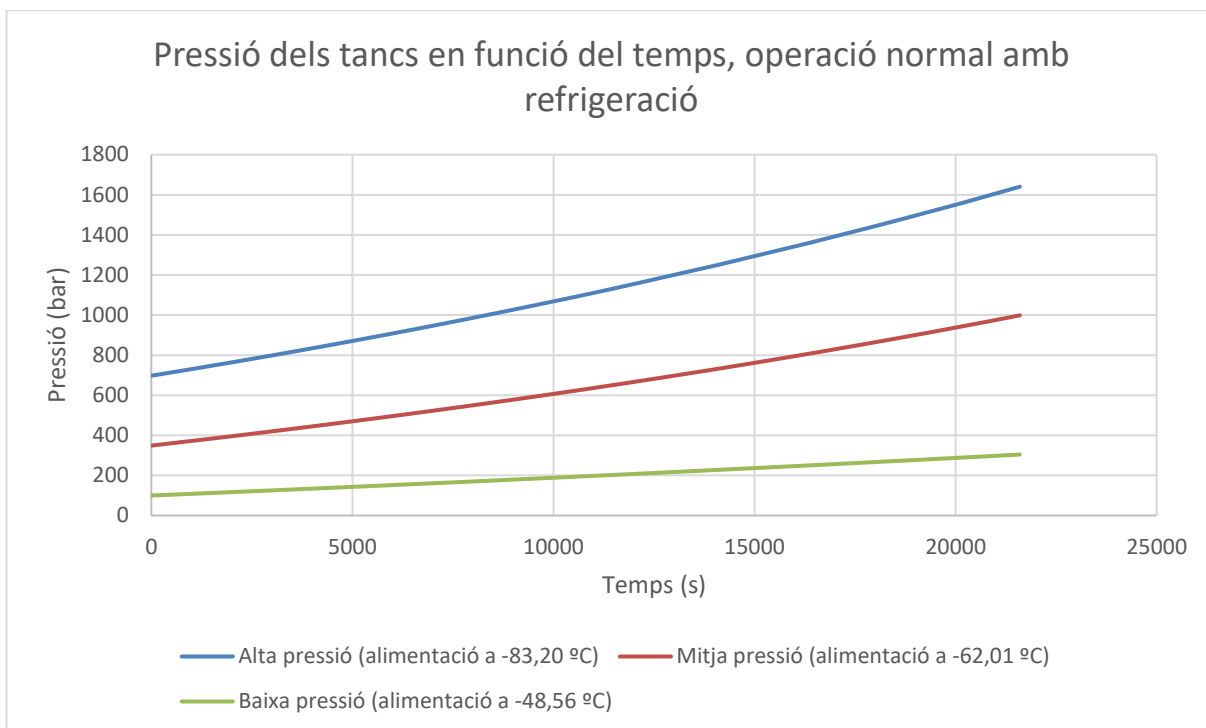


Figura 33. Pressió de l'hidrogen dels tancs en funció del temps, alimentacions refrigerades, operació normal.

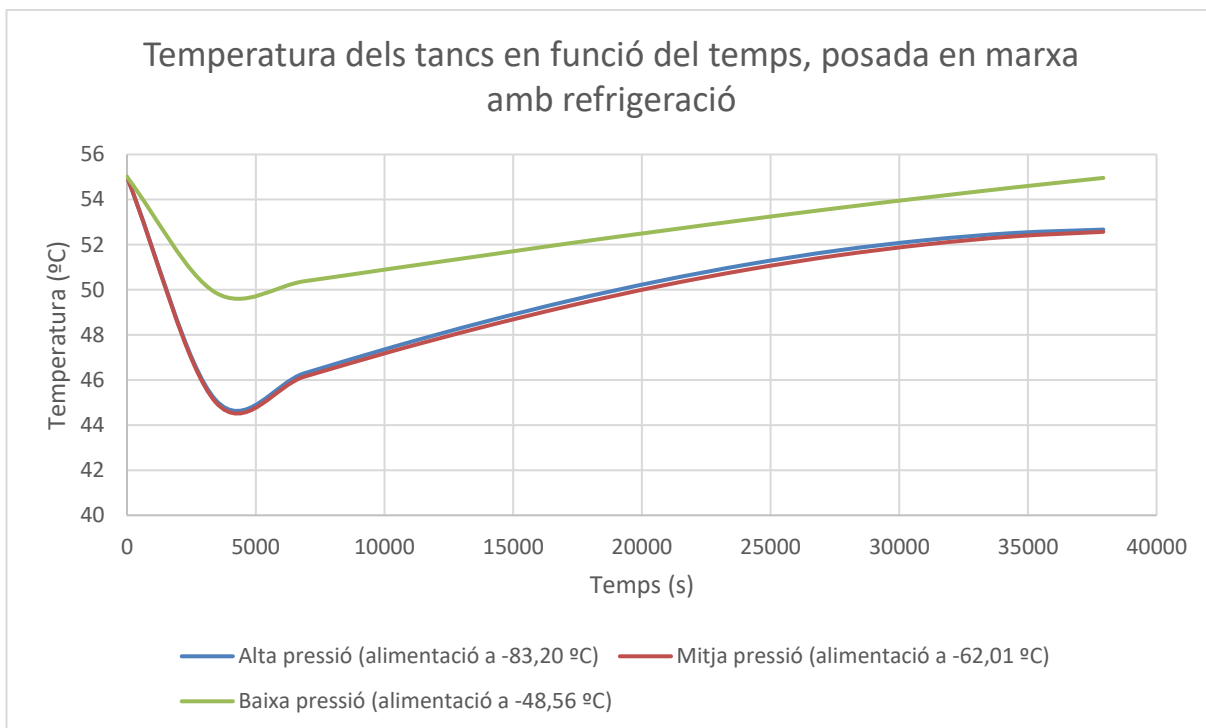


Figura 34. Temperatura de l'hidrogen dels tancs en funció del temps, alimentacions refrigerades, posada en marxa.

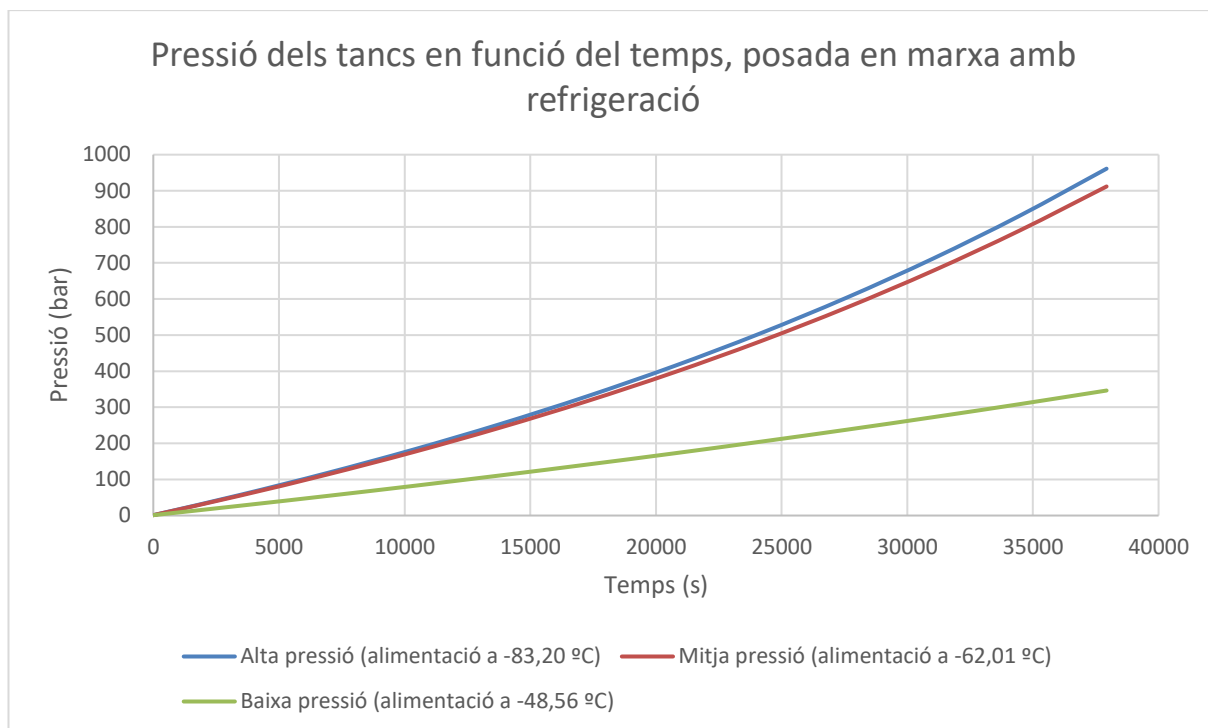


Figura 35. Pressió de l'hidrogen dels tancs en funció del temps, alimentacions refrigerades, posada en marxa.

"CONDICIONS INICIALS TANC ALTA PRESSIÓ"

Pc= 860 [bar] "Pressió descàrrega del compressor (bar)"
 Tr= -83 [C] "Temperatura sortida del refrigerador (°C)"
 hc=Enthalpy("Hydrogen";P=Pc;T=Tr) "Entalpia de la descàrrega del compressor (kJ/kg)"
 mc=0,030 "Cabal de descàrrega del compressor (kg/s)"
 P0= 1 [bar] "Pressió inicial del tanc (bar)"
 T0= 55 [C] "Temperatura inicial del tanc (°C)"
 u0=IntEnergy("Hydrogen";P=P0;T=T0) "Energia interna inicial del tanc (kJ/kg)"
 M0= 1,84 [kg] "Massa d'hidrogen del tanc inicial (kg)"
 V=25 [m3] "Volum del tanc (m3)"

"EQUACIONS"

Mt=M0+t*mc
 ut=((mc*hc*t)+(M0*u0))/(Mt)
 vt=V/Mt
 Tt=Temperature("Hydrogen";U=ut;V=vt)
 Pt=Pressure("Hydrogen";U=ut;V=vt)

Figura 36. Codi EES càrrega tanc d'alta pressió.

```
"CONDICIONS INICIALS TANC ALTA PRESSIÓ"
Pc= 430 [bar] "Pressió descàrrega del compressor (bar)"
Tr= -62 [C] "Temperatura sortida del refrigerador (°C)"
hc=Enthalpy("Hydrogen";P=Pc;T=Tr) "Entalpia de la descàrrega del compressor (kJ/kg)"
mc=0,029 "Cabal de descàrrega del compressor (kg/s)"
P0= 350 [bar] "Pressió inicial del tanc (bar)"
T0= 55 [C] "Temperatura inicial del tanc (°C)"
u0=IntEnergy("Hydrogen";P=P0;T=T0) "Energia interna inicial del tanc (kJ/kg)"
M0= 536,11 [kg] "Massa d'hidrogen del tanc inicial (kg)"
V=25 [m3] "Volum del tanc (m3)"
```

```
"EQUACIONS"
Mt=M0+t*mc
ut=((mc*hc*t)+(M0*u0))/(Mt)
vt=V/Mt
Tt=Temperature("Hydrogen";U=ut;V=vt)
Pt=Pressure("Hydrogen";U=ut;V=vt)
```

Figura 37. Codi EES càrrega del tanc de mitja pressió.

```
"CONDICIONS INICIALS TANC ALTA PRESSIÓ"
Pc= 160 [bar] "Pressió descàrrega del compressor (bar)"
Tr= -48 [C] "Temperatura sortida del refrigerador (°C)"
hc=Enthalpy("Hydrogen";P=Pc;T=Tr) "Entalpia de la descàrrega del compressor (kJ/kg)"
mc=0,014 "Cabal de descàrrega del compressor (kg/s)"
P0= 100 [bar] "Pressió inicial del tanc (bar)"
T0= 55 [C] "Temperatura inicial del tanc (°C)"
u0=IntEnergy("Hydrogen";P=P0;T=T0) "Energia interna inicial del tanc (kJ/kg)"
M0= 174,50 [kg] "Massa d'hidrogen del tanc inicial (kg)"
V=25 [m3] "Volum del tanc (m3)"
```

```
"EQUACIONS"
Mt=M0+t*mc
ut=((mc*hc*t)+(M0*u0))/(Mt)
vt=V/Mt
Tt=Temperature("Hydrogen";U=ut;V=vt)
Pt=Pressure("Hydrogen";U=ut;V=vt)
```

Figura 38. Codi EES càrrega tanc de baixa pressió.

7.3 Refrigeració subministrament

"CÀRREGA A 160 BAR"

"CONDICIONS INICIALS DIPÓSIT VEHICLE"

$Pd = 160$ [bar] "Pressió descàrrega cascada (bar)"
 $Td = -51,23$ [C] "Temperatura sortida del refrigerador (°C)"
 $hd = \text{Enthalpy}(\text{Hydrogen}; P=Pd; T=Td)$ "Entalpia de la descàrrega de la cascada (kJ/kg)"
 $md = 0,0555$ "Cabal de la descàrrega de la cascada (kg/s)"
 $P0 = 1$ [bar] "Pressió inicial del dipòsit del vehicle (bar)"
 $T0 = 40$ [C] "Temperatura inicial del dipòsit del vehicle (°C)"
 $u0 = \text{IntEnergy}(\text{Hydrogen}; P=P0; T=T0)$ "Energia interna inicial del dipòsit (kJ/kg)"
 $M0 = 0,1021$ [kg] "Massa d'hidrogen inicial del dipòsit (kg)"
 $V = 1,323$ [m3] "Volum del dipòsit (m3)"

"EQUACIONS"

$Mt = M0 + t * md$
 $ut = ((md * hd * t) + (M0 * u0)) / (Mt)$
 $vt = V / Mt$
 $Tt = \text{Temperature}(\text{Hydrogen}; U=ut; V=vt)$
 $Pt = \text{Pressure}(\text{Hydrogen}; U=ut; V=vt)$

Figura 39. Codi EES per càrrega de dipòsit des de 160 bar.

"CÀRREGA A 430 BAR"

"CONDICIONS INICIALS DIPÓSIT VEHICLE"

$Pd = 430$ [bar] "Pressió descàrrega cascada (bar)"
 $Td = -51,23$ [C] "Temperatura sortida del refrigerador (°C)"
 $hd = \text{Enthalpy}(\text{Hydrogen}; P=Pd; T=Td)$ "Entalpia de la descàrrega de la cascada (kJ/kg)"
 $md = 0,0555$ "Cabal de la descàrrega de la cascada (kg/s)"
 $P0 = 350$ [bar] "Pressió inicial del dipòsit del vehicle (bar)"
 $T0 = 47,01$ [C] "Temperatura inicial del dipòsit del vehicle (°C)"
 $u0 = \text{IntEnergy}(\text{Hydrogen}; P=P0; T=T0)$ "Energia interna inicial del dipòsit (kJ/kg)"
 $M0 = 9,64$ [kg] "Massa d'hidrogen inicial del dipòsit (kg)"
 $V = 1,323$ [m3] "Volum del dipòsit (m3)"

"EQUACIONS"

$Mt = M0 + t * md$
 $ut = ((md * hd * t) + (M0 * u0)) / (Mt)$
 $vt = V / Mt$
 $Tt = \text{Temperature}(\text{Hydrogen}; U=ut; V=vt)$
 $Pt = \text{Pressure}(\text{Hydrogen}; U=ut; V=vt)$

Figura 40. Codi EES per càrrega de dipòsit des de 430 bar.

"CÀRREGA A 860 BAR"

"CONDICIONS INICIALS DIPÒSIT VEHICLE"

Pd= 860 [bar] "Pressió descàrrega cascada (bar)"
Td= -51,23 [C] "Temperatura sortida del refrigerador (°C)"
hd=Enthalpy('Hydrogen';P=Pd;T=Td) "Entalpia de la descàrrega de la cascada (kJ/kg)"
md=0,0555 "Cabal de la descàrrega de la cascada (kg/s)"
P0= 1 [bar] "Pressió inicial del dipòsit del vehicle (bar)"
T0= 58,91 [C] "Temperatura inicial del dipòsit del vehicle (°C)"
u0=IntEnergy('Hydrogen';P=P0;T=T0) "Energia interna inicial del dipòsit (kJ/kg)"
M0= 29,54 [kg] "Massa d'hidrogen inicial del dipòsit (kg)"
V= 1,323 [m3] "Volum del dipòsit (m3)"

"EQUACIONS"

Mt=M0+t*md
ut=((md*hd*t)+(M0*u0))/(Mt)
vt=V/Mt
Tt=Temperature('Hydrogen';U=ut;V=vt)
Pt=Pressure('Hydrogen';U=ut;V=vt)

Figura 41. Codi EES per càrrega de dipòsit des de 860 bar.

7.4 Planta solar fotovoltaica

Taula 31. Generació fotovoltaica horària mitja durant els mesos de l'any (MWh).

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
0	27,54	23,03	12,66	19,18	25,18	25,22	37,17	45,29	36,24	13,67	12,57	11,10
1	27,26	22,35	12,34	15,83	18,85	21,95	31,13	44,72	36,02	13,47	11,40	10,94
2	27,30	22,44	10,35	14,39	18,77	23,47	30,77	39,91	36,24	13,36	11,36	11,00
3	27,21	21,16	12,58	14,39	17,00	23,32	26,88	39,83	35,95	4,27	11,29	11,13
4	27,21	20,85	11,64	12,76	17,08	21,72	26,45	39,76	35,98	13,50	11,29	10,27
5	27,17	20,85	8,56	11,36	17,00	21,49	26,02	39,48	35,55	13,54	8,77	10,33
6	27,09	20,85	8,91	11,24	16,96	21,57	25,98	39,48	35,51	13,36	8,63	10,33
7	25,86	19,98	12,62	7,22	30,31	140,49	51,96	39,23	35,22	13,19	8,67	10,21
7	25,73	23,94	597,26	192,97	1278,51	1634,10	1279,21	438,40	51,93	13,23	49,63	10,33
9	370,88	1108,48	3246,53	1936,49	4250,88	4386,44	4251,01	3116,87	1738,20	19,25	2005,35	474,71
10	2482,72	3372,99	5554,79	4172,72	6697,49	6348,09	6679,02	6041,02	4770,82	758,98	4946,02	2560,90
11	4117,33	4833,28	6948,51	5745,39	8140,71	7639,42	8099,64	7732,03	6604,90	3964,98	6150,74	4155,38
12	4841,46	5652,30	7681,06	6891,28	8923,36	8456,13	8934,70	8697,26	7584,25	6311,29	6464,72	4731,25
13	5083,10	5978,44	7951,50	7557,36	9199,93	8926,91	9416,74	9209,02	8048,64	7284,67	6425,28	4968,01
14	5140,32	5946,77	7926,46	7747,11	9333,31	9024,75	9565,65	9382,89	8140,71	7656,36	6349,57	4859,53
15	4863,46	5656,48	7680,59	7584,04	9178,63	8907,81	9512,79	9321,75	7967,97	7761,99	5946,62	4497,55
16	4054,85	5032,41	7049,22	7196,17	8681,52	8571,17	9196,91	8904,48	7564,94	7560,06	4882,40	3534,95
17	2143,04	3542,44	5839,22	6364,03	7944,15	7845,88	8556,97	8212,61	6843,31	7178,87	2140,11	1319,27

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
18	276,70	1211,93	3391,93	5094,98	6817,71	6905,76	7530,88	6956,32	5524,63	6273,79	109,17	51,89
19	40,25	56,98	676,06	3304,90	5006,05	5445,93	5954,55	4982,19	2937,58	4160,02	29,98	17,53
20	28,04	34,27	84,07	971,17	2369,28	3163,96	3336,36	1969,72	415,39	995,15	20,55	16,06
21	26,72	30,58	27,23	44,54	306,69	741,53	699,86	162,30	48,59	28,00	15,61	15,55
22	26,68	29,40	23,99	25,84	64,28	93,21	72,65	52,98	37,47	15,81	13,85	14,17
23	26,64	24,03	21,72	17,74	32,42	24,73	44,62	46,64	35,04	14,67	13,85	13,28

Taula 32. Relació entre generació fotovoltaica i potència instal·lada a la península ibèrica (MWh/MWins).

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
0	1,83E-03	1,53E-03	8,41E-04	1,27E-03	1,67E-03	1,68E-03	2,47E-03	3,01E-03	2,41E-03	9,09E-04	8,35E-04	7,38E-04
1	1,81E-03	1,49E-03	8,20E-04	1,05E-03	1,25E-03	1,46E-03	2,07E-03	2,97E-03	2,39E-03	8,95E-04	7,57E-04	7,27E-04
2	1,81E-03	1,49E-03	6,88E-04	9,56E-04	1,25E-03	1,56E-03	2,04E-03	2,65E-03	2,41E-03	8,88E-04	7,55E-04	7,31E-04
3	1,81E-03	1,41E-03	8,36E-04	9,56E-04	1,13E-03	1,55E-03	1,79E-03	2,65E-03	2,39E-03	2,84E-04	7,51E-04	7,40E-04
4	1,81E-03	1,39E-03	7,74E-04	8,48E-04	1,13E-03	1,44E-03	1,76E-03	2,64E-03	2,39E-03	8,97E-04	7,51E-04	6,82E-04
5	1,81E-03	1,39E-03	5,69E-04	7,55E-04	1,13E-03	1,43E-03	1,73E-03	2,62E-03	2,36E-03	8,99E-04	5,83E-04	6,87E-04

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
6	1,80E-03	1,39E-03	5,92E-04	7,47E-04	1,13E-03	1,43E-03	1,73E-03	2,62E-03	2,36E-03	8,88E-04	5,74E-04	6,87E-04
7	1,72E-03	1,33E-03	8,39E-04	4,80E-04	2,01E-03	9,34E-03	3,45E-03	2,61E-03	2,34E-03	8,77E-04	5,76E-04	6,78E-04
7	1,71E-03	1,59E-03	3,97E-02	1,28E-02	8,50E-02	1,09E-01	8,50E-02	2,91E-02	3,45E-03	8,79E-04	3,30E-03	6,87E-04
9	2,46E-02	7,37E-02	2,16E-01	1,29E-01	2,82E-01	2,91E-01	2,82E-01	2,07E-01	1,16E-01	1,28E-03	1,33E-01	3,15E-02
10	1,65E-01	2,24E-01	3,69E-01	2,77E-01	4,45E-01	4,22E-01	4,44E-01	4,01E-01	3,17E-01	5,04E-02	3,29E-01	1,70E-01
11	2,74E-01	3,21E-01	4,62E-01	3,82E-01	5,41E-01	5,08E-01	5,38E-01	5,14E-01	4,39E-01	2,63E-01	4,09E-01	2,76E-01
12	3,22E-01	3,76E-01	5,10E-01	4,58E-01	5,93E-01	5,62E-01	5,94E-01	5,78E-01	5,04E-01	4,19E-01	4,30E-01	3,14E-01
13	3,38E-01	3,97E-01	5,28E-01	5,02E-01	6,11E-01	5,93E-01	6,26E-01	6,12E-01	5,35E-01	4,84E-01	4,27E-01	3,30E-01
14	3,42E-01	3,95E-01	5,27E-01	5,15E-01	6,20E-01	6,00E-01	6,36E-01	6,24E-01	5,41E-01	5,09E-01	4,22E-01	3,23E-01
15	3,23E-01	3,76E-01	5,10E-01	5,04E-01	6,10E-01	5,92E-01	6,32E-01	6,19E-01	5,30E-01	5,16E-01	3,95E-01	2,99E-01
16	2,69E-01	3,34E-01	4,68E-01	4,78E-01	5,77E-01	5,70E-01	6,11E-01	5,92E-01	5,03E-01	5,02E-01	3,24E-01	2,35E-01
17	1,42E-01	2,35E-01	3,88E-01	4,23E-01	5,28E-01	5,21E-01	5,69E-01	5,46E-01	4,55E-01	4,77E-01	1,42E-01	8,77E-02

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
18	1,84E-02	8,05E-02	2,25E-01	3,39E-01	4,53E-01	4,59E-01	5,00E-01	4,62E-01	3,67E-01	4,17E-01	7,26E-03	3,45E-03
19	2,67E-03	3,79E-03	4,49E-02	2,20E-01	3,33E-01	3,62E-01	3,96E-01	3,31E-01	1,95E-01	2,76E-01	1,99E-03	1,17E-03
20	1,86E-03	2,28E-03	5,59E-03	6,45E-02	1,57E-01	2,10E-01	2,22E-01	1,31E-01	2,76E-02	6,61E-02	1,37E-03	1,07E-03
21	1,78E-03	2,03E-03	1,81E-03	2,96E-03	2,04E-02	4,93E-02	4,65E-02	1,08E-02	3,23E-03	1,86E-03	1,04E-03	1,03E-03
22	1,77E-03	1,95E-03	1,59E-03	1,72E-03	4,27E-03	6,19E-03	4,83E-03	3,52E-03	2,49E-03	1,05E-03	9,20E-04	9,42E-04
23	1,77E-03	1,60E-03	1,44E-03	1,18E-03	2,15E-03	1,64E-03	2,97E-03	3,10E-03	2,33E-03	9,75E-04	9,20E-04	8,82E-04

Taula 33. Balanç econòmic horari, diari, mensual i anual (€/hora).

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
0	2,24	1,83	0,88	1,48	2,03	2,03	3,13	3,87	3,04	0,97	0,87	0,74
1	2,22	1,77	0,85	1,17	1,45	1,73	2,57	3,82	3,02	0,95	0,76	0,72
2	2,22	1,78	0,67	1,04	1,44	1,87	2,54	3,38	3,04	0,94	0,76	0,73
3	2,21	1,66	0,87	1,04	1,28	1,86	2,18	3,37	3,02	0,11	0,75	0,74
4	2,21	1,63	0,79	0,89	1,28	1,71	2,14	3,37	3,02	0,96	0,75	0,66
5	2,21	1,63	0,50	0,76	1,28	1,69	2,10	3,34	2,98	0,96	0,52	0,67

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
6	2,20	1,63	0,54	0,75	1,27	1,70	2,10	3,34	2,98	0,94	0,51	0,67
7	0,96	0,42	-0,35	-1,05	1,37	11,48	3,36	2,19	1,82	-0,28	-0,86	-0,66
7	-0,64	-0,88	51,98	14,88	114,48	147,10	114,54	37,40	1,94	-2,25	1,73	-2,62
9	29,79	97,47	293,62	173,43	385,77	398,21	385,78	281,73	155,24	-3,45	179,75	39,32
10	-637,72	-523,37	-243,13	-420,65	-96,36	-141,24	-98,73	-180,68	-343,83	-859,13	-321,33	-627,68
11	-429,74	-337,78	-66,09	-220,63	62,17	16,18	58,40	24,68	-110,23	-449,31	-168,56	-424,85
12	-338,71	-234,56	18,59	-75,42	132,57	89,70	133,61	111,82	9,71	-149,91	-130,21	-352,86
13	-308,46	-193,46	42,84	6,68	157,38	132,33	177,27	158,21	51,75	-25,68	-136,06	-323,24
14	-301,11	-197,53	40,54	24,08	169,61	141,30	190,93	174,16	60,20	15,76	-145,79	-337,18
15	-335,88	-234,02	18,55	9,69	155,99	131,14	186,64	169,12	44,91	26,01	-196,75	-382,88
16	-438,16	-312,60	-53,55	-34,68	111,51	101,38	158,79	131,96	9,06	8,62	-331,87	-504,94
17	-682,14	-502,40	-207,39	-139,98	44,98	35,97	101,21	69,61	-78,42	-35,32	-682,52	-787,95
18	20,59	106,39	306,40	462,65	620,70	628,78	686,13	633,42	502,07	570,80	5,22	-0,05
19	0,31	1,84	58,64	299,83	455,90	496,26	542,92	453,71	266,13	378,28	-0,89	-2,49
20	0,60	1,17	5,74	87,13	215,40	288,31	304,12	178,74	36,14	89,33	-0,13	-0,70
21	1,32	1,68	1,37	2,96	27,01	66,90	63,08	13,76	3,33	1,44	0,30	0,30
22	2,17	2,42	1,92	2,09	5,62	8,27	6,38	4,58	3,16	1,17	0,99	1,02
23	2,16	1,92	1,71	1,35	2,69	1,99	3,81	4,00	2,93	1,06	0,99	0,94
€/dia	-3.399,14	-2.311,36	276,46	199,48	2.576,81	2.566,64	3.035,03	2.292,90	637,01	-427,03	-1.921,05	-3.701,63

Hora (h)	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
€/mes	- 105.373,36	- 64.717,97	8.570,34	5.984,39	79.881,06	76.999,30	94.085,88	71.079,89	19.110,15	- 13.237,83	- 57.631,36	- 114.750,49

7.6 Estudi viabilitat econòmica

7.6.1 Càlcul cost d'equips

7.6.1.1 Electrolitzadors

Per estimar el cost dels electrolitzadors, es calcularà mitjançant la relació entre el preu i els kilowatts d'electrolitzador instal·lats [14]. Addicionalment, es té en compte un factor d'instal·lació que contempla el cost d'instal·lació de l'equip.

$$\text{Cost electrolitzadors instal·lats} = M_{\text{electrolitzador}} \cdot R_{\text{electrolitzador}} \cdot F_{\text{instal·lació}} \quad (40)$$

On:

- $M_{\text{electrolitzador}}$: número de mòduls electrolitzadors.
- $R_{\text{electrolitzador}}$: relació cost/potència instal·lada.
- $F_{\text{instal·lació}}$: factor instal·lació.

En la següent taula es mostren els resultats:

$M_{\text{electrolitzador}}$	$R_{\text{electrolitzador}}$ (€/kW)	$F_{\text{instal·lació}}$	Cost electrolitzadors instal·lats (€)
5883	300	1,5	5.823.180,00

7.6.1.2 Tanc d'aigua

Pel que fa al tanc d'aigua, es farà servir el model d'estimació CAPCOST, descrit per Richard Turton et al., a Anàlisi, Síntesi i Disseny de Processos Químics. Mitjançant la següent equació d'ús general, no només per a tancs d'aigua, sinó per tots els equips contemplats pel model, es pot calcular el cost de l'equip:

$$\log_{10} C_p^0 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(A) + K_3 \cdot [\log_{10}(A)]^2 \quad (41)$$

On:

- C_p^0 : cost base de l'equip.
- K_1 , K_2 i K_3 : valors bibliogràfics específics pels compressors de pistons.
- A : dimensió d'equip, en aquest cas, volum.

El valor de C_p^0 , però, es tracta de la estimació del cost de l'equip si aquest estigués fabricat amb acer al carboni. En aquest cas, el tanc es troba fabricat amb aquest material. Per equips en el que aquest no sigues el cas, el model i introdueix un factor de material:

$$C_{BM\ 2001} = C_p^0 \cdot F_{BM} \quad (42)$$

On:

- $C_{BM\ 2001}$: cost de l'equip a l'any 2001.
- F_{BM} : factor de material

Per últim, s'ha d'adaptar el valor calculat a la inflació, donat que amb aquest mètode s'obté el cost de l'equip per l'any 2001. Coneixent el valor del CEPCI [40], que es un índex d'inflació per a equips de plantes químiques, es pot calcular quin seria el cost de l'equip l'any 2030. El valor del CEPCI s'actualitza cada any, per tant, per al 2030 només es pot fer una estimació del valor que podria tindre. Per fer-ho, es representaran els valors del CEPCI al llarg dels anys:

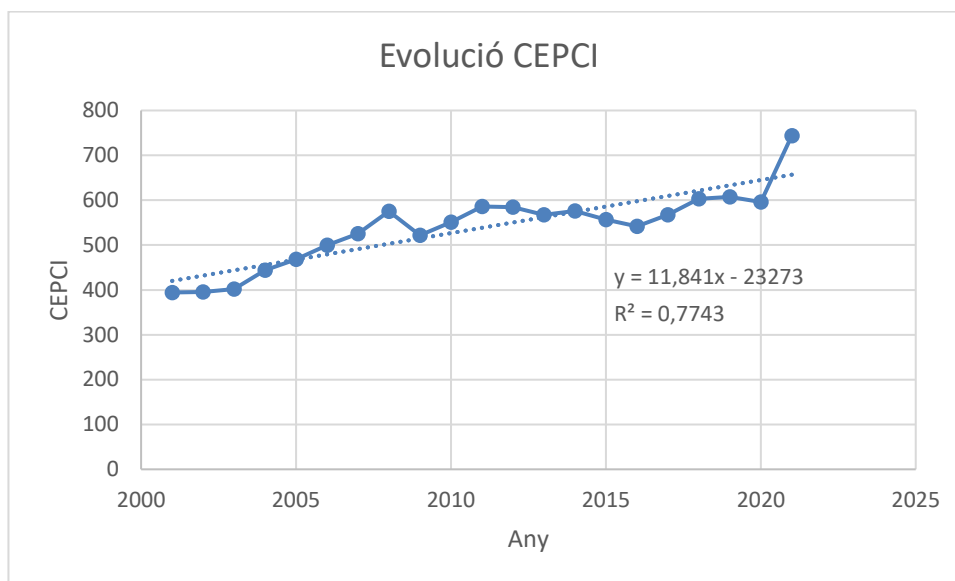


Figura 42. Evolució del CEPCI al llarg dels anys.

Agregant a les dades una línia de tendència es pot obtenir el valor del CEPCI al 2030. La R^2 es menor a 0,99, factor que indica que la predicció serà poc precisa:

$$CEPCI_{2030} = 11,841 \cdot 2030 - 23273 = 764,23 \quad (43)$$

Un cop obtingut el valor del CEPCI, es calcula el cost de l'equip de la següent manera:

$$C_{BM\ 2030} = C_{BM\ 2001} \cdot \frac{CEPCI_{2030}}{CEPCI_{2001}} \quad (44)$$

Per últim, aplicant un factor d'instal·lació [41], s'obté el cost de l'equip instal·lat:

$$Cost\ equip\ instal \cdot lat = C_{BM\ 2030} \cdot F_{instal \cdot lació} \quad (45)$$

Així doncs, en la següent taula es mostra el valor dels paràmetres bibliogràfics necessaris per calcular el cost del tanc d'aigua:

Taula 34. Valor paràmetres bibliogràfics tanc d'aigua.

Paràmetre	Valor
K_1	4,85
K_2	-0,40
K_3	0,14
F_{BM}	1
$CEPCI_{2001}$	394,3
$CEPCI_{2030}$	764,26
$F_{instal·lació}$	1,5

En la següent taula es mostra el cost del tanc d'aigua instal·lat:

Taula 35. Cost tanc d'aigua instal·lat.

Volum (m ³)	Cost equip instal·lat (€)
35,44	111.202,96

7.6.1.3 Compressors alta, mitja i baixa pressió

Pel que fa als compressors, s'utilitza el model CAPCOST emprat per estimar el cost del tanc d'aigua. Per estimar el cost, és necessari conèixer la potència dels compressors. Els valors dels paràmetres bibliogràfics per poder calcular el cost dels compressors instal·lats es mostren a la següent taula:

Taula 36. Valor paràmetres bibliogràfics compressors.

Paràmetre	Valor
K_1	2,29
K_2	1,36
K_3	-0,10
F_{BM}	7
$CEPCI_{2001}$	394,3
$CEPCI_{2030}$	764,26
$F_{instal·lació}$	1,5

En la següent taula es mostra els costos dels compressors d'alta, mitja i baixa pressió:

Taula 37. Cost compressors instal·lats alta, mitja i baixa pressió.

Compressor	Potència (kW)	Cost instal·lats (€)
Alta pressió	213,61	1.623.832,71
Mitja pressió	101,57	822.452,46
Baixa pressió	13,94	104.933,03

7.6.1.4 Refrigeradors d'alta, mitja i baixa pressió

El cost dels refrigeradors, cada un dels quals consta d'un intercanviador, un compressor i tres aerorefrigeradors, s'estima mitjançant el model CAPCOST. Els paràmetres bibliogràfics necessaris per realitzar la estimació del cost es troben en la següent taula:

Taula 38. Valor paràmetres bibliogràfics cicle de refrigeració.

Paràmetre	Compressor	Aerorefrigerador	Intercanviador
K_1	2,29	4,03	4,19
K_2	1,36	0,23	-0,25
K_3	-0,10	0,05	0,20
F_{BM}	7,00	1,2	2,8
$CEPCI_{2001}$	394,30	394,30	394,30
$CEPCI_{2030}$	764,26	764,26	764,26
$F_{instal·lació}$	1,50	1,50	1,50

Per tant, el cost de l'equip instal·lat serà la suma dels equips que componen cada cicle de refrigeració. En les següents taules es mostra la potència dels compressors i l'àrea d'intercanvi per calcular el cost de l'intercanviador i els aerorefrigeradors:

Taula 39. Dimensions d'equips del cicle de refrigeració d'alta pressió.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	95,77	kW
Aerorefrigerador AC-100	894,80	m ²
Aerorefrigerador AC-101	894,80	m ²
Aerorefrigerador AC-102	878,00	m ²
Intercanviador	10,5	m ²

Taula 40. Dimensions d'equips del cicle de refrigeració de mitja pressió.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	79,72	kW
Aerorefrigerador AC-100	349,70	m ²
Aerorefrigerador AC-101	267,40	m ²
Aerorefrigerador AC-102	266,50	m ²
Intercanviador	6,03	m ²

Taula 41. Dimensions d'equips del cicle de refrigeració de baixa pressió.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	11,20	kW
Aerorefrigerador AC-100	143,95	m ²
Aerorefrigerador AC-101	144,00	m ²
Aerorefrigerador AC-102	143,10	m ²
Intercanviador	5,68	m ²

Per últim, es mostra en la següent taula el cost instal·lat dels cicles de refrigeració:

Taula 42. Cost cicles de refrigeració instal·lats.

Cicle de refrigeració	Cost compressors instal·lats (€)
Alta pressió	1.623.832,71
Mitja pressió	822.452,46
Baixa pressió	104.933,03

7.6.1.5 Tancs d'emmagatzematge d'hidrogen

Els tancs emprats per emmagatzemar es tracten dels MSLV. Es disposa dels preus d'emmagatzematge per alta, mitja i baixa pressió, a 600, 450 i 350 €/kg respectivament, tal i com s'exposa en l'apartat 2.4. Coneixent la quantitat de kilograms emmagatzemada a cada pressió, tal i com s'ha calculat en l'apartat 3.2.2.3, es calcula el cost dels tancs com:

$$Cost\ tancs = Massa\ emmagatzemada \cdot Cost\ kilogram\ emmagatzemat \cdot F_{instal\cdot lació} \quad (46)$$

En la següent taula es mostren els resultats:

Tancs d'emmagatzematge	Massa emmagatzemada (kg)	Cost kilogram emmagatzemat (€/kg)	$F_{instal·lació}$	Cost tancs instal·lats (€)
Alta pressió	9470,40	600,00	1,5	8.523.357,42
Mitja pressió	7600,54	450,00	1,5	5.130.366,22
Baixa pressió	1621,43	350,00	1,5	851.251,69

7.6.1.6 Refrigerador de subministrament

Seguint el procediment de càlcul dels refrigeradors d'alta, mitja i baixa pressió, es calcula el cost dels refrigeradors d'emmagatzematge fent servir el model CAPCOST. En la següent taula es mostren els valors dels paràmetres bibliogràfics necessaris per realitzar la estimació:

Taula 43. Valor paràmetres bibliogràfics cicle de refrigeració.

Paràmetre	Compressor	Aerorefrigerador	Intercanviador
K_1	2,29	4,03	4,19
K_2	1,36	0,23	-0,25
K_3	-0,10	0,05	0,20
F_{BM}	7,00	1,2	2,8
$CEPCI_{2001}$	394,30	394,30	394,30
$CEPCI_{2030}$	764,26	764,26	764,26
$F_{instal·lació}$	1,50	1,50	1,50

En la següent taula es mostra la potència dels compressors i l'àrea d'intercanvi per calcular el cost de l'intercanviador i els aerorefrigeradors:

Taula 44. Dimensions d'equips del cicle de refrigeració de subministrament.

Equip	Unitats	Magnitud
Compressor	135,25	kW
Aerorefrigerador AC-100	447,30	m ²
Aerorefrigerador AC-101	447,40	m ²
Aerorefrigerador AC-102	447,45	m ²
Intercanviador	37,20	m ²

Per últim, es mostra en la següent taula el cost instal·lat dels cicles de refrigeració:

Taula 45. Cost cicle de refrigeració de subministrament instal·lat.

Cicle de refrigeració	Cost compressors instal·lats (€)
Subministrament	1.178.744,75

7.6.1.7 Instal·lació solar fotovoltaica

El mètode per estimar el cost de la planta solar serà fer servir una estimació del cost d'aquesta en funció de la potència instal·lada. Aquesta estimació contempla tots els costos associats als equips de la planta, com poden ser els panells, l'inversor, cablejat i instal·lació [42]. Fent el producte de la potència de la planta pel cost del watt instal·lat, s'obté el cost de la planta instal·lada:

$$\text{Cost planta solar instal·lada} = \text{Potència instal·lada} \cdot \text{Cost watt instal·lat} \quad (47)$$

El cost de la planta es mostra a la següent taula:

Taula 46. Cost planta solar fotovoltaica instal·lada.

Potència instal·lada (MW)	Cost watt instal·lat (€/W)	Cost planta instal·lada (€)
27,57	0,28	7.580.894,47

7.6.2 Càlcul despeses d'operació

Sent que es dimensiona la planta solar per tindre un balanç econòmic anual de 0, les úniques despeses considerades són les despeses de l'aigua necessària per dur a terme la electròlisi i el cost de lloguer del terreny. Fent el producte dels metres cúbics consumits pel seu cost i les hectàrees pel seu cost, s'obtenen les respectives despeses anuals:

Taula 47. Cost aigua i terreny.

Despesa	Quantitat	Cost
Aigua	7.771,16 $\frac{m^3}{any}$	2,17 $\frac{€}{m^3}$
Terreny	51 ha	1.500 $\frac{€}{ha \cdot any}$

Sumant aquestes despeses, s'obtenen les despeses anuals:

Taula 48. Despeses anuals.

Despesa	Despesa anual (€/any)
Aigua	16.847,88
Terreny	76.498,13

Despesa	Despesa anual (€/any)
Total	93.346,01

7.6.3 Càlcul VAN

En aquest apartat es mostren les despeses en equips, les despeses d'operació, els fluxos de caixa i els fluxos de caixa descomptats a la taxa d'interès.

L'any zero correspon a l'any on es construeix la hidrogenera, on no hi han despeses d'operació ni beneficis degut a que és el període durant el qual s'està construint. Les despeses d'operació i els ingressos són constants.

Durant l'any 14, 15, 28 i 30 és necessari renovar equips com són els electrolitzadors o l'inversor de la planta solar fotovoltaica [34]. Per la resta d'equips, es suposa que no serà necessari reemplaçar-los.

Taula 49. Cost dels equips i temps de vida.

Equip	Vida de l'equip (anys)	Cost (€)
Electrolitzador	14	3.920.333,96
Inversor	15	578.905,74

Taula 50. Fluxos de caixa al llarg de la vida del projecte de 30 anys.

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
0	51.514.405,26	-	-	- 51.514.405,26	- 51.514.405,26
1	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.795.200,07
2	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.713.786,48
3	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.634.744,15
4	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.558.004,03
5	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.483.499,06
6	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.411.164,14
7	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.340.936,05

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
8	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.272.753,45
9	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.206.556,75
10	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.142.288,10
11	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.079.891,36
12	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	2.019.312,00
13	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.960.497,09
14	3.920.333,96	93.471,02	2.972.527,10	- 1.041.277,88	- 688.407,35
15	579.850,82	93.471,02	2.972.527,10	2.299.205,26	1.475.772,36
16	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.794.132,56
17	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.741.876,27
18	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.691.142,01
19	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.641.885,45
20	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.594.063,54
21	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.547.634,51
22	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.502.557,77
23	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.458.793,96
24	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.416.304,81
25	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.375.053,21
26	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.335.003,12
27	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.296.119,54

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
28	3.920.333,96	93.471,02	2.972.527,10	- 1.041.277,88	- 455.118,36
29	-	93.471,02	2.972.527,10	2.879.056,07	1.221.716,97
30	579.850,82	93.471,02	2.972.527,10	2.299.205,26	947.242,12

Taula 51. Fluxos de caixa al llarg de la vida del projecte de 20 anys.

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
0	51.514.405,26	-	-	- 51.514.405,26	- 51.514.405,26
1	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	3.555.149,20
2	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	3.451.601,16
3	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	3.351.069,09
4	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	3.253.465,14
5	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	3.158.704,02
6	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	3.066.702,93
7	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.977.381,48
8	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.890.661,63
9	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.806.467,61
10	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.724.725,83
11	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.645.364,89
12	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.568.315,42

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
13	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.493.510,12
14	3.920.333,96	93.471,02	3.755.274,70	- 258.530,28	- 170.918,97
15	579.850,82	93.471,02	3.755.274,70	3.081.952,86	1.978.188,26
16	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.281.914,99
17	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.215.451,44
18	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.150.923,73
19	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.088.275,47
20	-	93.471,02	3.755.274,70	3.661.803,67	2.027.451,91

Taula 52. Fluxos de caixa al llarg de la vida del projecte de 15 anys.

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
0	51.514.405,26	-	-	- 51.514.405,26	- 51.514.405,26
1	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	4.430.552,05
2	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	4.301.506,85
3	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	4.176.220,24
4	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	4.054.582,76
5	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.936.488,12
6	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.821.833,12
7	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.710.517,59

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
8	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.602.444,27
9	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.497.518,70
10	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.395.649,23
11	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.296.746,82
12	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.200.725,07
13	-	93.471,02	4.656.939,64	4.563.468,62	3.107.500,07
14	3.920.333,96	93.471,02	4.656.939,64	643.134,66	425.187,78
15	579.850,82	93.471,02	4.656.939,64	3.983.617,80	2.556.932,68

Taula 53. Fluxos de caixa al llarg de la vida del projecte de 10 anys.

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
0	51.514.405,26	-	-	- 51.514.405,26	- 51.514.405,26
1	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	5.863.164,88
2	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	5.692.393,09
3	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	5.526.595,23
4	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	5.365.626,44
5	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	5.209.346,06
6	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	5.057.617,53
7	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	4.910.308,28

Any	Inversió equips	Despeses d'operació	Ingressos	CF	$\frac{CF}{(1+k)^t}$
8	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	4.767.289,59
9	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	4.628.436,50
10	-	93.471,02	6.132.530,85	6.039.059,83	4.493.627,67

7.7 Fulls API ASPEN EDR

1. Aerorefrigerador alta pressió AC-100
2. Aerorefrigerador alta pressió AC-101
3. Aerorefrigerador alta pressió AC-102
4. Aerorefrigerador mitja pressió AC-100
5. Aerorefrigerador mitja pressió AC-101
6. Aerorefrigerador mitja pressió AC-102
7. Aerorefrigerador baixa pressió AC-100
8. Aerorefrigerador baixa pressió AC-101
9. Aerorefrigerador baixa pressió AC-102
10. Aerorefrigerador subministrament AC-100
11. Aerorefrigerador subministrament AC-101
12. Aerorefrigerador subministrament AC-102

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers alta AC-100.EDR

Printed: 18/08/2022 at 19:39:25

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:																			
2	Location:																			
3	Service of Unit:					Our Reference:														
4	Item No.:					Your Reference:														
5	Date:			Rev No.:			Job No.:													
6	Size & Type		9,744 / 1,2624		m		Type		Forced		Number of Bays		1							
7	Surf/Unit-Finned Tube		894,8		m ²		Bare area/bundle		38,1		m ²		Ratio (Total/Bare)		23,49					
8	Heat exchanged		36		kW		MTD, Eff		78,97		°C									
9	Transfer Rate-Finned		0,9		Bare, Service		12		Clean		21,9		W/(m ² -K)							
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE																			
11	Fluid Circulated				Amoníac				In		/		Out							
12	Total Fluid Entering		kg/s		0,0528		Density, Liq		kg/m ³		/									
13			In		/		Out		Density, Vap		kg/m ³		0,1		/		0,2			
14	Temperature		°C		311,1		/		54,68		Specific Heat, Liq		kJ/(kg-K)		/					
15	Liquid		kg/s		0		/		0		Specific Heat, Vap		kJ/(kg-K)		2,716		/		2,636	
16	Vapor		kg/s		0,0528		/		0,0528		Therm. Cond, Liq		W/(m-K)				/			
17	Noncondensable		kg/s		0		/		0		Therm. Cond, Vap		W/(m-K)		0,0635		/		0,0286	
18	Steam		kg/s		/				Freeze Point		°C									
19	Water		/				Bubble / Dew point		°C				-59,62		/		-59,62			
20	Molecular wt, Vap		17,03056		/				17,03056		Latent heat		kJ/kg							
21	Molecular wt, NC				Inlet pressure (abs)		kPa		27,62											
22	Viscosity, Liq		mPa-s		/				Pres Drop, Allow/Calc		bar		0,02		/		0,00781			
23	Viscosity, Vap		mPa-s		0,0207		/		0,0116		Fouling resistance		m ² -K/W				0			
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE																			
25	Air Quantity, Total		55,5556		kg/s		Altitude		0		m									
26	Air Quantity/Fan		6,258		m ³ /s		Temperature In		45		°C									
27	Static Pressure		190		Pa		Temperature Out		45,64		°C									
28	Face Velocity		5,09		m/s		Mass velocity		5,65		kg/s/m ²		Design Ambient		0		°C			
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION																			
30	Design/Vac./Test Pres		3,44738		/				/		bar		Design temperature		426,67		°C			
31	TUBE BUNDLE				Header				Tube											
32	Size		m		9,744		Type		Box		Material		Carbon Steel							
33	Number/bay		1		Material		Carbon Steel				Specifications									
34	Tube Rows		3		Passes		1		OD		25,4		Min Thk.		1,65		mm			
35	Arrangement		Plug Mat.				No./Bun		54		Lng		9,144				m			
36	Bundles		1		par		Gasket Mat.		Pitch		60		/		51,96		30		Degrees	
37	Bays		1		par		Corr. Allow.		mm		FIN									
38	Bundle frame		Inlet nozzle (1)		122,25		mm		Type		G-finned									
39	MISCELLANEOUS				Outlet nozzle (1)		85,45		mm		Material		Aluminum 1060							
40	Struct. Mount.		Special Nozzles				OD		57,15		Tks		0,28		mm					
41	Surf.Prepare		Rating		Program		No.		433		#/m		Design Temp		°C					
42	Louvers		TI		PI		Code		\SME Code Sec VIII Div 1											
43	Vibration Switches		Chem Cleaning				Stamp		Yes		Specs									
44	MECHANICAL EQUIPMENT																			
45	Fan,Mfr., Model				Driver, Type				Program				Speed Reducer, Type							
46	No./Bay		8		RPM		Mfr.		Mfr.&Model											
47	Dia.		0,762m		Blade(s)		No./Bay		No./Bay											
48	Pitch		Angle		RPM		Rating		hp											
49	Blade(s)		Hub		Enclosure		Ratio													
50	hp/Fan		2,248		kW		MinAmb		V/Phase/Hz		/ /				Support					
51	Control Action on Air Failure-				Louvers															
52	Degree Control of Outlet Process Temperature																			
53	Recirculation				Steam Coil				No											
54	Plot Area		m ²		Drawing No.		Wt.Bundle		2167		Wt. Unit		2167		kg					
55	Notes:																			
56																				
57																				
58																				

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers alta AC-101.EDR

Printed: 18/08/2022 at 19:36:28

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:										
2	Location:										
3	Service of Unit:					Our Reference:					
4	Item No.:					Your Reference:					
5	Date:	Rev No.:			Job No.:						
6	Size & Type	9,744	/	1,2624	m	Type	Forced	Number of Bays	1		
7	Surf/Unit-Finned Tube	894,8			m ²	Bare area/bundle	38,1	m ²	Ratio (Total/Bare)	23,49	
8	Heat exchanged	35,9			kW	MTD, Eff	80,44			°C	
9	Transfer Rate-Finned	2,3	Bare, Service			11,7	Clean	53,8		W/(m ² -K)	
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE										
11	Fluid Circulated	Amoníac					In	/	Out		
12	Total Fluid Entering	kg/s	0,0527			Density, Liq	kg/m ³	/			
13			In	/	Out	Density, Vap	kg/m ³	0,91	/	1,89	
14	Temperature	°C	313,8 / 54,94			Specific Heat, Liq	kJ/(kg-K)		/		
15	Liquid	kg/s	0 / 0			Specific Heat, Vap	kJ/(kg-K)		2,72	/ 2,634	
16	Vapor	kg/s	0,0527 / 0,0527			Therm. Cond, Liq	W/(m-K) /				
17	Noncondensable	kg/s	0 / 0			Therm. Cond, Vap	W/(m-K)		0,0639	/ 0,0286	
18	Steam	kg/s	/			Freeze Point	°C				
19	Water		/			Bubble / Dew point	°C	-14,11	/	-14,11	
20	Molecular wt, Vap	17,03056 / 17,03056			Latent heat	kJ/kg					
21	Molecular wt, NC						Inlet pressure (abs)	kPa 254,2			
22	Viscosity, Liq	mPa-s	/			Pres Drop, Allow/Calc	bar		0,02	/ 0,01189	
23	Viscosity, Vap	mPa-s	0,0208 / 0,0117			Fouling resistance	m ² -K/W		0		
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE										
25	Air Quantity, Total	55,5556			kg/s	Altitude	0		m		
26	Air Quantity/Fan	6,258			m ³ /s	Temperature In	45		°C		
27	Static Pressure	190			Pa	Temperature Out	45,63		°C		
28	Face Velocity	5,09	m/s	Mass velocity	5,65	kg/s/m ²	Design Ambient	0		°C	
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION										
30	Design/Vac./Test Pres	3,44738 / /			bar	Design temperature	426,67 °C				
31	TUBE BUNDLE			Header			Tube				
32	Size	m	9,744		Type	Box		Material	Carbon Steel		
33	Number/bay	1			Material	Carbon Steel					
34	Tube Rows	3			Passes	3		OD	25,4	Min Thk. 1,65 mm	
35	Arrangement						Plug Mat.	No./Bun	54	Lng	9,144 m
36	Bundles	1	par		Gasket Mat.						
37	Bays	1	par		Corr. Allow.	mm		Pitch	60 / 51,96	30 Degrees	
38	Bundle frame				Inlet nozzle (1)	66,65 mm		Type	G-finned		
39	MISCELLANEOUS						Outlet nozzle (1)	53,98 mm			
40	Struct. Mount.						Special Nozzles	Material	Aluminum 1060		
41	Surf.Prepare						Rating	Program	No. 433 #/m	Design Temp °C	
42	Louvers						TI	PI	Code	\SME Code Sec VIII Div 1	
43	Vibration Switches						Chem Cleaning	Stamp	Yes	Specs	
44	MECHANICAL EQUIPMENT										
45	Fan,Mfr., Model				Driver, Type	Program		Speed Reducer, Type			
46	No./Bay	8	RPM		Mfr.	Mfr.&Model					
47	Dia.	0,762m	Blade(s)		No./Bay	No./Bay					
48	Pitch	Angle			RPM			Rating	hp		
49	Blade(s)	Hub			Enclosure						
50	hp/Fan	2,248	kW	MinAmb	V/Phase/Hz	/ /		Support			
51	Control Action on Air Failure-									Louvers	
52	Degree Control of Outlet Process Temperature										
53	Recirculation						Steam Coil	No			
54	Plot Area	m ²	Drawing No.		Wt.Bundle	2151,1	Wt. Unit	2151,1	kg		
55	Notes:										
56											
57											
58											

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers alta AC-102.EDR

Printed: 18/08/2022 at 19:38:25

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:										
2	Location:										
3	Service of Unit:					Our Reference:					
4	Item No.:					Your Reference:					
5	Date:	Rev No.:			Job No.:						
6	Size & Type	9,1344	/	1,3224	m	Type	Forced	Number of Bays	1		
7	Surf/Unit-Finned Tube	878			m ²	Bare area/bundle	37,4	m ²	Ratio (Total/Bare)	23,49	
8	Heat exchanged	92,1			kW	MTD, Eff	15,32 °C				
9	Transfer Rate-Finned	34,7	Bare, Service			160,8	Clean	826,7 W/(m ² -K)			
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE										
11	Fluid Circulated	Amoníac					In / Out				
12	Total Fluid Entering	kg/s	0,0527			Density, Liq	kg/m ³	/ 552,82			
13		In / Out			Density, Vap	kg/m ³	8,31 /				
14	Temperature	°C	315,9 / 54,99			Specific Heat, Liq	kJ/(kg-K)		/ 5,685		
15	Liquid	kg/s	0 / 0,0527			Specific Heat, Vap	kJ/(kg-K)		2,725 /		
16	Vapor	kg/s	0,0527 / 0			Therm. Cond, Liq	W/(m-K)		/ 0,4097		
17	Noncondensable	kg/s	0 / 0			Therm. Cond, Vap	W/(m-K)		0,0642 /		
18	Steam	kg/s	/			Freeze Point	°C				
19	Water	/			Bubble / Dew point	°C	55,66 / 55,69				
20	Molecular wt, Vap	17,03056 / 17,03056			Latent heat	kJ/kg					
21	Molecular wt, NC				Inlet pressure (abs)	kPa 2340					
22	Viscosity, Liq	mPa-s	/ 0,0984			Pres Drop, Allow/Calc	bar 0,02 / 0,01785				
23	Viscosity, Vap	mPa-s	0,0209 /			Fouling resistance	m ² -K/W 0				
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE										
25	Air Quantity, Total	55,5556			kg/s	Altitude	0 m				
26	Air Quantity/Fan	7,152			m ³ /s	Temperature In	45 °C				
27	Static Pressure	196			Pa	Temperature Out	46,68 °C				
28	Face Velocity	5,2	m/s	Mass velocity	5,77	kg/s/m ²	Design Ambient	0 °C			
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION										
30	Design/Vac./Test Pres	31,02641	/	/	bar	Design temperature	426,67 °C				
31	TUBE BUNDLE			Header			Tube				
32	Size	m	9,1344		Type	Box	Material	Carbon Steel			
33	Number/bay	1			Material	Carbon Steel					
34	Tube Rows	3			Passes	9					
35	Arrangement				Plug Mat.	OD	25,4	Min Thk.	1,65	mm	
36	Bundles	1	par	Gasket Mat.	No./Bun	57	Lng	8,5344	m		
37	Bays	1	par	Corr. Allow.	mm		Pitch	60	/ 51,96	30 Degrees	
38	Bundle frame	Inlet nozzle (1) 42,85			mm	Type	G-finned				
39	MISCELLANEOUS			Outlet nozzle (1) 15,8			mm	Material	Aluminum 1060		
40	Struct. Mount.	Special Nozzles			OD	57,15	Tks	0,28 mm			
41	Surf.Prepare	Rating Program			No.	433	#/m	Design Temp	°C		
42	Louvers	TI PI			Code	\SME Code Sec VIII Div 1					
43	Vibration Switches	Chem Cleaning			Stamp	Yes	Specs				
44	MECHANICAL EQUIPMENT										
45	Fan,Mfr., Model	Driver, Type			Program		Speed Reducer, Type				
46	No./Bay	7	RPM		Mfr.		Mfr.&Model				
47	Dia.	0,762m	Blade(s)		No./Bay		No./Bay				
48	Pitch	Angle			RPM		Rating hp				
49	Blade(s)	Hub			Enclosure		Ratio				
50	hp/Fan	2,647	kW	MinAmb	V/Phase/Hz	/ /	Support				
51	Control Action on Air Failure-					Louvers					
52	Degree Control of Outlet Process Temperature										
53	Recirculation					Steam Coil No					
54	Plot Area	m ²		Drawing No.	Wt.Bundle	2678,8	Wt. Unit	2678,8	kg		
55	Notes:										
56											
57											
58											

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers media AC-100.EDR

Printed: 21/08/2022 at 10:19:36

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:										
2	Location:										
3	Service of Unit:					Our Reference:					
4	Item No.:					Your Reference:					
5	Date:	Rev No.:			Job No.:						
6	Size & Type	6,0864	/	0,9024	m	Type	Forced	Number of Bays	1		
7	Surf/Unit-Finned Tube	349,7			m ²	Bare area/bundle	14,9	m ²	Ratio (Total/Bare)	23,49	
8	Heat exchanged	27,4			kW	MTD, Eff	73,71			°C	
9	Transfer Rate-Finned	1,2	Bare, Service			24,9	Clean	27,3		W/(m ² -K)	
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE										
11	Fluid Circulated	Amoníac					In	/	Out		
12	Total Fluid Entering	kg/h	160			Density, Liq	kg/m ³	/			
13			In	/	Out	Density, Vap	kg/m ³	0,1	/	0,2	
14	Temperature	°C	287,3 / 54,71			Specific Heat, Liq	kJ/(kg-K)		/		
15	Liquid	kg/s	0 / 0			Specific Heat, Vap	kJ/(kg-K)		2,683 / 2,636		
16	Vapor	kg/s	0,0446 / 0,0446			Therm. Cond, Liq	W/(m-K) /				
17	Noncondensable	kg/s	0 / 0			Therm. Cond, Vap	W/(m-K)		0,0599 / 0,0286		
18	Steam	kg/s	/			Freeze Point	°C				
19	Water		/			Bubble / Dew point	°C	-59,61 / -59,61			
20	Molecular wt, Vap	17,03056 / 17,03056			Latent heat	kJ/kg					
21	Molecular wt, NC	/			Inlet pressure (abs)	kPa		27,62			
22	Viscosity, Liq	mPa-s	/			Pres Drop, Allow/Calc	bar	0,02 / 0,00662			
23	Viscosity, Vap	mPa-s	0,0199 / 0,0116			Fouling resistance	m ² -K/W		0		
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE										
25	Air Quantity, Total	55000			kg/h	Altitude	0		m		
26	Air Quantity/Fan	1,967			m ³ /s	Temperature In	45		°C		
27	Static Pressure	100			Pa	Temperature Out	46,77		°C		
28	Face Velocity	3,54	m/s	Mass velocity	3,93	kg/s/m ²	Design Ambient	0		°C	
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION										
30	Design/Vac./Test Pres	3,44738 / /			bar	Design temperature	398,89 °C				
31	TUBE BUNDLE			Header			Tube				
32	Size	m	6,0864		Type	Box		Material	Carbon Steel		
33	Number/bay	1			Material	Carbon Steel					
34	Tube Rows	3			Passes	1		OD	25,4	Min Thk. 1,65 mm	
35	Arrangement	/			Plug Mat.	/		No./Bun	36	Lng 5,4864 m	
36	Bundles	1	par		Gasket Mat.	/		Pitch	60 / 51,96	30 Degrees	
37	Bays	1	par		Corr. Allow.	mm		FIN			
38	Bundle frame	/			Inlet nozzle (1)	122,25 mm		Type	G-finned		
39	MISCELLANEOUS			/			Outlet nozzle (1)	85,45 mm			
40	Struct. Mount.	/			Special Nozzles	/		OD	57,15	Tks 0,28 mm	
41	Surf.Prepare	/			Rating	Program		No. 433 #/m	Design Temp °C		
42	Louvers	/			TI	PI		Code	\SME Code Sec VIII Div 1		
43	Vibration Switches	/			Chem Cleaning	/		Stamp	Yes Specs		
44	MECHANICAL EQUIPMENT										
45	Fan,Mfr., Model	/			Driver, Type	Program		Speed Reducer, Type			
46	No./Bay	7	RPM		Mfr.	/					
47	Dia.	0,4572m	Blade(s)		No./Bay	/					
48	Pitch	/			RPM	/		Rating	hp		
49	Blade(s)	/			Hub	/		Ratio	/		
50	hp/Fan	0,371	kW	MinAmb	V/Phase/Hz	/ /		Support	/		
51	Control Action on Air Failure-	/								Louvers	
52	Degree Control of Outlet Process Temperature										
53	Recirculation	/					Steam Coil	No			
54	Plot Area	m ²	/		Drawing No.	Wt.Bundle	1237,7	Wt. Unit	1237,7	kg	
55	Notes:										
56	/										
57	/										
58	/										

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers media AC-101.EDR

Printed: 21/08/2022 at 10:21:15

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:																
2	Location:																
3	Service of Unit:					Our Reference:											
4	Item No.:					Your Reference:											
5	Date:		Rev No.:			Job No.:											
6	Size & Type		4,8672 / 0,9024		m		Type		Forced		Number of Bays		1				
7	Surf/Unit-Finned Tube		267,4		m ²		Bare area/bundle		11,4		m ²		Ratio (Total/Bare)		23,49		
8	Heat exchanged		30,4		kW		MTD, Eff		80,07		°C						
9	Transfer Rate-Finned		2,7		Bare, Service		33,3		Clean		64,3		W/(m ² -K)				
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE																
11	Fluid Circulated					Amoníac					In / Out						
12	Total Fluid Entering		kg/h		160		Density, Liq		kg/m ³								
13			In / Out				Density, Vap		kg/m ³		0,91 / 1,89						
14	Temperature		°C		313,8 / 54,92		Specific Heat, Liq		kJ/(kg-K)								
15	Liquid		kg/s		0 / 0		Specific Heat, Vap		kJ/(kg-K)		2,72 / 2,635						
16	Vapor		kg/s		0,0446 / 0,0446		Therm. Cond, Liq		W/(m-K)								
17	Noncondensable		kg/s		0 / 0		Therm. Cond, Vap		W/(m-K)		0,0639 / 0,0286						
18	Steam		kg/s		/		Freeze Point		°C								
19	Water		/				Bubble / Dew point		°C		-14,09 / -14,09						
20	Molecular wt, Vap		17,03056 / 17,03056				Latent heat		kJ/kg								
21	Molecular wt, NC						Inlet pressure (abs)		kPa		254,2						
22	Viscosity, Liq		mPa-s		/		Pres Drop, Allow/Calc		bar		0,02 / 0,0117						
23	Viscosity, Vap		mPa-s		0,0208 / 0,0117		Fouling resistance		m ² -K/W		0						
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE																
25	Air Quantity, Total		55000		kg/h		Altitude		0		m						
26	Air Quantity/Fan		2,754		m ³ /s		Temperature In		45		°C						
27	Static Pressure		162		Pa		Temperature Out		46,97		°C						
28	Face Velocity		4,62		m/s		Mass velocity		5,13		kg/s/m ²		Design Ambient		0 °C		
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION																
30	Design/Vac./Test Pres		3,44738 /		/		bar		Design temperature		426,67		°C				
31	TUBE BUNDLE			Header				Tube									
32	Size		m		4,8672		Type		Box		Material		Carbon Steel				
33	Number/bay		1				Material		Carbon Steel		Specifications						
34	Tube Rows		3				Passes		3		OD		25,4		Min Thk. 1,65 mm		
35	Arrangement						Plug Mat.				No./Bun		36		Lng 4,2672 m		
36	Bundles		1		par		Gasket Mat.				Pitch		60 / 51,96		30 Degrees		
37	Bays		1		par		Corr. Allow.		mm		FIN						
38	Bundle frame						Inlet nozzle (1)		66,65		mm		Type		G-finned		
39	MISCELLANEOUS							Outlet nozzle (1)		42,85		mm		Material		Aluminum 1060	
40	Struct. Mount.						Special Nozzles				OD		57,15		Tks 0,28 mm		
41	Surf.Prepare						Rating		Program		No. 433 #/m		Design Temp		°C		
42	Louvers						TI		PI		Code		\SME Code Sec VIII Div 1				
43	Vibration Switches						Chem Cleaning				Stamp		Yes		Specs		
44	MECHANICAL EQUIPMENT																
45	Fan,Mfr., Model			Driver, Type				Program				Speed Reducer, Type					
46	No./Bay		5		RPM		Mfr.				Mfr.&Model						
47	Dia.		0,4572m		Blade(s)		No./Bay				No./Bay						
48	Pitch		Angle				RPM				Rating				hp		
49	Blade(s)		Hub				Enclosure				Ratio						
50	hp/Fan		0,842		kW		MinAmb		V/Phase/Hz		/ /		Support				
51	Control Action on Air Failure-						Louvers										
52	Degree Control of Outlet Process Temperature																
53	Recirculation							Steam Coil							No		
54	Plot Area		m ²		Drawing No.		Wt.Bundle		1090,4		Wt. Unit		1090,4		kg		
55	Notes:																
56																	
57																	
58																	

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers media AC-102.EDR

Printed: 21/08/2022 at 10:23:05

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:																	
2	Location:																	
3	Service of Unit:					Our Reference:												
4	Item No.:					Your Reference:												
5	Date:			Rev No.:			Job No.:											
6	Size & Type		4,8672 / 0,9024		m		Type		Forced		Number of Bays		1					
7	Surf/Unit-Finned Tube		266,5		m ²		Bare area/bundle		11,3		m ²		Ratio (Total/Bare)		23,49			
8	Heat exchanged		77,9		kW		MTD, Eff		13,63		°C							
9	Transfer Rate-Finned		33		Bare, Service		503,3		Clean		786,8		W/(m ² -K)					
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE																	
11	Fluid Circulated				Amoníac				In		/		Out					
12	Total Fluid Entering		kg/h		160		Density, Liq		kg/m ³		/		552,83					
13							Density, Vap		kg/m ³		8,31		/					
14	Temperature		°C		315,9 / 54,98		Specific Heat, Liq		kJ/(kg-K)		/		5,684					
15	Liquid		kg/s		0 / 0,0446		Specific Heat, Vap		kJ/(kg-K)		2,725		/					
16	Vapor		kg/s		0,0446 / 0		Therm. Cond, Liq		W/(m-K)		/		0,4097					
17	Noncondensable		kg/s		0 / 0		Therm. Cond, Vap		W/(m-K)		0,0642		/					
18	Steam		kg/s		/		Freeze Point		°C									
19	Water		/				Bubble / Dew point		°C		55,68		/		55,69			
20	Molecular wt, Vap		17,03056		/ 17,03056		Latent heat		kJ/kg									
21	Molecular wt, NC						Inlet pressure (abs)		kPa		2340							
22	Viscosity, Liq		mPa-s		/ 0,0984		Pres Drop, Allow/Calc		bar		0,02		/		0,0113			
23	Viscosity, Vap		mPa-s		0,0209 /		Fouling resistance		m ² -K/W		0							
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE																	
25	Air Quantity, Total				55000				kg/h		Altitude		0		m			
26	Air Quantity/Fan				2,754				m ³ /s		Temperature In		45		°C			
27	Static Pressure				164				Pa		Temperature Out		50,08		°C			
28	Face Velocity		4,64		m/s		Mass velocity		5,15		kg/s/m ²		Design Ambient		0 °C			
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION																	
30	Design/Vac./Test Pres				31,02641 /				bar		Design temperature		426,67		°C			
31	TUBE BUNDLE				Header				Tube									
32	Size		m		4,8672		Type		Box		Material		Carbon Steel					
33	Number/bay		1				Material		Carbon Steel		Specifications							
34	Tube Rows		3				Passes		8		OD		25,4		Min Thk. 1,65 mm			
35	Arrangement						Plug Mat.				No./Bun		36		Lng 4,2672 m			
36	Bundles		1		par		Gasket Mat.				Pitch		60 / 51,96		30 Degrees			
37	Bays		1		par		Corr. Allow.		mm		FIN							
38	Bundle frame						Inlet nozzle (1)		42,85		mm		Type		G-finned			
39	MISCELLANEOUS								Outlet nozzle (1)		15,8		mm		Material		Aluminum 1060	
40	Struct. Mount.						Special Nozzles				OD		57,15		Tks 0,28 mm			
41	Surf.Prepare						Rating		Program		No. 433		#/m		Design Temp °C			
42	Louvers						TI		PI		Code		\SME Code Sec VIII Div 1					
43	Vibration Switches						Chem Cleaning				Stamp		Yes		Specs			
44	MECHANICAL EQUIPMENT																	
45	Fan,Mfr., Model				Driver, Type				Program				Speed Reducer, Type					
46	No./Bay		5		RPM		Mfr.				Mfr.&Model							
47	Dia.		0,4572m		Blade(s)		No./Bay				No./Bay							
48	Pitch		Angle				RPM				Rating				hp			
49	Blade(s)		Hub				Enclosure				Ratio							
50	hp/Fan		0,852		kW		MinAmb		V/Phase/Hz		/ /		Support					
51	Control Action on Air Failure-								Louvers									
52	Degree Control of Outlet Process Temperature																	
53	Recirculation								Steam Coil				No					
54	Plot Area		m ²		Drawing No.		Wt.Bundle		1604		Wt. Unit		1604		kg			
55	Notes:																	
56																		
57																		
58																		

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers baja AC-100.EDR

Printed: 25/08/2022 at 16:50:42

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:																			
2	Location:																			
3	Service of Unit:					Our Reference:														
4	Item No.: AC-300					Your Reference:														
5	Date:		Rev No.:			Job No.:														
6	Size & Type		3,648 / 0,9024		m		Type		Forced		Number of Bays		1							
7	Surf/Unit-Finned Tube		185,1		m ²		Bare area/bundle		7,9		m ²		Ratio (Total/Bare)		23,49					
8	Heat exchanged		12,5		kW		MTD, Eff		77,08		°C									
9	Transfer Rate-Finned		0,9		Bare, Service		20,5		Clean		20,7		W/(m ² -K)							
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE																			
11	Fluid Circulated					Amoníac					In		/		Out					
12	Total Fluid Entering		kg/h		67		Density, Liq		kg/m ³		/									
13			In		/		Out		Density, Vap		kg/m ³		0,1		/		0,2			
14	Temperature		°C		306,6		/		54,69		Specific Heat, Liq		kJ/(kg-K)		/					
15	Liquid		kg/s		0		/		0		Specific Heat, Vap		kJ/(kg-K)		2,71		/		2,636	
16	Vapor		kg/s		0,0186		/		0,0186		Therm. Cond, Liq		W/(m-K)		/					
17	Noncondensable		kg/s		0		/		0		Therm. Cond, Vap		W/(m-K)		0,0628		/		0,0286	
18	Steam		kg/s		/		/		/		Freeze Point		°C							
19	Water		/		/		/		/		Bubble / Dew point		°C		-59,62		/		-59,62	
20	Molecular wt, Vap		17,03056		/		17,03056		Latent heat		kJ/kg									
21	Molecular wt, NC		/		/		/		Inlet pressure (abs)		kPa		27,62							
22	Viscosity, Liq		mPa-s		/		/		Pres Drop, Allow/Calc		bar		0,02		/		0,00702			
23	Viscosity, Vap		mPa-s		0,0206		/		0,0116		Fouling resistance		m ² -K/W		0					
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE																			
25	Air Quantity, Total		15000		kg/h		Altitude		0		m									
26	Air Quantity/Fan		0,939		m ³ /s		Temperature In		45		°C									
27	Static Pressure		33		Pa		Temperature Out		47,97		°C									
28	Face Velocity		1,82		m/s		Mass velocity		2,02		kg/s/m ²		Design Ambient		0		°C			
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION																			
30	Design/Vac./Test Pres		3,44738		/		/		bar		Design temperature		426,67		°C					
31	TUBE BUNDLE				Header				Tube											
32	Size		m		3,648		Type		Box		Material		Carbon Steel							
33	Number/bay		1		Material		Carbon Steel				Specifications									
34	Tube Rows		3		Passes		2		OD		25,4		Min Thk.		1,65		mm			
35	Arrangement		Plug Mat.		No./Bun		36		Lng		3,048		m							
36	Bundles		1		par		Gasket Mat.		Pitch		60		/		51,96		30		Degrees	
37	Bays		1		par		Corr. Allow.		mm		FIN									
38	Bundle frame		Inlet nozzle (1)		85,45		mm		Type		G-finned									
39	MISCELLANEOUS				Outlet nozzle (1)		53,98		mm		Material		Aluminum 1060							
40	Struct. Mount.		Special Nozzles		OD		57,15		Tks		0,28		mm							
41	Surf.Prepare		Rating		Program		No. 433		#/m		Design Temp		°C							
42	Louvers		TI		PI		Code		\SME Code Sec VIII Div 1											
43	Vibration Switches		Chem Cleaning		Stamp		Yes		Specs											
44	MECHANICAL EQUIPMENT																			
45	Fan,Mfr., Model				Driver, Type				Program				Speed Reducer, Type							
46	No./Bay		4		RPM		Mfr.		Mfr.&Model											
47	Dia.		0,4572m		Blade(s)		No./Bay		No./Bay											
48	Pitch		Angle		RPM		Rating		hp											
49	Blade(s)		Hub		Enclosure		Ratio													
50	hp/Fan		0,058		kW		MinAmb		V/Phase/Hz		/		/		Support					
51	Control Action on Air Failure-				Louvers															
52	Degree Control of Outlet Process Temperature																			
53	Recirculation				Steam Coil				No											
54	Plot Area		m ²		Drawing No.		Wt.Bundle		940		Wt. Unit		940		kg					
55	Notes:																			
56																				
57																				
58																				

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers baja AC-101.EDR

Printed: 25/08/2022 at 16:54:07

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:																
2	Location:																
3	Service of Unit:					Our Reference:											
4	Item No.: AC-301					Your Reference:											
5	Date:		Rev No.:			Job No.:											
6	Size & Type		3,0384 / 0,9024		m		Type		Forced		Number of Bays		1				
7	Surf/Unit-Finned Tube		143,1		m ²		Bare area/bundle		6,1		m ²		Ratio (Total/Bare)		23,49		
8	Heat exchanged		32,4		kW		MTD, Eff		12,31		°C						
9	Transfer Rate-Finned		24,6		Bare, Service		432,3		Clean		584,7		W/(m ² -K)				
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE																
11	Fluid Circulated					Amoníac					In / Out						
12	Total Fluid Entering		kg/h		67		Density, Liq		kg/m ³		/		552,78				
13			In / Out				Density, Vap		kg/m ³		8,34		/				
14	Temperature		°C		313,8 / 55,01		Specific Heat, Liq		kJ/(kg-K)		/		5,685				
15	Liquid		kg/s		0 / 0,0186		Specific Heat, Vap		kJ/(kg-K)		2,722		/				
16	Vapor		kg/s		0,0186 / 0		Therm. Cond, Liq		W/(m-K)		/		0,4096				
17	Noncondensable		kg/s		0 / 0		Therm. Cond, Vap		W/(m-K)		0,0639		/				
18	Steam		kg/s		/		Freeze Point		°C								
19	Water		/				Bubble / Dew point		°C		55,69		/		55,69		
20	Molecular wt, Vap		17,03056		/ 17,03056		Latent heat		kJ/kg								
21	Molecular wt, NC						Inlet pressure (abs)		kPa		2340						
22	Viscosity, Liq		mPa-s		/ 0,0984		Pres Drop, Allow/Calc		bar		0,02		/		0,00271		
23	Viscosity, Vap		mPa-s		0,0208 /		Fouling resistance		m ² -K/W		0						
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE																
25	Air Quantity, Total		15000		kg/h		Altitude		0		m						
26	Air Quantity/Fan		1,252		m ³ /s		Temperature In		45		°C						
27	Static Pressure		50		Pa		Temperature Out		52,74		°C						
28	Face Velocity		2,36		m/s		Mass velocity		2,62		kg/s/m ²		Design Ambient		0 °C		
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION																
30	Design/Vac./Test Pres					31,02641 /		/		bar		Design temperature		426,67		°C	
31	TUBE BUNDLE			Header				Tube									
32	Size		m		3,0384		Type		Box		Material		Carbon Steel				
33	Number/bay		1				Material		Carbon Steel		Specifications						
34	Tube Rows		3				Passes		9		OD		25,4		Min Thk. 1,65 mm		
35	Arrangement						Plug Mat.				No./Bun		36		Lng 2,4384 m		
36	Bundles		1		par		Gasket Mat.				Pitch		60 / 51,96		30 Degrees		
37	Bays		1		par		Corr. Allow.		mm		FIN						
38	Bundle frame						Inlet nozzle (1)		22,28 mm		Type		G-finned				
39	MISCELLANEOUS							Outlet nozzle (1)		15,8 mm		Material		Aluminum 1060			
40	Struct. Mount.						Special Nozzles				OD		57,15		Tks 0,28 mm		
41	Surf.Prepare						Rating		Program		No. 433 #/m		Design Temp		°C		
42	Louvers						TI		PI		Code		\SME Code Sec VIII Div 1				
43	Vibration Switches						Chem Cleaning				Stamp		Yes		Specs		
44	MECHANICAL EQUIPMENT																
45	Fan,Mfr., Model			Driver, Type				Program				Speed Reducer, Type					
46	No./Bay		3		RPM		Mfr.				Mfr.&Model						
47	Dia.		0,4572m		Blade(s)		No./Bay				No./Bay						
48	Pitch		Angle				RPM				Rating				hp		
49	Blade(s)		Hub				Enclosure				Ratio						
50	hp/Fan		0,118 kW		MinAmb		V/Phase/Hz		/ /		Support						
51	Control Action on Air Failure-					Louvers											
52	Degree Control of Outlet Process Temperature																
53	Recirculation							Steam Coil							No		
54	Plot Area		m ²		Drawing No.		Wt.Bundle		1372,1		Wt. Unit		1372,1		kg		
55	Notes:																
56																	
57																	
58																	

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers baja AC-102.EDR

Printed: 25/08/2022 at 16:57:41

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:																	
2	Location:																	
3	Service of Unit:					Our Reference:												
4	Item No.: AC-302					Your Reference:												
5	Date:		Rev No.:			Job No.:												
6	Size & Type		3,0384 / 0,9024		m		Type		Forced		Number of Bays		1					
7	Surf/Unit-Finned Tube		143,1		m ²		Bare area/bundle		6,1		m ²		Ratio (Total/Bare)		23,49			
8	Heat exchanged		32,5		kW		MTD, Eff		12,35		°C							
9	Transfer Rate-Finned		24,6		Bare, Service		432,5		Clean		584,1		W/(m ² -K)					
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE																	
11	Fluid Circulated					Amoníac					In		/		Out			
12	Total Fluid Entering		kg/h		67		Density, Liq		kg/m ³		/		552,76					
13			In		/		Out		Density, Vap		kg/m ³		8,31		/			
14	Temperature		°C		315,9 / 55,02		Specific Heat, Liq		kJ/(kg-K)		/		5,686					
15	Liquid		kg/s		0 / 0,0186		Specific Heat, Vap		kJ/(kg-K)		2,725		/					
16	Vapor		kg/s		0,0186 / 0		Therm. Cond, Liq		W/(m-K)		/		0,4096					
17	Noncondensable		kg/s		0 / 0		Therm. Cond, Vap		W/(m-K)		0,0642		/					
18	Steam		kg/s		/		Freeze Point		°C									
19	Water		/				Bubble / Dew point		°C		55,69		/		55,69			
20	Molecular wt, Vap		17,03056		/ 17,03056		Latent heat		kJ/kg									
21	Molecular wt, NC						Inlet pressure (abs)		kPa		2340							
22	Viscosity, Liq		mPa-s		/ 0,0984		Pres Drop, Allow/Calc		bar		0,02		/		0,00271			
23	Viscosity, Vap		mPa-s		0,0209 /		Fouling resistance		m ² -K/W		0							
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE																	
25	Air Quantity, Total		15000		kg/h		Altitude		0		m							
26	Air Quantity/Fan		1,252		m ³ /s		Temperature In		45		°C							
27	Static Pressure		50		Pa		Temperature Out		52,77		°C							
28	Face Velocity		2,36		m/s		Mass velocity		2,62		kg/s/m ²		Design Ambient		0 °C			
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION																	
30	Design/Vac./Test Pres					31,02641 /		/		bar		Design temperature		426,67		°C		
31	TUBE BUNDLE				Header				Tube									
32	Size		m		3,0384		Type		Box		Material		Carbon Steel					
33	Number/bay		1				Material		Carbon Steel		Specifications							
34	Tube Rows		3				Passes		9		OD		25,4		Min Thk. 1,65 mm			
35	Arrangement						Plug Mat.				No./Bun		36		Lng 2,4384 m			
36	Bundles		1		par		Gasket Mat.				Pitch		60 / 51,96		30 Degrees			
37	Bays		1		par		Corr. Allow.		mm		FIN							
38	Bundle frame						Inlet nozzle (1)		22,28		mm		Type		G-finned			
39	MISCELLANEOUS						Outlet nozzle (1)		15,8		mm		Material		Aluminum 1060			
40	Struct. Mount.						Special Nozzles				OD		57,15		Tks 0,28 mm			
41	Surf.Prepare						Rating		Program		No. 433		#/m		Design Temp °C			
42	Louvers						TI		PI		Code		\SME Code Sec VIII Div 1					
43	Vibration Switches						Chem Cleaning				Stamp		Yes		Specs			
44	MECHANICAL EQUIPMENT																	
45	Fan,Mfr., Model				Driver, Type				Program				Speed Reducer, Type					
46	No./Bay		3		RPM		Mfr.				Mfr.&Model							
47	Dia.		0,4572m		Blade(s)		No./Bay				No./Bay							
48	Pitch				Angle		RPM				Rating				hp			
49	Blade(s)				Hub		Enclosure				Ratio							
50	hp/Fan		0,118		kW		MinAmb		V/Phase/Hz		/ /		Support					
51	Control Action on Air Failure-								Louvers									
52	Degree Control of Outlet Process Temperature																	
53	Recirculation								Steam Coil				No					
54	Plot Area		m ²		Drawing No.		Wt.Bundle		1372,1		Wt. Unit		1372,1		kg			
55	Notes:																	
56																		
57																		
58																		

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers alta AC-100.EDR

Printed: 20/08/2022 at 21:50:14

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:										
2	Location:										
3	Service of Unit:					Our Reference:					
4	Item No.:					Your Reference:					
5	Date:	Rev No.:			Job No.:						
6	Size & Type	9,744	/	1,2624	m	Type	Forced	Number of Bays	1		
7	Surf/Unit-Finned Tube	894,8			m ²	Bare area/bundle	38,1	m ²	Ratio (Total/Bare)	23,49	
8	Heat exchanged	101,2			kW	MTD, Eff	80,7 °C				
9	Transfer Rate-Finned	2,2	Bare, Service			32,9	Clean	51	W/(m ² -K)		
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE										
11	Fluid Circulated	Amoníac					In	/	Out		
12	Total Fluid Entering	kg/h	535			Density, Liq	kg/m ³	/			
13		In	/	Out			Density, Vap	kg/m ³	0,91	/	1,89
14	Temperature	°C	313,5 / 54,96			Specific Heat, Liq	kJ/(kg-K)		/		
15	Liquid	kg/s	0 / 0			Specific Heat, Vap	kJ/(kg-K)		2,72	/	2,634
16	Vapor	kg/s	0,1487 / 0,1487			Therm. Cond, Liq	W/(m-K)		/		
17	Noncondensable	kg/s	0 / 0			Therm. Cond, Vap	W/(m-K)		0,0638	/	0,0286
18	Steam	kg/s	/			Freeze Point	°C		/		
19	Water	/			Bubble / Dew point	°C	-14,04		/ -14,04		
20	Molecular wt, Vap	17,03056 / 17,03056			Latent heat	kJ/kg		/			
21	Molecular wt, NC	/			Inlet pressure (abs)	kPa		254,2			
22	Viscosity, Liq	mPa-s	/			Pres Drop, Allow/Calc	bar		0,02	/	0,00576
23	Viscosity, Vap	mPa-s	0,0208 / 0,0117			Fouling resistance	m ² -K/W		0		
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE										
25	Air Quantity, Total	200000			kg/h	Altitude	0		m		
26	Air Quantity/Fan	6,258			m ³ /s	Temperature In	45		°C		
27	Static Pressure	191			Pa	Temperature Out	46,81		°C		
28	Face Velocity	5,09	m/s	Mass velocity	5,65	kg/s/m ²	Design Ambient	0		°C	
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION										
30	Design/Vac./Test Pres	3,44738	/	/			bar	Design temperature	426,67 °C		
31	TUBE BUNDLE			Header			Tube				
32	Size	m	9,744		Type	Box		Material	Carbon Steel		
33	Number/bay	1			Material	Carbon Steel		Specifications			
34	Tube Rows	3			Passes	1		OD	25,4	Min Thk. 1,65 mm	
35	Arrangement	/			Plug Mat.	/		No./Bun	54	Lng 9,144 m	
36	Bundles	1	par		Gasket Mat.	/		Pitch	60 / 51,96	30 Degrees	
37	Bays	1	par		Corr. Allow.	mm		FIN			
38	Bundle frame	/			Inlet nozzle (1)	122,25 mm		Type	G-finned		
39	MISCELLANEOUS			/			Outlet nozzle (1)	85,45 mm		Material Aluminum 1060	
40	Struct. Mount.	/			Special Nozzles	/		OD	57,15	Tks 0,28 mm	
41	Surf.Prepare	/			Rating Program	/		No. 433 #/m	Design Temp °C		
42	Louvers	/			TI PI	/		Code	\SME Code Sec VIII Div 1		
43	Vibration Switches	/			Chem Cleaning	/		Stamp	Yes Specs		
44	MECHANICAL EQUIPMENT										
45	Fan,Mfr., Model	/			Driver, Type Program	/		Speed Reducer, Type	/		
46	No./Bay	8	RPM		Mfr.	/		Mfr.&Model	/		
47	Dia.	0,762m	Blade(s)		No./Bay	/		No./Bay	/		
48	Pitch	/		Angle	RPM	/		Rating	hp		
49	Blade(s)	/		Hub	Enclosure	/		Ratio	/		
50	hp/Fan	2,252	kW	MinAmb	V/Phase/Hz	/ /		Support	/		
51	Control Action on Air Failure-	/			/		Louvers				
52	Degree Control of Outlet Process Temperature										
53	Recirculation	/			Steam Coil	/		No			
54	Plot Area	m ²	/		Drawing No.	Wt.Bundle	2167	Wt. Unit	2167	kg	
55	Notes:										
56											
57											
58											

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers alta AC-101.EDR

Printed: 20/08/2022 at 21:52:05

API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:													
2	Location:													
3	Service of Unit:					Our Reference:								
4	Item No.:					Your Reference:								
5	Date:	Rev No.:			Job No.:									
6	Size & Type	9,744	/	1,2624	m	Type	Forced	Number of Bays	1					
7	Surf/Unit-Finned Tube	894,8			m ²	Bare area/bundle	38,1	m ²	Ratio (Total/Bare)	23,49				
8	Heat exchanged	101,3			kW	MTD, Eff	80,79			°C				
9	Transfer Rate-Finned	2,2	Bare, Service			32,9	Clean	51	W/(m ² -K)					
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE													
11	Fluid Circulated	Hidrogen					In	/	Out					
12	Total Fluid Entering	kg/h	535			Density, Liq	kg/m ³	/						
13		In	/	Out			Density, Vap	kg/m ³	0,91	/	1,89			
14	Temperature	°C	313,8 / 54,97			Specific Heat, Liq	kJ/(kg-K)			/				
15	Liquid	kg/s	0 / 0			Specific Heat, Vap	kJ/(kg-K)			2,72 / 2,634				
16	Vapor	kg/s	0,1487 / 0,1487			Therm. Cond, Liq	W/(m-K)			/				
17	Noncondensable	kg/s	0 / 0			Therm. Cond, Vap	W/(m-K)			0,0639 / 0,0286				
18	Steam	kg/s	/			Freeze Point	°C			/				
19	Water	/			Bubble / Dew point	°C			-14,04 / -14,04					
20	Molecular wt, Vap	17,03056 / 17,03056			Latent heat	kJ/kg			/					
21	Molecular wt, NC	/			Inlet pressure (abs)	kPa			254,2					
22	Viscosity, Liq	mPa-s /			Pres Drop, Allow/Calc	bar			0,02 / 0,00576					
23	Viscosity, Vap	mPa-s 0,0208 / 0,0117			Fouling resistance	m ² -K/W			0					
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE													
25	Air Quantity, Total	200000			kg/h	Altitude	0			m				
26	Air Quantity/Fan	6,258			m ³ /s	Temperature In	45			°C				
27	Static Pressure	191			Pa	Temperature Out	46,81			°C				
28	Face Velocity	5,09	m/s	Mass velocity	5,65	kg/s/m ²	Design Ambient	0			°C			
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION													
30	Design/Vac./Test Pres	3,44738	/	/			bar	Design temperature	426,67		°C			
31	TUBE BUNDLE			Header			Tube							
32	Size	m	9,744		Type	Box		Material	Carbon Steel					
33	Number/bay	1			Material	Carbon Steel			Specifications					
34	Tube Rows	3			Passes	1			OD	25,4	Min Thk.	1,65	mm	
35	Arrangement	/			Plug Mat.	/			No./Bun	54	Lng	9,144	m	
36	Bundles	1	par		Gasket Mat.	/			Pitch	60	/	51,96	30	Degrees
37	Bays	1	par		Corr. Allow.	mm			FIN					
38	Bundle frame	/			Inlet nozzle (1)	122,25		mm	Type	G-finned				
39	MISCELLANEOUS			/			Outlet nozzle (1)	85,45		mm	Material	Aluminum 1060		
40	Struct. Mount.	/			Special Nozzles	/			OD	57,15	Tks	0,28	mm	
41	Surf.Prepare	/			Rating	Program		No.	433	#/m	Design Temp	°C		
42	Louvers	/			TI	PI		Code	\SME Code Sec VIII Div 1					
43	Vibration Switches	/			Chem Cleaning	/			Stamp	Yes	Specs			
44	MECHANICAL EQUIPMENT													
45	Fan,Mfr., Model	/			Driver, Type	Program		Speed Reducer, Type	/					
46	No./Bay	8	RPM		Mfr.	/			Mfr.&Model	/				
47	Dia.	0,762m	Blade(s)		No./Bay	/			No./Bay	/				
48	Pitch	/			Angle	RPM		Rating	hp					
49	Blade(s)	/			Hub	Enclosure		Ratio	/					
50	hp/Fan	2,252	kW	MinAmb	V/Phase/Hz	/ /		Support	/					
51	Control Action on Air Failure-	/			Louvers									
52	Degree Control of Outlet Process Temperature													
53	Recirculation	/			Steam Coil	No								
54	Plot Area	m ²	/		Drawing No.	Wt.Bundle	2167	Wt. Unit	2167	kg				
55	Notes:													
56														
57														
58														

Aspen Exchanger Design and Rating Air Cooled V11

File: G:\Mi unidad\2021-2022\TFM\...\Air coolers alta AC-102.EDR

Printed: 20/08/2022 at 21:53:59

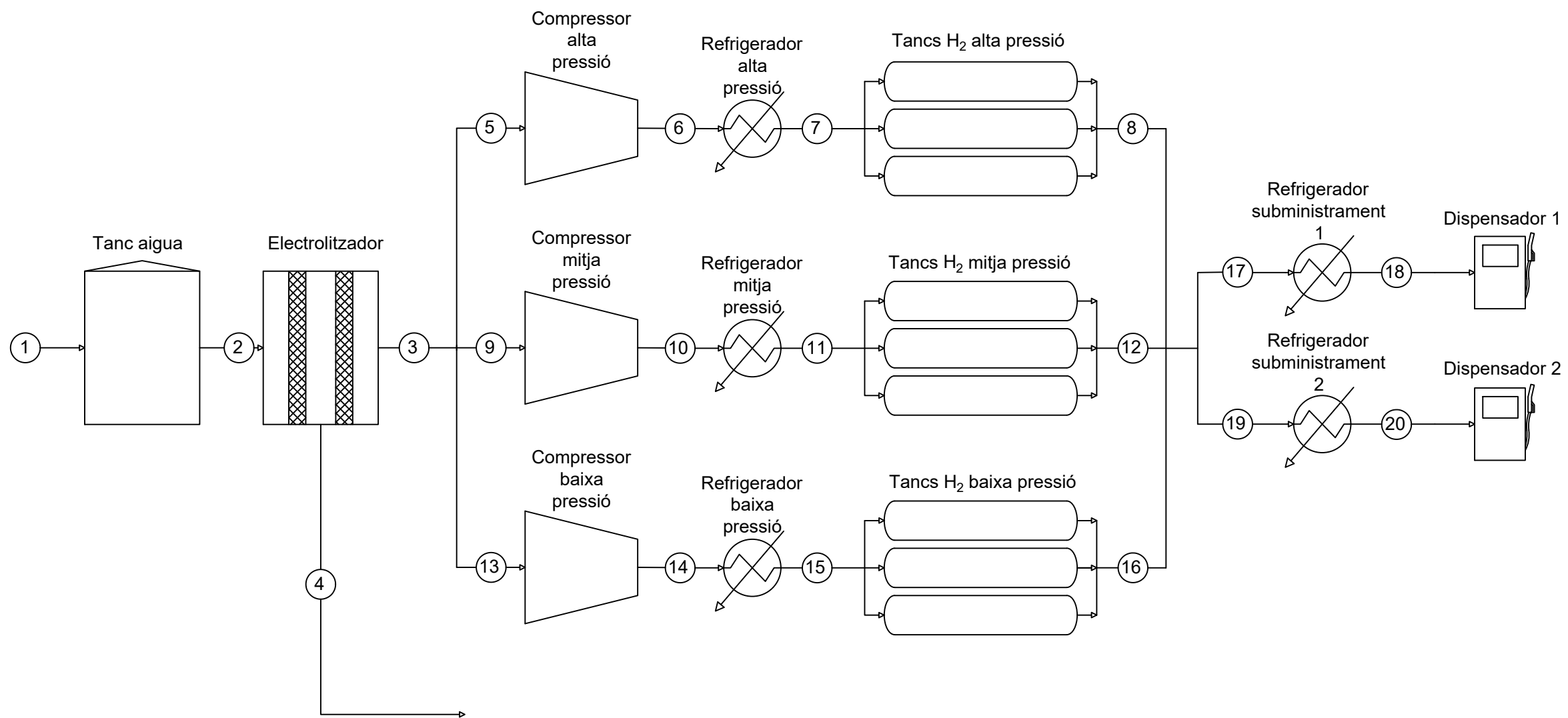
API Sheet

Air-Cooled Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:													
2	Location:													
3	Service of Unit:					Our Reference:								
4	Item No.:					Your Reference:								
5	Date:	Rev No.:			Job No.:									
6	Size & Type	9,744	/	1,2624	m	Type	Forced	Number of Bays	1					
7	Surf/Unit-Finned Tube	894,8			m ²	Bare area/bundle	38,1	m ²	Ratio (Total/Bare)	23,49				
8	Heat exchanged	102,2			kW	MTD, Eff	81,22			°C				
9	Transfer Rate-Finned	2,2	Bare, Service			33	Clean	51	W/(m ² -K)					
10	PERFORMANCE DATA - TUBE SIDE													
11	Fluid Circulated	Hidrogen					In	/	Out					
12	Total Fluid Entering	kg/h	535			Density, Liq	kg/m ³	/						
13		In	/	Out			Density, Vap	kg/m ³	0,9	/	1,89			
14	Temperature	°C	315,9 / 54,93			Specific Heat, Liq	kJ/(kg-K)			/				
15	Liquid	kg/s	0 / 0			Specific Heat, Vap	kJ/(kg-K)			2,723 / 2,635				
16	Vapor	kg/s	0,1487 / 0,1487			Therm. Cond, Liq	W/(m-K)			/				
17	Noncondensable	kg/s	0 / 0			Therm. Cond, Vap	W/(m-K)			0,0642 / 0,0286				
18	Steam	kg/s	/			Freeze Point	°C							
19	Water	/			Bubble / Dew point	°C	-14,05 / -14,05							
20	Molecular wt, Vap	17,03056 / 17,03056			Latent heat	kJ/kg								
21	Molecular wt, NC	/			Inlet pressure (abs)	kPa			254,2					
22	Viscosity, Liq	mPa-s	/			Pres Drop, Allow/Calc	bar			0,02 / 0,00577				
23	Viscosity, Vap	mPa-s	0,0209 / 0,0117			Fouling resistance	m ² -K/W			0				
24	PERFORMANCE DATA - AIR SIDE													
25	Air Quantity, Total	200000			kg/h	Altitude	0			m				
26	Air Quantity/Fan	6,258			m ³ /s	Temperature In	45			°C				
27	Static Pressure	191			Pa	Temperature Out	46,82			°C				
28	Face Velocity	5,09	m/s	Mass velocity	5,65	kg/s/m ²	Design Ambient	0			°C			
29	DESIGN-MATERIALS-CONSTRUCTION													
30	Design/Vac./Test Pres	3,44738	/	/			bar	Design temperature	426,67		°C			
31	TUBE BUNDLE			Header			Tube							
32	Size	m	9,744		Type	Box		Material	Carbon Steel					
33	Number/bay	1			Material	Carbon Steel			Specifications					
34	Tube Rows	3			Passes	1			OD	25,4	Min Thk.	1,65	mm	
35	Arrangement	/			Plug Mat.	/			No./Bun	54	Lng	9,144	m	
36	Bundles	1	par		Gasket Mat.	/			Pitch	60	/	51,96	30	Degrees
37	Bays	1	par		Corr. Allow.	mm			FIN					
38	Bundle frame	/			Inlet nozzle (1)	122,25		mm	Type	G-finned				
39	MISCELLANEOUS			/			Outlet nozzle (1)	85,45		mm	Material	Aluminum 1060		
40	Struct. Mount.	/			Special Nozzles	/			OD	57,15	Tks	0,28	mm	
41	Surf.Prepare	/			Rating	Program		/		No.	433	#/m	Design Temp	°C
42	Louvers	/			TI	PI		/		Code	\SME Code Sec VIII Div 1			
43	Vibration Switches	/			Chem Cleaning	/			Stamp	Yes	Specs			
44	MECHANICAL EQUIPMENT													
45	Fan,Mfr., Model	/			Driver, Type	Program		/			Speed Reducer, Type	/		
46	No./Bay	8	RPM		Mfr.	/			Mfr.&Model			/		
47	Dia.	0,762m	Blade(s)		No./Bay	/			No./Bay			/		
48	Pitch	/		Angle	RPM	/			Rating			hp		
49	Blade(s)	/		Hub	Enclosure	/			Ratio			/		
50	hp/Fan	2,252	kW	MinAmb	V/Phase/Hz	/ /		/			Support		/	
51	Control Action on Air Failure-	/			/			/			Louvers		/	
52	Degree Control of Outlet Process Temperature										/		/	
53	Recirculation	/			/			Steam Coil	No			/		
54	Plot Area	m ²	/		Drawing No.	/		Wt.Bundle	2167	Wt. Unit	2167	kg		
55	Notes:										/		/	
56	/										/		/	
57	/										/		/	
58	/										/		/	

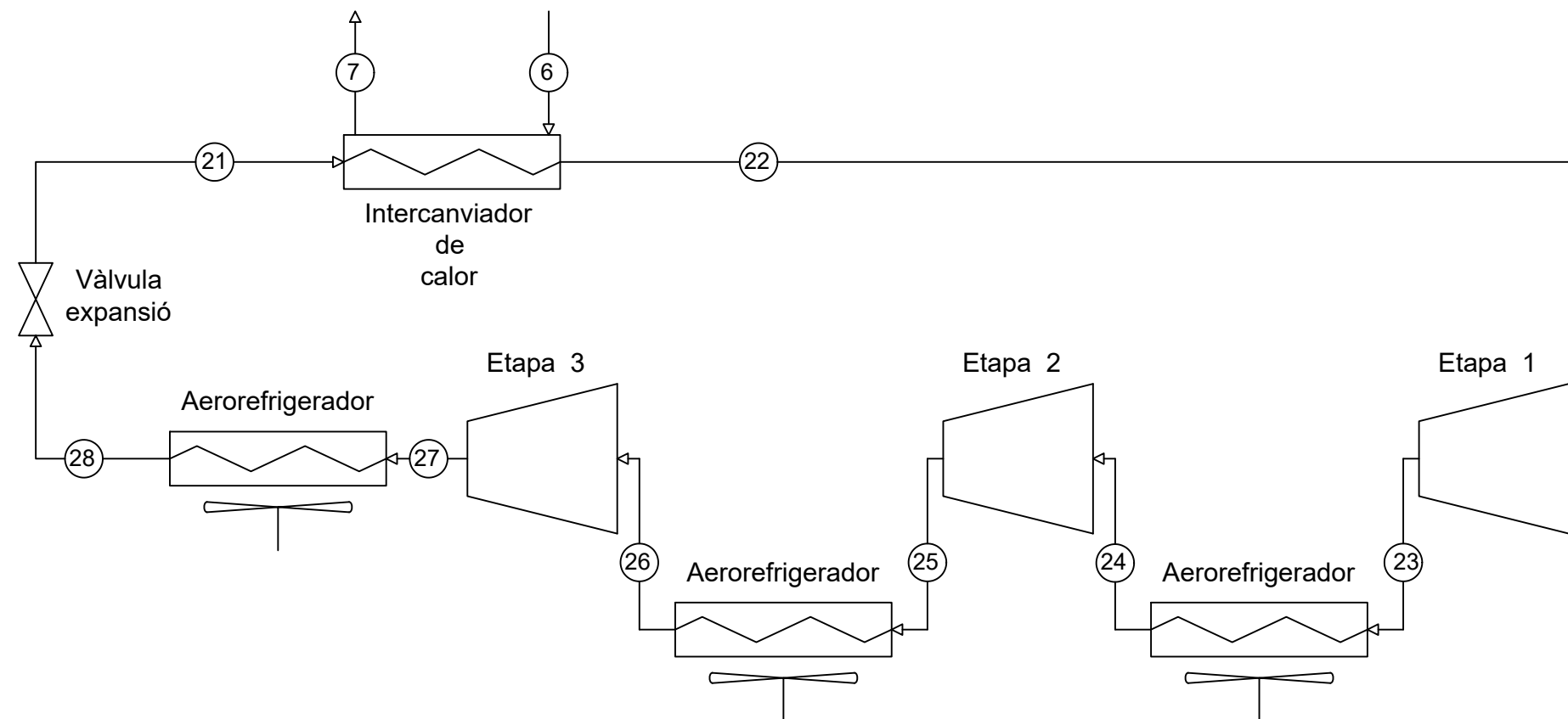
9 Annex plànols

1. PFD hidrogenera.
2. PFD refrigerador alta pressió.
3. PFD refrigerador mitja pressió.
4. PFD refrigerador baixa pressió.
5. PFD refrigerador subministrament 1 i 2.

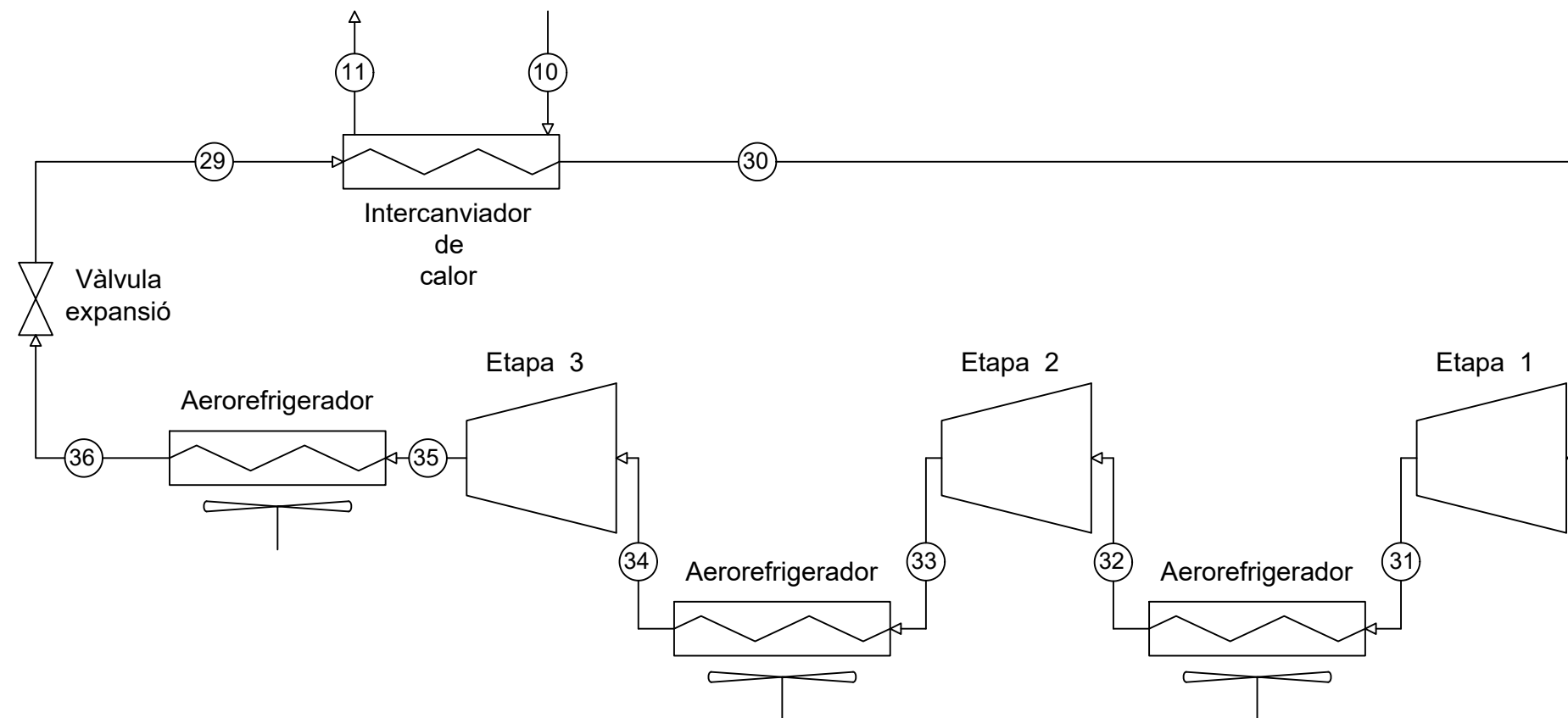


	*	**	**	**	**	**	**	***	**	**	**	***	**	**	**	**	***	***	***	***
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fracció de vapor	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Temperatura [C]	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	55,00	-83,20	55,00	35,00	55,00	-62,01	55,00	35,00	55,00	-48,56	55,00	55,00	-51,23	55,00	-51,23
Presió [bar]	3,00	3,00	35,00	35,00	35,00	860,00	860,00	860,00	35,00	430,00	430,00	430,00	35,00	160,00	160,00	160,00	860,00	860,00	860,00	860,00
Cabal molar [kmol/h]	49,25	147,20	131,10	65,55	53,59	53,59	53,59	83,03	52,13	52,13	52,13	79,01	25,27	25,27	25,27	38,25	99,21	99,21	99,21	99,21
Cabal màssic [kg/h]	887,33	2.652,02	264,37	2.098,00	108,10	108,10	108,10	163,68	105,20	105,20	105,20	159,28	50,98	50,98	50,98	77,12	200,00	200,00	200,00	200,00
Fracció molar (aigua)	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar (amoníac)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fracció molar (hidrogen)	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fracció molar (oxigen)	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

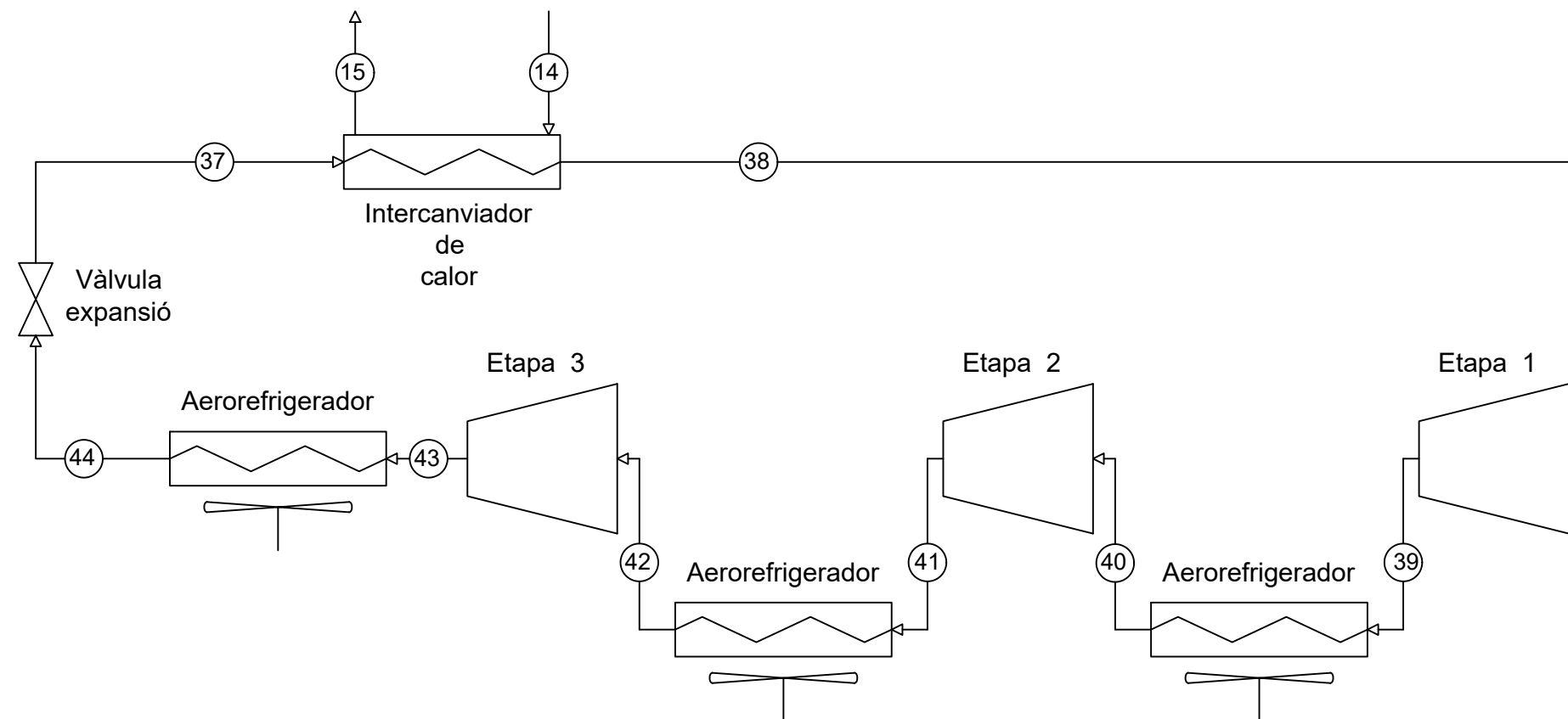
* En operació les 24 h del dia.
 ** En operació de 10:00 a 17:00 h.
 *** En operació les 24 h del dia sota demanda dels clients, condicions d'operació per una recàrrega de 50 kg.



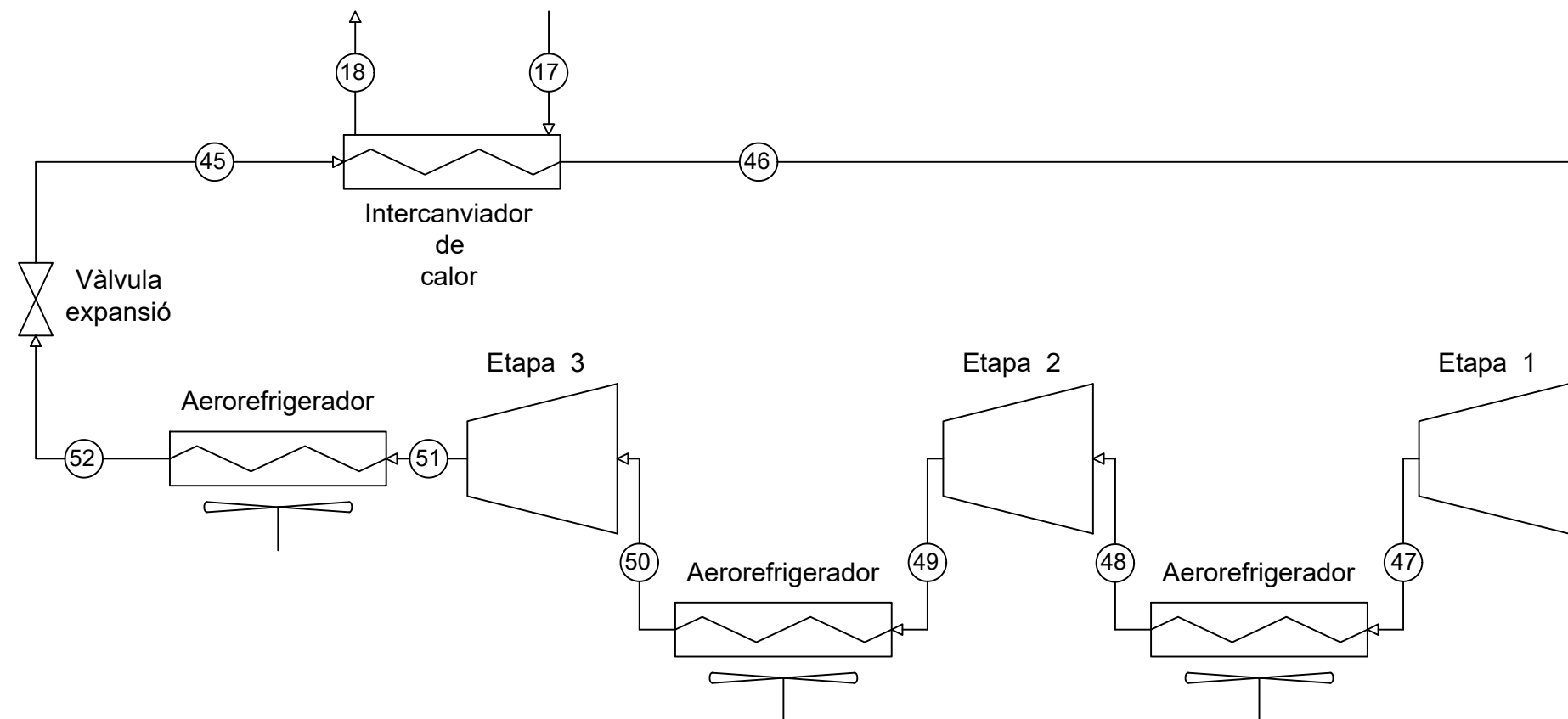
	6,00	7,00	21,00	22,00	23,00	24,00	25,00	26,00	27,00	28,00
Fracció de vapor	1,00	1,00	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Temperatura [C]	55,00	-83,20	-84,46	53,34	311,09	55,00	313,80	55,00	315,93	55,00
Presió [bar]	860,00	860,00	0,03	0,03	0,28	0,28	2,54	2,54	23,40	23,40
Cabal molar [kmol/h]	53,64	53,64	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15	11,15
Cabal màssic [kg/h]	108,13	108,13	189,85	189,85	189,85	189,85	189,85	189,85	189,85	189,85
Fracció molar (amoníac)	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fracció molar (hidrogen)	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



	10	11	29	30	31	32	33	34	35	36
Fracció de vapor	1,00	1,00	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Temperatura [C]	55,00	-62,01	-84,46	37,47	287,28	55,00	313,80	55,00	315,93	55,00
Presió [bar]	430,00	430,00	0,03	0,03	0,28	0,28	2,54	2,54	23,40	23,40
Cabal molar [kmol/h]	52,17	52,17	9,42	9,42	9,42	9,42	9,42	9,42	9,42	9,42
Cabal màssic [kg/h]	105,18	105,18	160,49	160,49	160,49	160,49	160,49	160,49	160,49	160,49
Fracció molar (amoníac)	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fracció molar (hidrogen)	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



	14	15	37	38	39	40	41	42	43	44
Fracció de vapor	1,00	1,00	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Temperatura [C]	55,00	-48,56	-84,46	50,33	306,61	55,00	313,80	55,00	315,93	55,00
Presió [bar]	160,00	160,00	0,03	0,03	0,28	0,28	2,54	2,54	23,40	23,40
Cabal molar [kmol/h]	25,29	25,29	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94	3,94
Cabal màssic [kg/h]	50,98	50,98	67,07	67,07	67,07	67,07	67,07	67,07	67,07	67,07
Fracció molar (amoníac)	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fracció molar (hidrogen)	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



	17	18	45	46	47	48	49	50	51	52
Fracció de vapor	1,00	1,00	0,44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
Temperatura [C]	55,00	-51,23	-84,46	55,00	313,56	55,00	313,80	55,00	315,93	55,00
Presió [bar]	860,00	860,00	0,03	0,03	0,28	0,28	2,54	2,54	23,40	23,40
Cabal molar [kmol/h]	99,21	99,21	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72	15,72
Cabal màssic [kg/h]	200,00	200,00	267,69	267,69	267,69	267,69	267,69	267,69	267,69	267,69
Fracció molar (amoníac)	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Fracció molar (hidrogen)	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00