



Disseny de una planta portàtil per l'obtenció de hidrogen a partir d'aigua.

Document:

Memòria

Autor/Autora:

Quevedo García, Juan

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Lis Arias, Manuel Jose.

Titulació:

Grau en Enginyeria Química

Convocatòria:

Primavera-2022.

TREBALL DE FI D'ESTUDIS



Índex de taules

Títol i número de totes les taules per ordre d'aparició en el text.

Taula 1. Nom de la taula	5
--------------------------------	---

**Disseny de una planta
portàtil per l'obtenció de
hidrogen a partir d'aigua.**



Índex de figures

Títol i número de tots els gràfics per ordre d'aparició en el text.

Figura 1. Nom de la figura (Font: xxxx)	1
Figura 2. Nom de la figura (Font: xxxx)	5

**Disseny de una planta
portàtil per l'obtenció de
hidrogen a partir d'aigua.**

Llista d'abreviatures / Glossari

Si s'escau.

1. Objecte

La idea principal del projecte que es presenta en aquest treball es el disseny de una planta portàtil autònoma de obtenció d'hidrogen a partir d'aigua, amb subministre de energia verda en aquest cas energia solar, mitjançant la producció del hidrogen via reactor electrolitzador àlcali.

L'hidrogen no és un combustible que es trobi lliure i que es pugui extreure de forma directa de la natura. Per contra, l' hidrogen és un vector energètic, és a dir, la seva obtenció està subjecta a un procés de producció que requereix una certa quantitat d' energia. D' aquesta manera, si bé l' ús de l' hidrogen no dona lloc a emissions d' efecte hivernacle, la seva obtenció sí que pot tenir unes emissions associades en funció del procés seguit, de les fonts d' energia primària emprades i del post-processament. En aquest punt cal destacar que l' hidrogen serà tan net i zero emissions com ho sigui el seu procés d' obtenció, i això és molt important. Per exemple, de res servirà substituir tots els vehicles amb motors de combustió interna pel seu equivalent de pila de combustible si l'hidrogen que se li subministra a aquests vehicles ha estat obtingut per una ruta més contaminant que l'ús del propi dièsel o gasolina.

En l'actualitat les diferents rutes de producció semblen formar un Front de Pareto entre el factor econòmic i el factor mediambiental. D'aquesta manera, les tecnologies que presenten menors costos són realment contaminants, mentre que les que presenten unes millors característiques mediambientals encara compten amb un cost elevat.

A la justificació del projecte veurem els tipus de produccions d'hidrogen i per que triem el nostre equip de producció, en funció de la font primària d' energia emprada per produir l' hidrogen, així com dels processos d' obtenció emprats.

2. Abast

Els lliurables necessaris per arribar a la solució són els següents:

1. Project charter amb data d'entrega el 18/03/22
2. Informe de seguiment I amb data d'entrega el 08/04/22
3. Informe de seguiment II amb data d'entrega el 06/05/22
4. Informe de seguiment III amb data d'entrega el 27/05/22
5. Lliurament TFG amb data d'entrega fi el dia 22/06/22

I els paquets que inclouen cada lliurable es relacionen tot seguit:

Project charter

1. Índex
2. Objecte
3. Abast
4. Requeriments
5. Justificació
6. Calendari
7. Referències

Informe de seguiment I

1. Balanç de matèria i energia
2. PFD
3. Equip d'energia solar (S-101)
4. Dipòsits (T-101)

Informe de seguiment II

Equip de refrigeració (C-101, V-101, T-102)

Informe de seguiment III

Electrolitzadors equip principal (E-101)

Lliurament TFG

1. Equips de subministrament d'aigua (A-101)
2. Pressupost
3. Plànols

3. Requeriments

Les especificacions bàsiques i restriccions en aquest projecte vindran donades pel fet de treballar amb un vector energètic en fase gas com es l'hidrogen, que requereix treballar amb uns equips i material especials en quan a estanqueïtat i els requeriments necessaris per que els diferents equips treballin en les condicions idònies. La implantació de la petita planta solar vindrà condicionada per l'energia necessària pel funcionament de l'electrolitzador que es l'equip principal del procés i els diferents equips auxiliars que també necessiten corrent elèctric. El magatzematge i subministra de l'hidrogen en els dipòsits o tancs també tenen unes condicions molt especials en quan a la construcció d'equip i en quan seguretat que ens limitarem a presentar la configuració específica dels fabricants i els consells específics.

La quantitat de energia verda que requerirà la planta vindrà condicionada pel sumatori de les energies dels diferents equips que intervenen en el projecte. Aquest sumatori ens farà trobar una dimensió del nombre de plaques necessàries, la potencia mínima requerida i la superfície de insolació mínima.

Els tancs tindran una consideració especial en quan a forma, volum i localització, degut al cabal de producció i a la garantia de subministre tant en equip electrolitzador com en l'equip de refrigeració, que han de mantenir el procés en continu. A la vegada el tanc de producte final ha de tenir un fi de producció quan aquest es troba ple. El treballar en fase gas en un procés en continu per garantir el transport del gas hidrogen a la pròpia planta calen unes bombes especials de buit d'anell líquid que garanteixen la estanqueïtat de l'equip, així com de les canonades.

Altre factor important serà la elecció del equip principal en funció dels diferents tipus:

Tipus d' electrolitzadors.

Hi ha moltes formes de construir i configurar un electrolitzador, i es poden utilitzar diferents electròlits igual que a les piles de combustible. Hi ha molts tipus d'electrolitzadors, podem trobar:

- Electrolitzadors alcalins.
- Electrolitzadors de membrana polimèrica (PEM).
- Electrolitzadors d'òxid sòlid (SOEL).
- Electrolitzadors de membrana d'intercanvi aniònic (AEM).

Electrolitzador alcalí.

Els electrolitzadors alcalins són la tecnologia actual més madura. La seva principal característica és que tenen un electròlit líquid i mitjançant un diafragma, normalment hidròxid de potassi (KOH) o hidròxid de sodi (NaOH), produïm la separació de gasos entre el costat càtode i el costat ànode. Aquests electrolitzadors tenen un consum energètic al voltant de 5 quilovats per metre cúbic nominal d' hidrogen produït. Treballen a unes densitats de corrent que es consideren relativament baixes entre 200 i 600 mA per centímetre quadrat. Els electrolitzadors alcalins funcionen bé a temperatures de funcionament entre 25 – 100 °C i a pressions d'1 – 30 bars respectivament. Actualment és la solució comercial més establerta i presenta els costos de fabricació més baixos. Normalment estan al voltant de 1.000 euros per KW consumit.

El principal avantatge és una tecnologia madura. El principal desavantatge és que l'electròlit que usen és un electròlit líquid, la qual cosa fa que els dissenys no siguin compactes i a més no tenen una resposta ràpida a variacions de potència, per la qual cosa no es consideren òptims per ser acoblats amb fonts d'energies renovables. La construcció general d'un electrolitzador alcalí és senzilla. Té un disseny unipolar que consisteix en dos elèctrodes metàl·lics suspesos en una solució electrolítica aquosa. Quan se subministra electricitat als elèctrodes, es genera hidrogen i oxigen gasós en cadascun d'ells. L'electrolitzador s'ha de dissenyar de manera que cada gas sigui recollit i eliminat de l'electrolitzador de manera eficient.

Electrolitzador de membrana polimèrica.

L'electrolitzador basat en una membrana electrolítica de polímer (PEM) és molt popular, i molts electrolitzadors moderns estan construïts amb tecnologia PEM. L'electrolitzador PEM usa el mateix tipus d'electròlit que una pila de combustible PEM. L'electròlit és una fina membrana sòlida conductora d'ions, que s'utilitza en lloc de la solució aquosa. Aquests electrolitzadors utilitzen un disseny bipolar i es poden fer funcionar a altes pressions diferencials a través de la membrana.

Els electrolitzadors PEM són populars perquè molts dels problemes típics de les piles de combustible PEM no són aplicables. L'aigua subministrada al càtode també es pot utilitzar fàcilment per refrigerar la cèl·lula, i la gestió de l'aigua és molt més senzilla, ja que l'electrode positiu s'ha d'inundar amb aigua. L'hidrogen produït per aquest tipus d'electrolitzador és de gran puresa. L'únic problema és la presència de vapor d'aigua en el sistema. L'aigua es difon a través de l'electròlit com en les piles de combustible, per la qual cosa els dissenyadors d'electròlits utilitzen diverses tècniques per evitar aquest fenomen. Un mètode habitual és utilitzar electròlits més espessos que els utilitzats en les piles de combustible. Són els electrolitzadors que actualment presenten una resposta més ràpida a variacions de potència, amb la qual cosa són òptims per ser integrats amb fonts d'energies renovables. El principal inconvenient, a banda dels costos de fabricació, és que utilitzen en metalls preciosos com a catalitzadors en ambdós reaccions.

Electrolitzador d'estat sòlid.

La principal característica d'aquests electrolitzadors són que treballen a altes temperatures. Poden arribar a assolir eficiències de fins al 95%. Com treballen a temperatures elevades presenten consums energètics més baixos, al voltant de tres quilovats hora. Però necessiten un aportament extra d'energia per arribar a les temperatures necessàries per produir les reaccions. Les densitats de corrent a les quals treballen també són força elevades. Un desavantatge és que no poden treballar a pressions elevades, les màximes pressions de treball són al voltant de 5000 bars. En treballar a elevades temperatures, hi ha molt pocs materials que puguin treballar en aquestes condicions, amb la qual cosa tant l'electròlit com els elèctrodes només estan formats per ceràmiques complexes. El gran avantatge és que es presenten unes eficiències potencials més elevades que la resta dels electrolitzadors. Aquests sistemes es troben a nivell de desenvolupament tot i que sí que existeix algun desenvolupament comercial o algun proveïdor comercial que diu que els oferta però sempre en baixes a potències.

Electrolitzador de membrana d'intercanvi aniònic.

Els que menys desenvolupats es troben són els electrolitzadors de membrana aniònica. Tot i que les característiques que presenta són força prometedors, les eficiències actuals són baixes, al voltant d'un 50%. Només poden treballar a pressions màximes de 30 bars. Els principals avantatges que presenten és que no necessiten catalitzadors basats en metalls preciosos. Poden utilitzar metalls convencionals, la qual cosa els fa força prometedors a llarg termini

4. Justificació:

Es detalla a continuació la justificació de la producció de hidrogen verd amb la següent classificació de produccions d'hidrogen i els motius detallats.

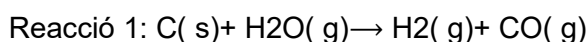
Es possible classificar l' hidrogen obtingut mitjançant l' assignació d' una escala de colors, en el que s' anomenen els diferents tipus de producció de l' hidrogen, en funció de la font de energia.



Foto: apilados.com/blog/tecnologias-para-la-produccion-de-hidrogeno-los-colores-del-hidrogeno/#more-659

L' hidrogen negre i marró

és produït a partir de carbó, negre en el cas de ser un carbó bituminós i marró en el cas d' emprar-se lignit, típicament mitjançant un procés de gasificació. Això dona lloc a un gas de síntesi, una barreja rica en hidrogen i monòxid de carboni, si bé depenent del procés concret també pot aparèixer diòxid de carboni en quantitats variables. Aquests processos de gasificació són coneguts des de fa temps sent els mètodes mitjançant els quals es produïa el gas per a l' enllumenat públic a finals del segle XIX. En l' actualitat s' empen per a la producció d' intermedis, com l' hidrogen, necessaris en els procediments d' obtenció d' amoníac o metanol. Un dels possibles processos de gasificació del carbó segueix la següent reacció:



El gas de síntesi resultant, denominat en aquest cas particular gas d'aigua, s'obté **escalfant** carbó a alta temperatura (800 °C – 1300 °C), i fent passar vapor d'aigua a través d'ell. Amb l'objectiu de reduir la presència de monòxid de carboni i augmentar la riquesa en hidrogen del gas de síntesi sol emprar-se una reacció de desplaçament del gas d'aigua (water-gas shift reaction en anglès) com segueix:

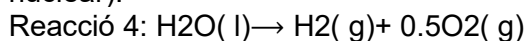


Hidrogen gris

L'hidrogen gris fa referència a l'hidrogen produït a **partir** de gas natural o petroli mitjançant processos de reformat de metà amb vapor (steam methane reforming en anglès), reformat auto tèrmic del gas natural o oxidació parcial de cru, principalment. El reformat de metà amb vapor, el procés més estès, dona lloc novament a un gas de síntesi, en aquest cas a través de la reacció de metà, en lloc de carbó, amb aigua com mostra la següent reacció: Reacció 3: $\text{CH}_4\text{(g)+ H}_2\text{O(g)}\rightarrow 3\text{H}_2\text{(g)+ CO(g)}$ Aquesta és una reacció fortament endotèrmica que requereix elevades temperatures per dur-se a terme, fins a 1000 °C.

Hidrogen groc

L' hidrogen groc és aquell produït mitjançant electròlisi de l' aigua, procés que **mitjançant** l' aportació d' energia permet dissociar l' aigua en hidrogen i oxigen, emprant directament l' electricitat de la xarxa elèctrica, vegeu reacció 4. Conseqüentment, aquest hidrogen serà tan net com ho sigui el mix elèctric del país en el qual es produeixi. Per exemple, en països com Noruega en els quals pràcticament el 100% de la seva electricitat procedeix de fonts renovables, l'hidrogen groc podria considerar-se pràcticament nul en emissions, vegeu Figura 4. Per contra, a Espanya l'hidrogen produït mitjançant aquest procés sí que tindria associades emissions d'efecte hivernacle doncs com es pot veure a la Figura 5, tan sols el 46 % de l'electricitat produïda a Espanya el 2021 va tenir un origen renovable (incloent-se nuclear).



Hidrogen blau

El procés de producció de l' hidrogen blau discorre per la mateixa ruta que l' hidrogen gris, però en lloc d' emetre l' atmosfera el CO₂ **derivat** de la producció, aquest passa per un sistema de captura de carboni per al seu posterior emmagatzematge. D'aquesta manera, és possible reduir sensiblement la quantitat de CO₂ emès en comparació amb l'hidrogen gris. Els sistemes de captura de CO₂ actuals, basats en amines o zeolites, permeten absorbir fins al 90 % d'aquest compost. Per tant, seguiran existint unes certes emissions directes de gasos d'efecte hivernacle. El CO₂ absorbit s' ha de desorbitat posteriorment, normalment mitjançant l' augment de la temperatura, i comprimir-se a uns 110 bar per al seu posterior emmagatzematge, per exemple, en caveres subterrànies

Hidrogen turquesa

Aquest és potser el tipus d'hidrogen menys conegut, fent referència a l'hidrogen **produït** mitjançant piròlisi de combustibles fòssils, fonamentalment gas natural. L'absència d'oxigen en el procés de piròlisi, vegeu la reacció 5, evita la producció de CO₂, donant lloc únicament hidrogen i carboni.

Reacció 5: $\text{CH}_4(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{C}(\text{s})$

En principi, aquest és un procés més simple que el reformat del gas natural del qual es deriven l'hidrogen gris i blau. A més, el major contingut en hidrogen del corrent sortint fa que es requereixi un menor post-processament de l' hidrogen produït per assolir un grau comercial, la qual cosa també podria suposar un avantatge competitiu enfront de l' hidrogen gris i blau. El contra és que la tecnologia necessària no està completament madura pel que fa a producció d'hidrogen.

Hidrogen rosa

S'anomena hidrogen rosa aquell produït mitjançant electròlisi de l' aigua, com en el cas de l' hidrogen groc, però emprant per a això únicament electricitat procedent d' una central nuclear. En el cas de l'hidrogen rosa, les emissions directes de gasos d'efecte hivernacle seran nul·les, però, sí que hi haurà unes emissions indirectes derivades de tota la cadena de subministrament.

Hidrogen verd

L'hidrogen verd és sens dubte del que més s'està parlant en aquests moments a causa dels seus clars avantatges mediambientals. L' hidrogen verd es pot obtenir a partir d' una àmplia gamma de processos, essent el majoritari aquell que permet obtenir hidrogen mitjançant l' electròlisi de l' aigua utilitzant per a això electricitat procedent de font renovables, fonamentalment eòlica i solar, però també s' hi podria incloure la hidroelèctrica, mareomotriu o undimotriu. Aquesta és sens dubte la ruta de producció d'hidrogen més atractiva de cara al futur i que s'espera jugui un paper determinant en la transició energètica en la qual ens trobem immersos. Tot i així, també es considera hidrogen verd aquell obtingut a partir de biogàs mitjançant processos de reformat o a partir de biomassa per processos de gasificació similars al descrit per a la producció d'hidrogen a partir de carbó [15]. Aquests processos realment produeixen emissions de CO_2 durant la producció de l' hidrogen. No obstant això, considerant el cicle complet del biogàs i de la biomassa és possible concloure que la producció d'hidrogen mitjançant aquestes rutes és nul·la en emissions. De fet, si s'emprenguessin sistemes de captura de carboni a la sortida d'aquests dos processos, com en el cas de l'hidrogen blau, l'hidrogen obtingut seria negatiu en emissions de gasos d'efecte hivernacle ja que en realitat s'està eliminant CO_2 de l'atmosfera de forma efectiva en considerar tot el cicle de vida del biogàs i la biomassa. Malgrat el gran interès que presenten aquestes rutes de producció, en aquest treball anem a centrar-nos fonamentalment en l'hidrogen verd obtingut mitjançant l'ús d'energia eòlica i solar que és el que a dia d'avui sembla que jugarà un paper més rellevant.

5. Calendari

Diseny de una planta portàtil per l'obtenció de hidrogen a partir d'aigua		Project charter																	
senana	Index	21-25/02/22	28-04/03/22	07-11/03/20	14-18/03/20	21-25/03/22	28-01/04/22	04-08/04/22	11-15/04/22	18-22/04/22	25-29/04/22	02-06/05/22	09-13/05/22	16-20/05/22	23-27/05/22	30-03/06/22	06-10/06/22	13-17/06/22	20-22/06/22
Project Charter	Objecte																		
	Abast																		
	Requirements																		
	Justificació																		
	Calendari																		
	Referències																		
Equip de energia Solar (S-101)	Planta solar																		
	Dimensió número de plaques																		
	Característiques tècniques																		
	Equip de protecció																		
	Escomesa																		
	Equip de control																		
Equip Suministra d'aigua (A-101)	Escomesa																		
	Tratament de aigua																		
	Desmineralització																		
	Osmosis inversa																		
Electrolitzador (E-101)	Que són y com funcionan																		
	Tipus																		
	Selecció de proposta																		
	Característiques																		
	Control e instrumentació.																		
Equip de refrigeració	Que són y com funcionen																		
Compressor (-C-101)	Tipus																		
	Selecció de proposta																		
	Característiques																		
	Control e instrumentació.																		
Condensador evaporador (V-101)	Que són y com funcionen																		
	Tipus																		
	Selecció de proposta																		
	Característiques																		
	Control e instrumentació.																		
Dipòsits (T-101)	Tipus																		
	Característiques tècniques																		
Balanc de Materia y Energia	Càlculs																		
	Excel de càlculs																		
Presupost	Càlculs de costos per unitat																		
	Càlculs de costos totals																		
	Inversió inicial																		
	Amortització																		

Índex

Índex parcial I:

- **Equip de energia Solar**
 - Dades de la irradiància del sol a Catalunya
 - Equip proposta a instal·lar
 - Consum d'energia diari.
 - Nombre de plaques
 - Càlcul del regulador de càrrega
 - Càlcul de la càrrega de bateries.
 - Càlcul de l'inversor
 - Dimensió del cablejat
 - Superfície del terreny requerit per instal·lació de les plaques
 - Superfície per placa més ombra màxima
 - Superfície total del terreny
- **Dipòsits**
 - Introducció
 - Normativa vigent reguladora
 - Sistemes de emmagatzematge de hidrogen
 - Dipòsits tipo I
 - Dipòsits tipo II
 - Dipòsits tipo III
 - Dipòsits tipo IV
 - Tipus de emmagatzematge
 - Emmagatzematge de gas a pressió
 - Emmagatzematge de hidrogen líquid
 - Emmagatzematge en hidrurs metàl·lics
- **Balanç de matèria i energia**
 - **Balanç de matèria**
 - Diagrama de Blocs
 - Diagrama de entrades i sortides
 - Base de càlcul
 - Balanç global del procés
 - Balanç en el mesclador
 - Balanç en el compressor
 - Balanç a l'intercanviador
 - Balanç al flasch
 - **Balanç de energia**
 - Diferència de la temperatura mitjana logarítmica
 - Coeficient global de transferència de calor
 - Bescanviadors de pas múltiple

- Eficiència tèrmica
- Relació de capacitats calorífiques

Índex parcial II:

- **Estudi sistemes per liquar el Hidrogen**
 - El Cicle Siemens
 - El cicle Hampson-Linde
 - El liquador de Heli
 - Sistema Linde-Hampson simple
 - Sistema Linde-Hampson amb refredament previ
 - Sistema Linde-Hampson dual
- **Compressor**
 - Compressors de anell líquid
 - Materials
 - Aplicacions
 - Compressors de anell líquid de dues etapes a alta pressió
- **Destil·lació flash**
 - Definició de destil·lació flash
 - Conceptes bàsics de destil·lació flash
 - exemples
- **Selecció de l' evaporador**
 - Sistema de circulació de l'aire
 - Tipus de aplicació
 - Separació de les aletes
 - Sistema de descarxament
 - Selecció de l'evaporador
 -
- **Tipus i característiques dels evaporadors**
 - Segons com estan construïts
 - Segons com es comporta i circula el refrigerant
 - Segons el mètode de circulació del aire.
- **Refredadors**
- **Sistemes de descarxament**
- **Descongelació per resistències elèctriques**
- **Descarxament per gasos calents**
- **Proposta de electrolitzadors alcalins. Hidrogenics. Hystat**
- **Especificacions tècniques**
- **Figures i esquemes de les parts d'equip principals**
- **Diferents configuracions.**
- **Bibliografia**

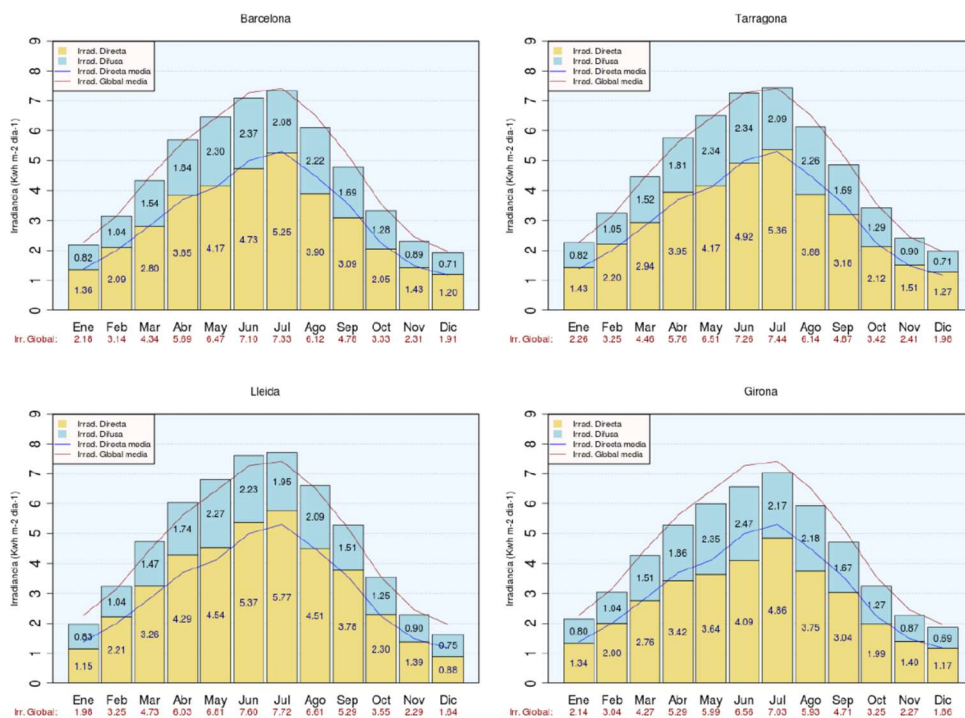
Índex parcial III:

- **Electrolitzadors**
 - Introducció
 - Fonaments de l' electròlisi de l' aigua.
 - Termodinàmica Electroquímica
 - Característiques generals dels electrolitzadors
 - Electrolitzadors alcalins d' aigua
 - Intercanvi de protons. Electrolitzadors de membrana
 - Conversió de reacció com a reactor de membrana
 - Proposta de electrolitzadors alcalins. Hidrogenics. Hystat
 - Especificacions tècniques
 - Figures i esquemes de les parts d'equip principals
 - Diferents configuracions.
 - Bibliografia

Equip de energia Solar

Per poder dimensionar la planta solar necessitem saber quina irradiació tindrà la zona de instal·lació de la planta.

Dades de Irradiància del sol a Catalunya.



Gràfic nº Imatge i dades cedides per l' Atlas de radiació Solar a España fen servir les dades del SAF de clima de EUMETSAT.

A Barcelona la irradiància directa i difusa de sol es la següent:

incidència del sol a Barcelona en [KW.h/m².dia].

mes	Irradiància di- recta	Irradiància difusa
gener	1,36	0,82
febrer	2,09	1,04
març	2,8	1,54
abril	3,85	1,64
maig	4,17	2,3
juny	4,73	2,37
juliol	5,25	2,08
agost	3,9	2,22
setembre	3,09	1,69
octubre	2,05	1,28
novembre	1,43	0,89
desembre	1,2	0,71
media	2,99	1,55
total		4,54

Taula nº irradiància directa respecte difusa

A Barcelona tenim:

- una irradiància directa mitjana de 2.99 KW*h/m²*dia
- una irradiància difusa mitjana de 1.55 KW*h/m²*dia
- i una irradiància total mitjana de **4.54 KW*h/m²*dia**

mes que suficient per cobrir les necessitats de la nostra planta solar i del nostre procés donat que la gran majoria de processos el requeriment mínim es de 1 KW*h/m²*dia

Equip a instal·lar:

El que volem implantar per subministrar energia verda al nostre procés es una planta fotovoltaica aïllada.



Figura n° .Imatge cedida per Cambio energético

Per captar aquesta energia renovable i alimentar el nostre equip proposo la utilització del Kit solar Victron de gran producció, que ens ofereix la empresa, Cambio energético, per ús industrial i que conté els següents equips:

- 60 plaques solars de 450 Wp
- Inversor de red Fronius Symo 17.5-33M Trifásico 17000 VA
- Inversores con cargador Victron de 8000 VA a 48 V.
- Bateries BYD-Box Premium LVL 15.4(x3)k
- Pantalla gràfica control GX Victron

Aquesta unitat multiplicada per quatre ens proporcionaria la potència de pic de:

60 plaques x 4 equips igual a **240 plaques** de 450 W

240 plaques x 450 W/placa ens proporciona **108 KW** de potencia en trifàsic.

Consum d'energia diari:

Es el sumatori de tots els productes de la potencia instal·lada la quantitat de hores de funcionament i el nombre d equips instal·lats :

equip	Potencia instal·lada[KW]	quantitat hores funcionament	quantitat de equip	potencia consumida[KWh]
Electrolitzador	92	5	1	460
Circuladores	1	5	3	15
Bombes	2	5	3	30
Equip tractament aigua	0,5	5	1	2,5
Equips de control	0,5	5	2	5
Equips de maniobra	1	5	3	15
Quadres elèctrics	1	5	1	5
Altres	2	5	1	10
totals	100			542,5

Taula n° . taula potencia instal·lada, potencia consumida.

Ens dona un requeriment de energia de **542.5 KWh**

Nombre de plaques:

El nombre de panells solars necessaris vindrà donats per la fórmula:

$$N_{panels} = \frac{Consum\ diari}{horas\ de\ sol\ de\ pic} = \frac{542.5\ KWh}{4.5h} = 120.55\ panells$$

Càlcul del regulador de carga:

Càlcul de la càrrega de les bateries:

$$C_{100} = \frac{Consum\ diari}{Voltatge\ x\ profunditat\ de\ disseny} \times Nombre\ de\ dies\ autonomia =$$

$$= \frac{542.5\ KWh}{48V \times 0.95} \times 3\ dies = 35.69\ Ah$$

Càlcul de l' inversor:

Potencia inversor = Pot. cosum x Coef. de simultaneitat = 542.5x 0.85 = 461.12 KWh

Dimensió del cablejat:

Per a tota la instal·lació anem a utilitzar un cable tipus PV ZZ-F, de coure, fabricat especialment per a instal·lacions fotovoltaïques, doncs són cables unipolars amb doble aïllament i amb una gran resistència a la intempèrie, que estan especialment concebuts per a aquest tipus de projectes.



Figura nº . Cable solar PV ZZ (Fuente: Top Cable)

Per a tota la part de corrent continu, que és la que anem a calcular en aquest tutorial, disposarem lògicament de dos cables (un per al pol positiu, un altre per al negatiu) i tots dos del tipus PV ZZ-F esmentat.

Els cables seran no propagadors de l' incendi i amb emissió de fums i opacitat reduïda

Material	γ ₂₀	γ ₇₀	γ ₉₀
Cobre	56	48	44
Aluminió	35	30	28
Temperatura	20°C	70°C	90°C

$$s = 2 \times L \times I / \gamma \times (V_a - V_b)$$

$L = >$ La longitud de la conducció

$I = >$ La intensitat

$\gamma = >$ Resistivitat o resistència específica el valor de la qual a 20° C, per a fil estirat en fred, amb una resistència de més de 30 kg / mm² i amb un diàmetre major o igual a 1 mm és 1/56 W mm² m⁻¹ = 0.001786 W mm² m⁻¹ . (La resistivitat és la inversa de la conductivitat)

$(V_A - V_B) = >$ Caiguda de tensió màxima admissible.

Superfície requerida per instal·lar les plaques:

Nombre de plaques: 120 plaques:

Dimensió placa:

$$l \times a = 2m \times 1.20m = 2.4m$$

Distància entre plaques d

$$d = \frac{\text{alçada}}{\tan(63.5 - \text{angle de latitud})} = \frac{1m}{0.46} = 2.46 m$$

Alçada de la placa en la part darrera

$$h = l * \sin(\alpha) = 2 \times 0.5 = 1m$$

$$s = l * \cos(\alpha) = 1.73m$$

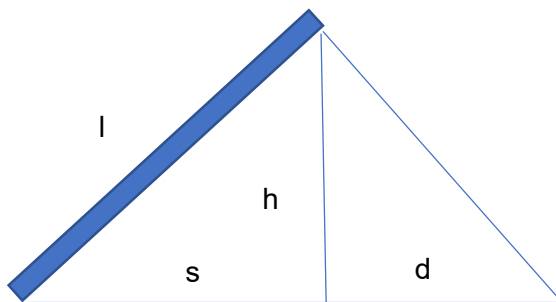


Figura nº . Superfície per placa mes ombra màxima:

$$d + s = 2.46m + 1.73m = 4.19m \text{ ombra máxima}$$



pl

figura n°. Imatge cedida per Vencosan

$$4.50m \times 12 \text{ plaques} = 51 m$$

Les plaques col.locades en quadricula en un marc de 12x10

$$51m \times 24 m = 1224 m^2$$

La superfície total que ocuparà la instal·lació de plaques solars serà de **1224 m²**

Dipòsits

Introducció

El hidrogen té una gran energia específica però com és un gas, la quantitat d'energia emmagatzemada per unitat de volum és molt petita. Així doncs per l'aplicació del hidrogen en el transport hem de aconseguir emmagatzemar la major quantitat de hidrogen possible en el menor volum i amb el menor pes possible.



Figura nº. Foto cedida per Ariema

Normativa vigent

La normativa que regula els equips a pressió actualitzada es la següent:

“Real decreto 809/2021, de 21 de septiembre, por el que se regula el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias”

En aquesta denominació s' inclouen tots els elements que es contemplen en el Reglament com els aparells de pressió, recipients de pressió simples, equips de pressió, conjunts, canonades i els equips de pressió transportables

Sistemes de emmagatzematge de Hidrògeno.

L' emmagatzematge i la distribució d' hidrogen, produït a partir de diferents fonts i utilitzat de diverses maneres, constitueixen elements clau de l' economia de l' hidrogen. L' ús generalitzat i flexible de l' hidrogen com a vector energètic necessita mètodes per emmagatzemar l' excés de producció per a un posterior ús, transportar l' hidrogen emmagatzemat des del punt de producció fins al de consum, i poder carregar i descarregar convenientment l' hidrogen des de i fins al dipòsit d' emmagatzematge d' acord amb les necessitats existents.

Depenent de l' ús final de l' hidrogen, els sistemes d' emmagatzematge i les condicions dels mateixos han de variar. D' una banda, s' utilitzen sistemes estacionaris d' emmagatzematge, que es poden emprar en la generació d' energia elèctrica i tèrmica en el sector residencial, generació descentralitzada d' electricitat, aplicacions industrials, etc. En aquestes aplicacions, els sistemes d' emmagatzematge d' hidrogen tenen menys limitacions quant a superfície ocupada, pes i volum, necessitat de sistemes auxiliars, etc. Per contra, l' emmagatzematge d' hidrogen per al seu ús en automoció presenta fortes restriccions quant a pes i volum, existint uns límits mínims de quantitat d' hidrogen emmagatzemat que s' han d' assolir perquè els vehicles assoleixin autonomies equivalents als vehicles convencionals. Existeixen a més altres restriccions quant a condicions d' operació i cinètica de subministrament d' hidrogen, que condicionen el seu ús combinat amb piles de combustible en automòbils, autobusos, camions, etc. Per tant, els requisits d' un sistema d' emmagatzematge d' hidrogen per a automoció són molt més exigents que els necessaris per a aplicacions estacionàries.

Gràcies al pes específic que el sector **transport** té a nivell mundial en el consum d'energia, i molt particularment als països desenvolupats, els principals actors d'aquest sector (fabricants d'automòbils, governs, usuaris, organitzacions de protecció mediambiental, etc.) estan aconseguint que, davant la necessitat de donar resposta als desafiaments plantejats, la indústria de l'automòbil actuï com a "locomotora" i força impulsora de gran part dels desenvolupaments que s'estan realitzant, tant en l' àrea de l' emmagatzematge

d' hidrogen com en altres tecnologies relacionades amb l' hidrogen i les piles de combustible. Cal ressenyar que les característiques de l' hidrogen (gas combustible, altament inflamable, no tòxic, incolor, vàter i insípid) fan de la seguretat un condicionant principal a l' hora de seleccionar un sistema d' emmagatzematge d' hidrogen.

Rangs de densitat, temperatura i pressió per triar la millor opció de emmagatzematge en funció de hidrogen líquid, hidrogen comprimit criogenitzat i hidrogen comprimit.

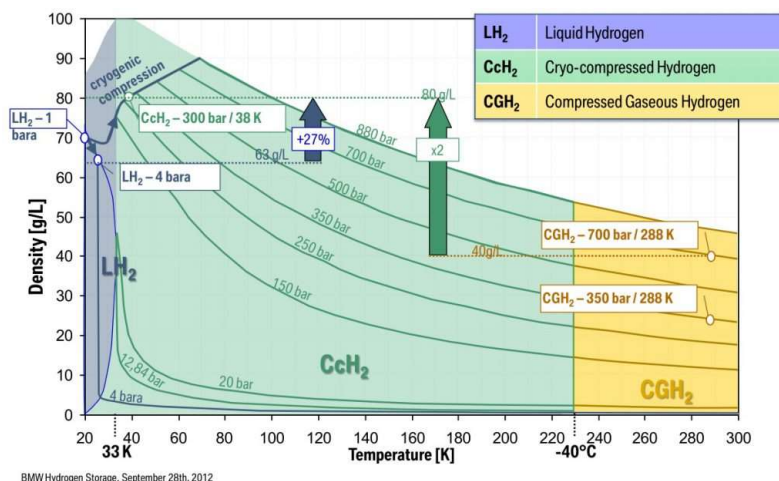


Figura n°. Gràfic densitat, temperatura y pressió

A la Figura es veu clarament com l' hidrogen líquid i el criocomprimit presenten una densitat molt més gran que la de l' hidrogen comprimit. Malgrat els grans avantatges que planteja l' emmagatzematge líquid i sobretot el criocomprimit, a dia d' avui es troben en una fase experimental resolent certs problemes que plantegen. El mètode més emprat actualment per a l' emmagatzematge d' hidrogen és el d' hidrogen comprimit. En els actuals vehicles de pila de combustible d' hidrogen, l' hidrogen es pressuritza a 700 bar en tancs especials. Però és que a les hidrogeneres l' hidrogen es pot trobar fins i tot a 1000 bar. Per tant, els tancs que emmagatzemin l' hidrogen en aquestes condicions hauran d' estar especialment preparats. Han de suportar grans tensions així com un gran nombre de cicles a fatiga per la càrrega i descàrrega del dipòsit. Els materials emprats han de ser el menys susceptible possible a la fragilització per hidrogen. A causa de la petita grandària de les molècules d' hidrogen, aquestes són capaces de permear a través de diferents materials la qual cosa ha de ser tingut en compte a l' hora del disseny dels tancs. Igualment s' han de tenir en compte els problemes de seguretat que puguin sorgir ja sigui per possibles fuites o en cas d' accident. Així, com es pot veure esquemàticament en la Figura 5, fins al moment s' han desenvolupat quatre tipus funcionals de tancs per a l' emmagatzematge i transport de l' hidrogen, denominats Tipus I, II, III i IV.

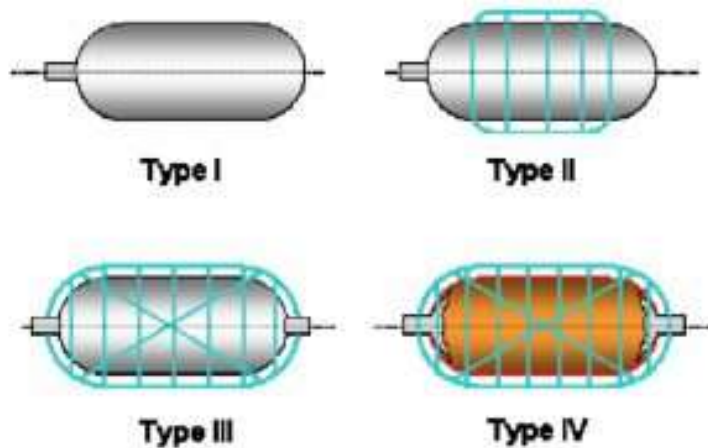


Figura nº. Esquema dels diferents tipus de dipòsits per a l'emmagatzematge d'hidrogen comprimit

Dipòsits Tipus I.

Els tancs tipus I són dipòsits sense costures fabricats amb acer o alumini. Aquests dipòsits poden operar a pressions no superiors a 175 bar en el cas d'estar fabricats d'alumini i 200 bar si són d'acer. Aquest tipus de dipòsits és molt pesat i té parets molt gruixudes el que provoca que la seva capacitat gravimètrica sigui molt petita, al voltant de l'1%. Això vol dir que del pes total del tanc ple, tan sols un 1% és hidrogen. Els tancs tipus I poden ser una opció econòmica per a l'emmagatzematge d'hidrogen en determinades aplicacions estacionàries. Són els tancs per a l'emmagatzematge d'hidrogen comprimit utilitzats en els laboratoris.



Figura nº. Dipòsit tipus I de hidrogen comprimit

Dipòsits Tipus II.

Són tancs metàl·lics, d'acer o alumini, sense costures i reforçats amb materials composts de fibra de carboni o vidre en la direcció del cercle a la secció cilíndrica del dipòsit. S'han fabricat tancs tipus II que han suportat pressions de 700 bar i fins a 1000 bar. En aquest cas el recipient metàl·lic i el material compost suporten aproximadament la mateixa càrrega estructural. Segueixen sent dipòsits molt pesats, cosa que no els fa viables per al seu ús en automoció, però són utilitzables en aplicacions estacionàries. En particular, donada les elevades pressions que són capaces de suportar solen emprar-se com a dipòsits d'alta pressió a les hidrogeneres.



Figura n°. Dipòsit tipus II de hidrogen comprimit

Dipòsits Tipus III.

Consten d'un folre metàl·lic intern amb o sense costures per tal d'evitar les fuites d'hidrogen per difusió, recobert tot això per un material compost disposat en diferents direccions. La part metàl·lica és normalment d'alumini tot i que també pot ser d'acer. Els més resistents són aquells que empen fibra de carboni com a material compost, sent capaços de suportar fins a 700 bar. En aquest cas la major part de la càrrega estructural és suportada pel material compost. L'eliminació de parets gruixudes de materials metàl·lics i el major ús de materials compostos fa que el pes d'aquests dipòsits disminueixi en comparació als de tipus I i II.



Figura n°. Dipòsit tipus III de hidrógen comprimit.

Dipòsits Tipus IV.

Consta d'un folre intern de material plàstic, generalment polietilè d'alta densitat, per evitar la difusió de l'hidrogen, reforçat mitjançant fibres de carboni en diferents direccions que recobreixen tot el folre de plàstic. És aquest material compost el que suporta en aquest cas totes les càrregues estructurals. A la part més externa pot comptar amb un recobriments de fibra de vidre per tal de protegir la superfície externa. Aquests tancs tipus IV mantenen les vàlvules metàl·liques per poder dur a terme la recàrrega del dipòsit i el subministrament d'hidrogen. Quant a la pressió màxima que són capaços de suportar aquesta es troba al voltant d'uns 700 bar. En eliminar pràcticament tot el material metàl·lic del dipòsit, els tipus IV són molt més lleugers que els tipus I i II. Tot i això, el folre intern de plàstic és pitjor barrera a la difusió de l'hidrogen que els metalls. D'altra banda, tot i que els dipòsits tipus IV són molt més lleugers que els tipus I i II, també són molt més cars a causa de l'ús d'una gran quantitat de fibra de carboni. Amb ells és possible arribar a assolir una densitat gravimètrica d'hidrogen de fins a l'11.3 %, en comparació a l'1% dels tipus I.

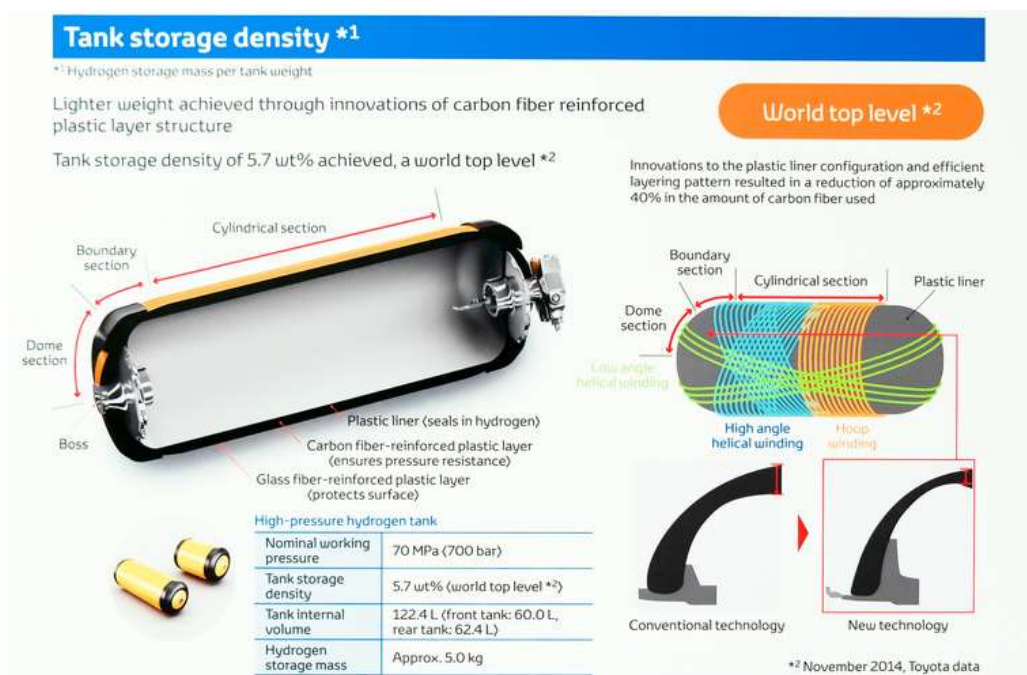


Figura n°. Dipòsit tipus IV per a l'emmagatzematge d'hidrogen (Toyota Mirai).

No existeix una solució universal a l'emmagatzematge d'hidrogen com s'ha pogut veure en aquesta classificació, depèn en gran mesura de l'aplicació i dels requeriments. Generalment els tancs per a l'emmagatzematge d'hidrogen comprimit tipus I i II són emprats en aplicacions estacionàries com per exemple laboratoris o hidrogeneres respectivament. Els dipòsits tipus III i IV, tot i ser més cars que els tipus I i II, són emprats en vehicles a causa de la seva major capacitat gravimètrica.

Tipus de emmagatzematge:

Existeixen diferents formes d'emmagatzemar d'hidrogen que compleixen, en major o menor mesura, els requisits per poder treballar en diferents situacions. Aquests sistemes d'emmagatzematge poden ser:

- en gas a pressió
- en forma líquida (emmagatzematge criogènic)
- en hidrurs metàl·lics
- en carbó, ja sigui carbó activat, grafit, llits de carbó molecular, nanofibras, fullerens, etc.
- en forma de compostos químics (NH₃, toluè, etc.)
- en microesferes de vidre
- en zeolites

De totes aquestes opcions, actualment només les tres primeres presenten la suficient fiabilitat com per ser presents al mercat i poder ser emprades amb prou garanties. La resta de possibilitats es troba encara en fases primerenques d'investigació.

Emmagatzematge de gas a pressió.

És la forma d'emmagatzematge més difosa i que compta amb major experiència. L'hidrogen pot ser emmagatzemat en forma gasosa en diferents tipus de dipòsits: dipòsits de superfície mòbils o estacionaris i caveres subterrànies. Als centres de producció d'H₂, el gas es comprimeix a 200 atmosferes i s'envasa en ampolles o plataformes. Aquestes ampolles o plataformes es traslladen posteriorment als centres de consum. A fi de disminuir el pes d'aquests sistemes d'emmagatzematge, des de fa uns anys s'està assajant en els envasos l'ús de materials tipus «composite» polimèrics en substitució de l'acer, amb els mateixos nivells de seguretat. En l'actualitat existeixen dipòsits de materials compostos que emmagatzemen el gas a 5000 psi (350 bar) i són utilitzats en nombrosos vehicles de demostració. Més recentment s'estan utilitzant dipòsits a 10000 psi (700 bar) assajats i certificats per complir tots els requisits exigits quant a seguretat, tot i que el seu ús està encara limitat a projectes de demostració. També cal tenir en compte el cost energètic de la compressió d'hidrogen, depenent de l'estat final i inicial.

Emmagatzematge d'hidrogen líquid.

Les aplicacions espacials i de transport suposen un dels principals camps d'ús del hidrogen. La temperatura d'ebullició de l'hidrogen a 1 atm. és de -252.76 °C (20.39K). En aquestes condicions la quantitat d'energia emmagatzemada pot assolir els 8.4 MJ/l. L'hidrogen només existeix en forma líquida entre 14 i 20 K; sent, llevat de l'heli, la més volàtil de les substàncies. Això vol dir que per poder emmagatzemar hidrogen líquid a pressió atmosfèrica hem de mantenir aquestes baixes temperatures. Aquí rau el principal inconvenient d'emmagatzemar i manipular el gas líquid en aquestes condicions. El consum energètic teòric segons el cicle de Carnot del procés de liquefacció és de 3.3 kWh/kg d'H₂. A la pràctica, per a grans instal·lacions, aquest consum ronda els 10 kWh/kg, la qual cosa suposa gairebé un 30 % del contingut energètic de l'hidrogen.

Aquí veiem un dipòsit per emmagatzemar hidrogen líquid de Linde



Figura n°. Foto cedida per Linde

Emmagatzematge en hidrurs metàl·lics.

Ja a finals dels anys 60, diversos laboratoris i centres d'investigació van començar a treballar en certs compostos metàl·lics que presentaven la propietat de combinar-se amb l'hidrogen en una reacció més o menys reversible. A partir d'aquests treballs es va comprovar que les reaccions químiques involucrades en els processos de formació i descomposició de nombrosos hidrurs metàl·lics són prou ràpides com per considerar el seu ús en sistemes d'emmagatzematge d'hidrogen. El camp d'aplicació d'aquests sistemes d'emmagatzematge d'hidrogen mitjançant hidrurs metàl·lics abasta un ampli rang de possibilitats, des de petits contenidors per a baixos volums fins a complexos sistemes de calefacció i refrigeració. Cal que un hidrur metàl·lic compleixi certs requisits tècnics perquè pugui ser considerat com un possible sistema d'emmagatzematge d'hidrogen. Aquests requisits són:

- L'hidrur ha de ser fàcilment format i descompost.
- La cinètica de les reaccions d'absorció i desorció ha de ser prou ràpida per satisfer els requeriments de càrrega i descàrrega del sistema.
- La pressió d'equilibri corresponent a la temperatura de descomposició de l'hidrur ha de ser en tot moment compatible amb els requeriments de seguretat del sistema.
- Ha de mantenir òptimes condicions d'operació durant el major nombre possible de cicles càrrega/descàrrega.
- Ha de posseir la màxima tolerància possible a les impureses gasoses que aportin l'hidrogen, ja que aquestes actuen dificultant les reaccions i disminuint la vida útil del sistema.

Hi ha una gran quantitat d'hidrurs comercials, amb cicles de càrrega/descàrrega a diferents pressions i temperatures. El camp d'aplicació dels hidrurs metàl·lics no se centra únicament en l'emmagatzematge d'hidrogen, sinó que pot ampliar-se a nous desenvolupaments en bombes de calor, compressors d'hidrogen i equips de purificació.



Figura n°. Imatge cedida per Ariema

Un altre model i característiques de disseny per hidrogen gas en el que el volum es molt considerable.



Figura n°. Imatge cedida per Lapesa. Destí del dipòsit port de Valencia

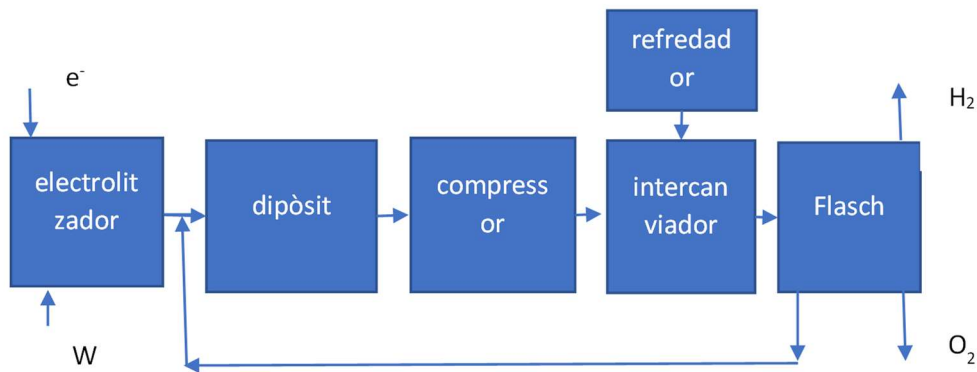


Balanç de matèria i energia.

Balanç de matèria:

El següent diagrama representa el procés industrial de producció de H_2 mitjançant un reactor electrolitzador alcalí, fent servir la electricitat per descomposar el aigua en hidrogen i oxigen. La electròlisi del aigua es produeix mitjançant una reacció electroquímica que no requereix components externs ni peces mòbils. És molt fiable i pot produir hidrogen ultra-pur al 99.99 %, de forma no contaminant quan la font de corrent elèctrica és energia renovable.

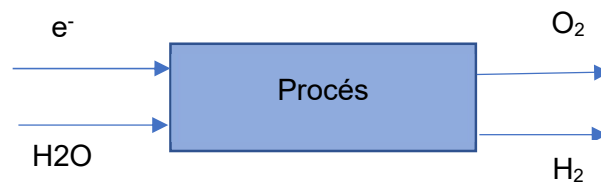
Diagrama de blocs



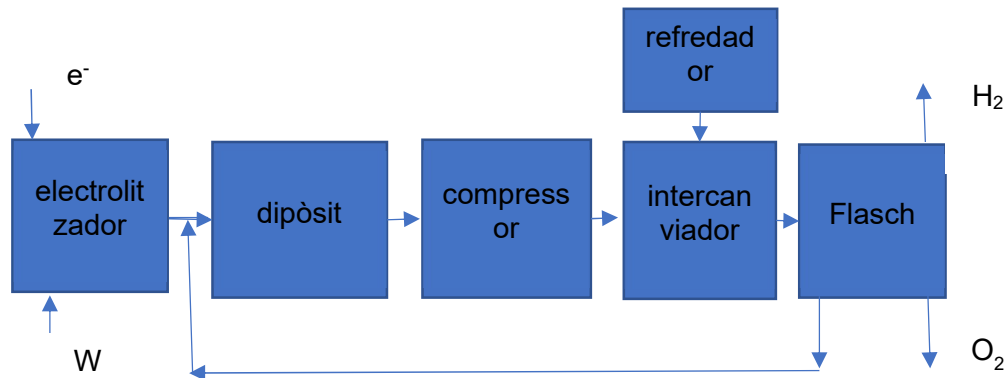
En el electrolitzador entra aigua pura i electricitat i surt la fracció de oxigen y hidrogen, que entra al tanc d'inèrcia previ al compressor, aquest contribueix a augmentar la pressió i la temperatura per entrar al intercanviador de fred, en el que disminueix la temperatura de la mescla per mes tard entrar al destil·lador flash. Això ens permetrà separar les dos fraccions de gas en oxigen pel la cua i d'hidrogen per el cap. Es produeix un recicle de mescla abans de la entrada del compressor. El que es pretén es la separació del oxigen liquat, per posteriorment en una segona etapa, fer la liqüefacció del hidrogen per emmagatzemar. Els requeriment de temperatura són molt exigents.

Diagrama de entrades i sortides

Dibuixem un diagrama de de entrades i sortides del procés:



També dibuixem un diagrama de blocs del procés:



Base de càlcul:

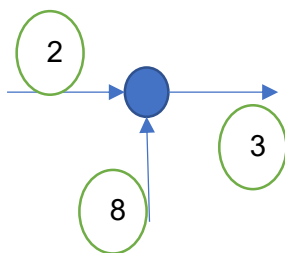
Fixem la base de càlcul de **10 m³/h** de producció d' hidrogen a la sortida del electrolitzador

El balanç global del procés

es el següent:

$$m_W = m_{O_2} + m_{H_2}$$

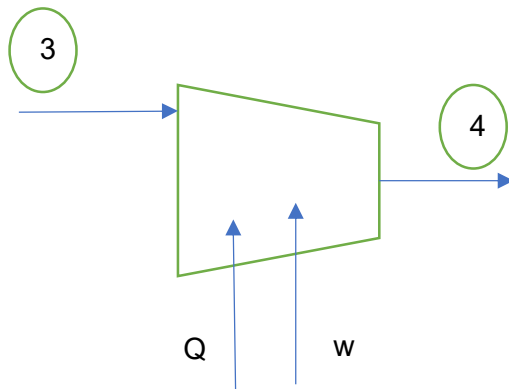
Balanç en el mesclador:



$$m_2 + m_8 = m_3$$

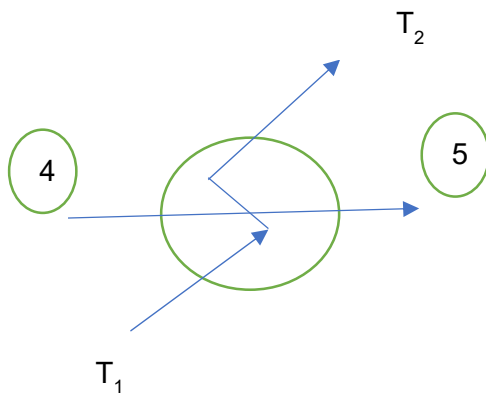
$$m_2(X_{H_2}^2 + X_{O_2}^2) + m_8(X_{H_2}^8 + X_{O_2}^8) = m_3(X_{H_2}^3 + X_{O_2}^3)$$

Balanç en el compressor:



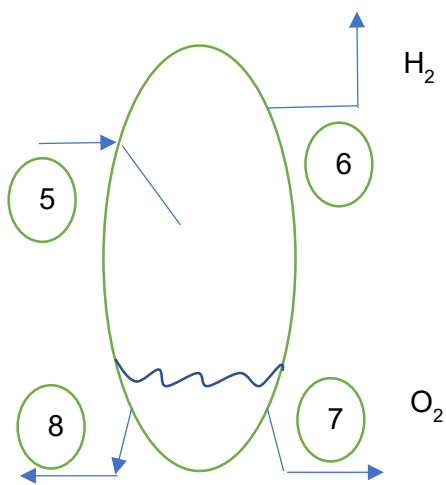
$$m_3 = m_4$$

Balanç a l'intercanviador:



$$m_4 = m_5$$

Balanç al Flash:



$$m_5 = m_6 + m_7 + m_8$$

$$m_5(X^5_{O_2} + X^5_{H_2}) = m_6(X^6_{O_2} + X^6_{H_2}) + m_7(X^7_{O_2} + X^7_{H_2}) + m_8(X^8_{O_2} + X^8_{H_2}) =$$

Balanç d'energia:

Balanç al intercanviador de calor

Diferència de la temperatura mitjana logarítmica

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

ΔT_1 = Diferència de temperatura extrem fred

ΔT_2 = Diferència de temperatura extrem calent

Coefficient global de transferència de calor

$$U_e = \frac{1}{\frac{A_e}{h_i \cdot A_i} + \frac{e \cdot A_e}{k \cdot A} + \frac{1}{h_e} + R_d}$$

A_i, A_e, \bar{A} , Superfícies interna, externa i mitjana

h_i, h_e Coeficients de transferència de calor per convecció

R_d Resistència tèrmica desl dipòsits e incrustacions

Bescanviadors de calor de pas múltiple

$$q = U_e \cdot A_e \cdot F_G \cdot \Delta T_{LMTD}$$

$$F_G = f(X, Z)$$

Eficàcia tèrmica

$$X = \frac{T_{B2} - T_{B1}}{T_{A1} - T_{B1}}$$

Relació de capacitats calorífiques

$$Z = \frac{T_{A1} - T_{A2}}{T_{B2} - T_{B1}}$$

A fluid calent

B fluid fred

Índex parcial II:

- Estudi sistemes per liquar el Hidrogen
 - El Cicle siemens
 - El cicle Hampson-Linde
 - El liquador de Heli
 - Sistema Linde-Hampson simple
 - Sistema Linde-Hampson amb refredament previ
 - Sistema Linde-Hampson dual

- Compressor
 - Compressors de anell líquid
 - Materials
 - Aplicacions
 - Compressors de anell líquid de dues etapes a alta pressió

- Destil·lació flash
 - Definició de destil·lació flash
 - Conceptes bàsics de destil·lació flash
 - exemples

- Selecció de l' evaporador
 - Sistema de circulació de l'aire
 - Tipus de aplicació
 - Separació de les aletes
 - Sistema de descarxament
 - Selecció de l'evaporador
 -

- Tipus i característiques dels evaporadors
 - Segons com estan construïts
 - Segons com es comporta i circula el refrigerant
 - Segons el mètode de circulació del aire.

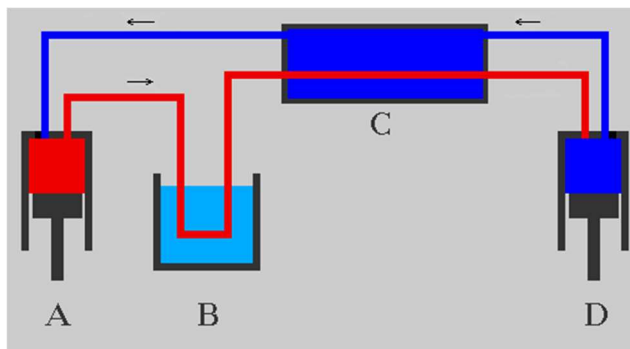
- Refredadors

- Sistemes de descarxament

- Descongelació per resistències elèctriques
- Descarxament per gasos calents

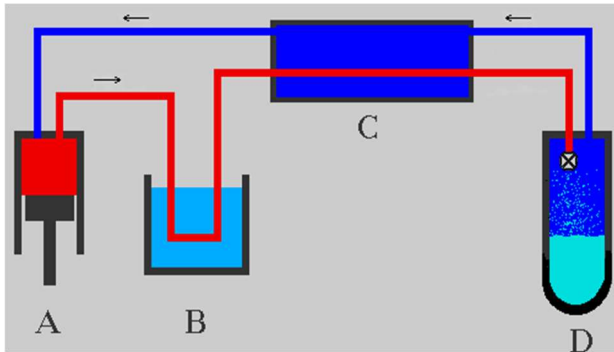
Estudi sistemes per liquar l'Hidrogen

El cicle de Siemens



En el cicle de refredament de Siemens (patentat per W. Siemens 1857) es comprimeix un gas i, per tant, es calenta en un compressor [A]. La major part de la calor és eliminada per un refrigerador [B]. El gas passa llavors a través d'un intercanviador de calor [C]. L'energia s'extreu del gas deixant-lo fer una feina en una màquina d'expansió [D], amb el resultat que el gas s'expandeix i es refreda. Finalment, el gas passarà per l'intercanviador de calor [C], per refredar el corrent de gas comprimit del compressor [A]. A mesura que el corrent de gas a la màquina d'expansió [D] es torna més freda, el corrent de gas que surt d'ella també serà més freda, per la qual cosa la temperatura de l'extrem fred del cicle disminuirà contínuament.

El cicle Hampson-Linde



El cicle Hampson-Linde (patentat independentment per W. Hampson i C. von Linde 1895) és molt similar al cicle Siemens, excepte que la màquina d'expansió és reemplaçada per un orifici Joule-Thomson en [D]. Primer unes paraules sobre l'efecte Joule-Thomson. Un gas podria refredar-se deixant que s'expandeixi lliurement contra l'atmosfera. Això es podria explicar per què el gas estava fent una feina contra l'atmosfera aixecar-la i / o calenta-la, i per tant perdent energia en forma de calor. 1852 Joule i Thomson van fer alguns experiments per observar un gas, expandint-se sense cap feina per fer. Deixen que el gas flueixi a través d'una canonada amb un tap porós per restringir el flux. Per a la seva sorpresa, el gas es va refredar en passar el tap. Això es podria explicar per primera vegada vint anys després per van der Waals. El gas no estava fent un treball extern, sinó intern contra les forces entre les molècules. El que van fer Hampson i von Linde va ser combinar la màquina de refredament de Siemens amb joules i el tap d'expansió Thomsons, i armar un cicle complet de líquidació de gas. El desavantatge amb el cicle Hampson-Linde és que és molt ineficient en comparació amb el cicle Siemens a temperatures més altes. I depenent de la temperatura inicial i del gas que s'utilitzi, és possible que ni tan sols comenci a refredar-se. D'altra banda, té l'avantatge sobre el cicle de Siemens al no tenir cap part mòbil a l'extrem fred.

El líquidador d' heli

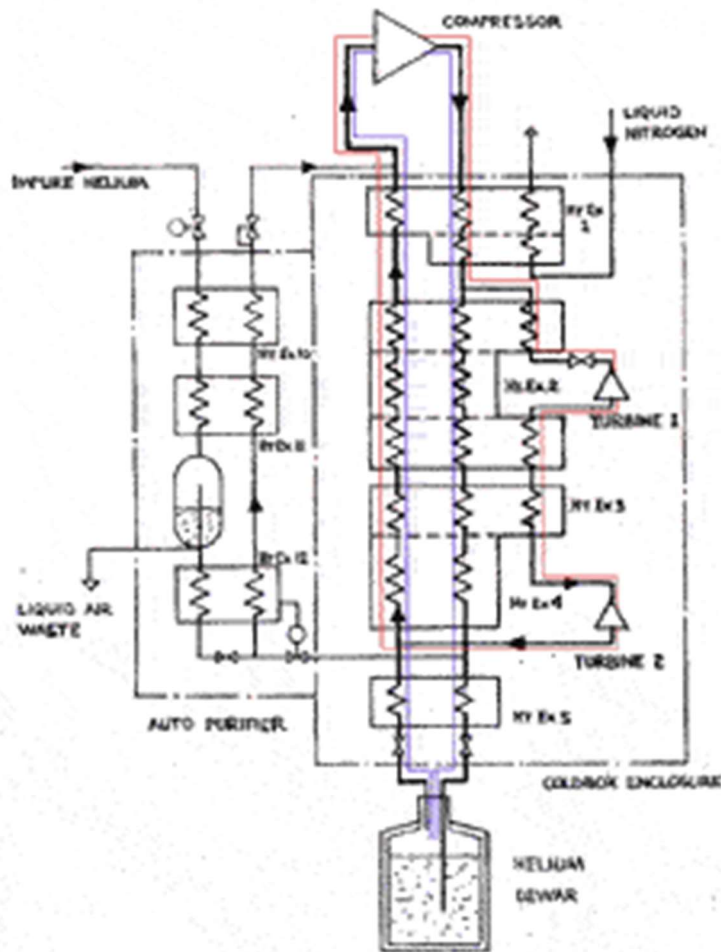


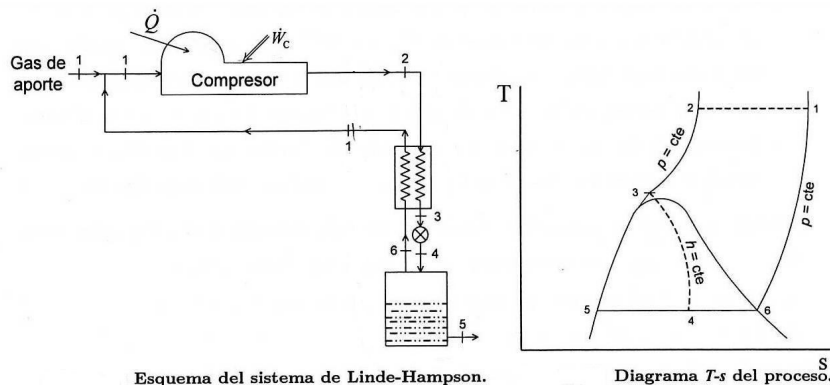
Figura nº. líquador d'heli

Per líquar l'heli s'utilitza un cicle Hampson-Linde [blau], impulsat per un cicle Siemens de dues etapes [vermell] que realitza la major part del treball de refrigeració. Com a màquines d'expansió en el cicle de Siemens, s'utilitzen turbines. El líquador de nitrogen funciona de manera molt similar al líquador d'heli, però en lloc d'heli, el gas circulat és aire. Després de la compressió, la humitat i el diòxid de carboni s'absorbeixen en els llits d'òxid d'alumini. Després, l'aire és refrigerat i líquat per un cicle Siemens i un cicle Hampson-Linde, igual que en el líquador d'heli. I l'últim pas és destil·lar l'aire líquid per separar el nitrogen de l'oxigen.

El sistema de Linde-Hampson és un sistema de líquefacció de gasos molt estès en aplicacions poc exigides de criogenia a causa de la seva senzillesa i basa el seu funcionament en l'Efecte Joule-Thomson. Els elements bàsics d'aquest sistema són:

- compressor,
- intercanviador de calor,
- vàlvula d'expansió
- càmera de líquació.

Dins d'aquest sistema de líquació es poden trobar algunes variants. William Hampson i Carl von Linde van presentar de forma independent la patent del cicle el 1895.



Esquema del sistema de Linde-Hampson.

Diagrama T-s del proceso.

Figura n^o. esquema del sistema Linde-Hampson

Variants del sistema Linde-Hampson:

- Sistema Linde-Hampson simple
- Sistema de Linde-Hampson amb refredament previ
- Sistema de Linde-Hampson dual

Sistema Linde-Hampson simple

El sistema està compost per un compresor, un canviador de calor, una vàlvula d'expansió i un dipòsit per al gas líquat. El gas d'aportació entra al sistema a través del compresor, on se li aplica treball i calor, després del compresor el gas es troba comprimit i a temperatura ambient. A continuació el gas passa per un intercanviador de calor on es refreda, i just després, el gas fred i comprimit s'expandeix a través d'una vàlvula fins a la pressió ambient, en aquesta expansió el gas es refreda encara més a causa de l'efecte Joule-Thomson i passa a la cambra de liquació, en aquesta cambra part del gas entra en estat de líquid saturat i s'extreu. El gas fred que no ha estat líquat es mana a l'intercanviador de calor situat abans de la vàlvula i després s'afegeix al corrent d'aportació que entra al compresor. Per mantenir el funcionament estacionari la massa de gas d'aportació ha de ser igual a la massa de gas líquat que s'extreu del sistema. L'esquema del sistema i el cicle termodinàmic seguit pel gas es mostren a les figures.

Sistema de Linde-Hampson amb refredament previ

Aquest sistema és una modificació del sistema anterior. La modificació consisteix a refredar el gas que surt del compresor fins a temperatures inferiors a l'ambient, amb aquest refredament es permet augmentar la fracció líquada i reduir la pressió necessària després del compresor, amb la qual cosa reduïm la potència necessària i per tant el cost per unitat de gas líquat.

Com l'interval entre la temperatura d'entrada al líquador i la temperatura ambient per a un rendiment màxim és, en general molt gran solen utilitzar-se màquines frigorífiques en cascada. Aquest sistema de refrigeració en cascada, suggerit per Keesom, va ser el primer sistema que es va utilitzar per líquar aire.

En una planta per líquar nitrogen, gas natural se solen usar màquines frigorífiques en cascada. Una màquina frigorífica de propà refreda un corrent de metà, l'evaporador del qual refreda el corrent de nitrogen que es va a líquar.

Sistema de Linde-Hampson dual

Aquesta modificació del sistema simple es realitza per reduir el treball total requerit tot i que comporta una reducció de la fracció líquada. Com en el sistema simple només una petita fracció del gas que es comprimeix es licita, es podrà fer la modificació que no tot el gas s'expandeixi fins a la pressió de líquació, sinó que una petita porció d'aquest gas s'expandeixi fins a una pressió intermèdia. El treball necessari per a la compressió és funció de la relació de compressió, per tant reduint aquesta, es redueix el treball. La planta incorpora dues etapes d'expansió de Joule-Thompson. La cambra d'evaporació de la qual s'extreu el gas líquat funciona generalment a pressió ambient.

En aquest sistema, el gas es comprimeix primer fins a una pressió intermèdia i després fins a la pressió més alta del cicle, una vegada que se li ha incorporat el gas que retorna de la cambra de líquació intermèdia. El gas a alta pressió passa a través d'un intercanviador de calor de tres canals en el qual calenta els fluxos que retornen des de les cambres d'evaporació. Després el corrent s'expansiona fins a la pressió de la càmera intermèdia. La fracció de la despesa màssica de gas que des de la cambra intermèdia no és retornat per ser comprimit en el compressor d'alta pressió s'expansiona fins a la pressió més baixa del cicle a la cambra de líquació d'on s'extreu el gas líquat.

El sistema dual es pot combinar també amb el de refredament previ, amb un canviador de calor situat després del compressor d'alta pressió.

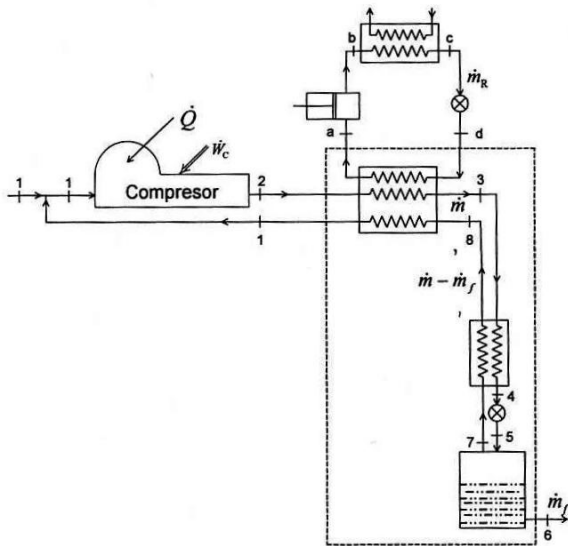


Figura n°. Sistema de Linde-Hampson amb refredament previ

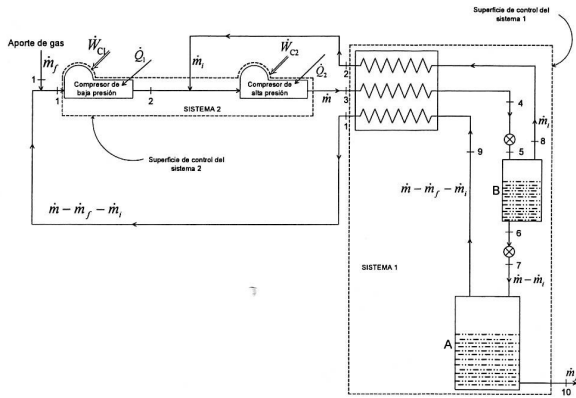
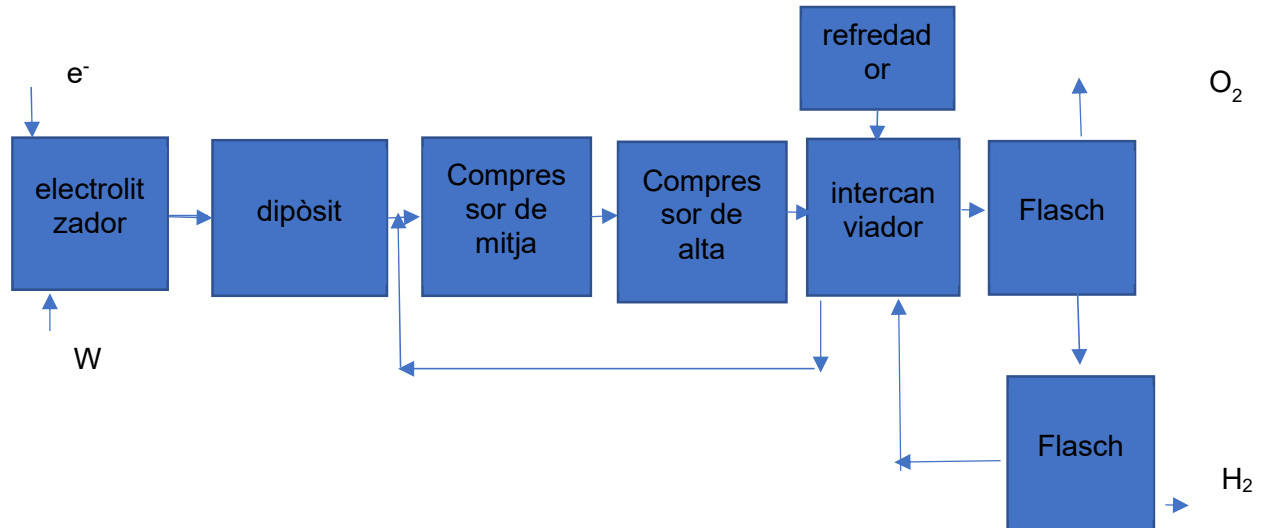


Figura n°. Sistema de Linde-Hampson dual

El diagrama de blocs del procés a estudi quedaria modificat i adaptat al sistema Linde-Hampson dual com es veu en el següent gràfic



Qué és un compressor d'anell líquid, Descripció:

El compressor d'anell líquid funciona amb líquid auxiliar (normalment aigua) que, alternativament plena i abandona els alvèolos del rotor. A les parets de les plaques laterals hi ha unes obertures que permeten la comunicació amb els alvèolos plens o buits, respectivament. D'aquesta manera, mentre s'aspira aire (o gas) per una obertura, per l'altra es descarrega, la qual cosa causa el transport d'aire (o gas) continu i regular per compressió. El nivell màxim de compressió que es pot assolir depèn de l'energia adquirida pel líquid en moviment, de la seva naturalesa i de la velocitat de rotació dels rotors.

Materials

- Laterals: fets de ferro fos;
- Elements intermedis excèntrics: fets d'acer al carboni;
- Rotor: fet de ferro fos nodular;
- Eix: fet d'acer cromat;
- Els compressors també es poden subministrar en acer inoxidable ASTM A744 Gr.CF8 i CF8M (AISI 304 i 316, i altres aliatges subjectes a consulta).

Aplicacions

Els compressors d' anell líquid es fan servir en diferents processos industrials com:

- compressió d' aire i gasos en general
- borboteig en dipòsits de fermentació i fermentadors
- agitació de banys i líquids en general
- alimentació d' aire en cremadors.

Han estat concebuts per utilitzar-se en la indústria química i alimentària, entre d'altres.

Compressor d' anell líquid de dues etapes Pressió alta, 2BG de la marca Nash

Capacitat de 12 a 1000 SCFM (de 20 a 1700 m³/h)

La sèrie de compressors d' anell líquid de dues etapes NASH 2BG proporciona un rendiment fiable i comprovat per a aplicacions de processos continus i per lots. Les compressions 2BG són ideals per a processos exigents, que inclouen la compressió d'ozó i altres aplicacions químiques, de gas i & petroli. Amb una capacitat de compressor que va de 12 a 1000 SCFM (20 a 1700 m³/h), és compressor d'anell líquid 2BG resulta òptim per a aplicacions exigents en els sectors químic, petroquímic i de gas i &leo, inclosa la compressió d'ozó.

El compressor d' anell líquid de dues etapes NASH 2BG es basa en el disseny de la bomba i el compressor d' anell líquid de costat pla. Dissenyat per resistir els processos químics, petroquímics i de gas i petroli més exigents, els compressors 2BG disposen de coixinets de rodets cilíndrics i d' un coixinet de boles rígid amb ranures profundes i ressorts per eliminar el joc. El resultat és un potent compressor d' anell líquid amb baixos requisits de manteniment. Els nostres compressors 2BG poden manejar una àmplia gamma de gasos i poden allotjar líquids de segell especials com petroli o gas quan són compatibles amb el gas del procés

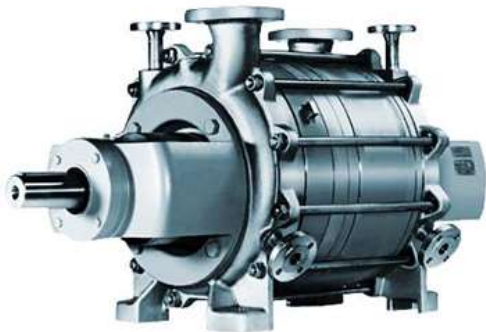


Figura n° Imatge cedida per Nash

- Capacitat de succió: de 12 a 1000 SCFM (de 20 a 1700 m³/h)
- Rang de la pressió de descàrrega: fins a 170 psig (fins a 13 bar abs.)
- Pressió diferencial: fins a 170 psi (13 bar)
- Segells d'eix: Segells mecànics (acció simple/acció doble)
- Materials de construcció: Acer inoxidable, ferro fos.

La destil·lació flash

Els destil·ladors flash, o flash drum com també se'ls coneix, són tambors de destil·lació que utilitzen el concepte de canvi de fase sobtada per obtenir una separació gas-líquid d'una barreja, en general, orgànica.

Aquesta barreja es pot obtenir en un moment del procés industrial o químic, i es requereix una de les dues (o les dues fases per separat) per obtenir un producte específic en el procés de destil·lació. Aquest producte serà el que contingui en major abundància el component d'interès.



Figura nº . Destiladores flash horizontals. Imatge de [ECN](#)

Definició de destil·lació flash

El primer que hem de tenir clar, és què és la destil·lació flash i quines són les seves condicions. El concepte més simple que puc presentar-los és el següent:

La destil·lació flash és un procés de destil·lació que ocorre de manera instantània o sobtada. Ocorre quan una barreja multicomponent o binària en equilibri termodinàmic líquid-vapor, experimenta una expansió o disminució de la pressió o un canvi en la temperatura d'operació. De manera, que es vaporitza immediatament una de les fases ocorrent una separació instantània, quedant els components més volàtils en la fase gasosa i els més estables en la fase líquida.



Figura nº .Flash Drum vertical. Imatge de [AAR](#)

És un concepte que s'utilitza molt en la indústria petrolera i petroquímica per separar mesclades multicomponents (diversos compostos orgànics que es troben dins d'una solució, en general líquida). Tot i que, aquest concepte també és utilitzat per a les més simples d'aquestes, les mesclades binàries.

Per aconseguir una destil·lació flash es requereixen certes condicions d'operació. La més important és que la barreja multicomponent es trobi en equilibri termodinàmic, és a dir, que

les condicions d'operació estiguin entre el punt de burbuja i punt de rocío de la mescla. De manera, que la solució multicomponent reaccioni immediatament davant d'un canvi de temperatura o pressió (aquesta és la més utilitzada) i es realitzi la separació de fases de manera instantània.

Conceptes bàsics de destil·lació flash

Punt d'ebullició o de burbuja: És aquell punt en l'equilibri líquid-vapor on apareix la primera gota de vapor en una barreja líquida.

Punt de rocío: És el punt de l'equilibri líquid-vapor on apareix la primera gota de líquid en una barreja gasosa.

Flash Drum: És un separador instantani. En general, és un tanc simple on s'experimenta una expansió sobtada del fluid, donant origen al canvi de fase. Aquests tancs de destil·lació poden ser horitzontals o verticals, segons la quantitat de líquid que es generi en la destil·lació flash.

Intercanviador de calor: És un equip on s'experimenta un intercanvi d'energia entre el fluid i un refrigerant, o fluid d'intercanvi tèrmic, amb la finalitat de fomentar un canvi en la temperatura o un canvi de fase.

La importància d'aquest tipus de processos és obtenir la separació de la mescla líquida, generalment, mescles d'hidrocarburs que permeten una primera separació atorgant facilitat en el procés de refinació. Tanmateix, va molt més enllà, ja que es poden obtenir gasos rics en components volàtils, que després poden ser canviats de fase per a separacions posteriors i fases de components molt estables, que també poden ser separats en altres processos i comercialitzats

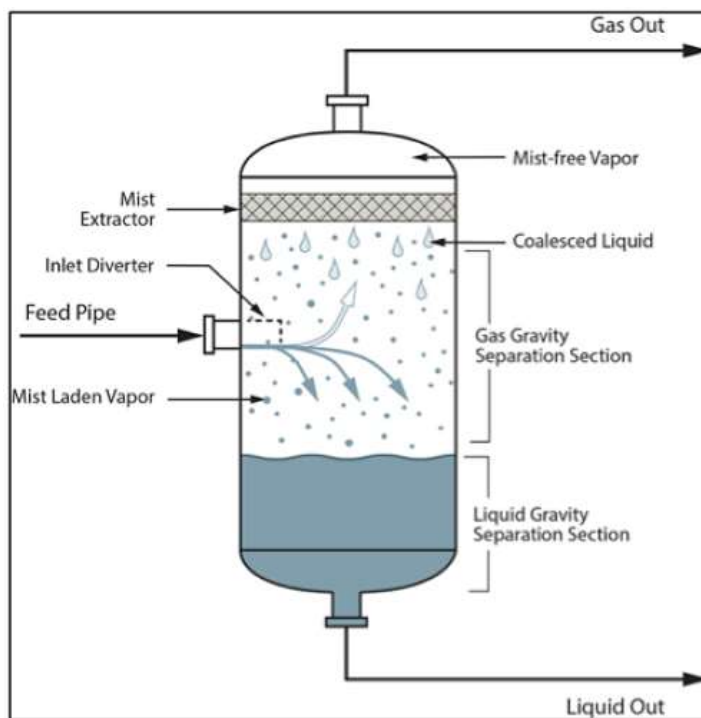


Figura n°. Esquema de funcionament de un destilador flash. Imatge de PetroSkills

El primer a destacar en la teoria per aconseguir una destil·lació flash, és el requeriment d'un intercanvi tèrmic amb la barreja, de manera que assoleixi una temperatura d'ebullició perquè el component amb major pressió de vapor comenci el seu canvi de fase.

La temperatura d'ebullició (de bombolla), no és altra que la necessària perquè aparegui la primera gota de vapor a la barreja líquida i l'inici de l'equilibri líquid-vapor.

En condicions ideals, aquesta temperatura és aquella que s'assoleix quan les pressions

parcials dels components de la barreja (sumades en la seva totalitat) igualen a la pressió d'operació:

$$P_t = \sum_{i=1}^n P^{\circ} i \tilde{x}_i \quad (1)$$

Donde:

P_t = Es la presión total de operación

\tilde{x}_i = Es la fracción molar del componente i en la mezcla

$P^{\circ} i$ = Es la presión de vapor del componente i en la mezcla

Llavors, per calcular aquesta temperatura d'ebullició s'ha d'iniciar un procediment iteratiu on inicialment s'assumeix una temperatura i després, es calculen les pressions de vapor de cada component de la mescla a aquesta temperatura, per finalment verificar si la pressió total d'operació és igual a la sumatòria representada per l'equació anterior.

Perquè una barreja en fase líquida es trobi en equilibri amb la seva fase gasosa, les pressions parcials dels seus components han de ser iguals o gairebé iguals a les pressions parcials de la seva fase gasosa. Ho podem representar així:

$$\tilde{P}_{iL} \cong \tilde{P}_{iG} \quad (2)$$

Donde:

\tilde{P}_{iL} = Es la presión parcial del componente i en fase líquida

\tilde{P}_{iG} = Es la presión parcial del componente i en fase gaseosa

Prenent en consideració la Llei de les pressions parcials de Dalton i la Llei de Raoult per a gasos, arribem a la següent igualtat:

$$P^o i \tilde{x}_i = P_t \tilde{y}_i \quad (3)$$

Donde:

\tilde{x}_i = Es la fracción molar del componente en fase líquida

\tilde{y}_i = Es la fracción molar del componente i en fase gaseosa

$P^o i$ = Es la presión de vapor del componente i

P_t = Es la presión total de operación de fase gaseosa

Prement en consideració només la fase gasosa:

$$\sum_{i=1}^n \tilde{y}_i = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{P^o i \tilde{x}_i}{P_t} = 1 \quad (5)$$

Per complementar, s' utilitzen els coeficients K per realitzar els càlculs de punt de rocío i bombolla de la següent manera:

$$\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{K_i} = 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n K_i x_i \quad (7)$$

Els coeficients K es calculen entrant a uns gràfics o nomogrames, els quals poden trobar en el Manual de l' Enginyer Químic Perry per a hidrocarburs lleugers.

SELECCIÓ DE L' EVAPORADOR

El procés de selecció d' un evaporador és complex, ja cal tenir en compte multitud de factors, algun dels més importants són els següents:

Sistema de circulació de l' aire:

existeixen evaporadors de dos tipus, de circulació natural o convecció natural i els de convecció forçada. Els evaporadors de convecció natural no incorporen ventilador i estan dissenyats per fer circular l'aire per la càmera gràcies als corrents de convecció que de forma natural es creen amb la diferència de temperatures en l'aire. Com podem intuir les velocitats de circulació de l'aire són baixes el que implica que els productes tendeixen a assecar-se menys. Per la mateixa causa, l' intercanvi de calor va a ser petit per la qual cosa el rendiment d' aquest tipus d' evaporadors és menor que els de convecció forçada essent per tant, a igualtat de potència, d' una mida molt superior als que incorporen ventilador. Amb aquestes característiques aquest tipus d' evaporadors s' utilitzen en cambres petites per a productes sensibles a la dessecació com carns sense envasar, verdures, hortalisses i fruites.



Els evaporadors de convecció forçada, incorporen un ventilador que obliga a passar l'aire de la càmera a través de les aletes de la seva bateria. Això permet que l'intercanvi de calor sigui molt intens, tenint un rendiment molt superior al de convecció natural i una mida, a igualtat de potència, molt més compacte. Com a inconvenient podem ressaltar que ressalten més els aliments ja que la velocitat de l'aire dins de la càmera és més gran. Això cal tenir-ho en compte quan es tracti amb productes sensibles a la dessecació; en aquest cas la solució és treballar amb un baix DT o introduir els productes en envasos que impedeixin la pèrdua d'aigua del producte. Aquest tipus d'evaporadors són els més utilitzats en instal·lacions de mitjana i gran potència.

Tipus d'aplicació:

Segons el tipus de recinte refrigerat, l'ús, la forma, la potència, etc. Tenim al mercat un ampli ventall de possibilitats a l'hora de triar un evaporador. Basta mirar el catàleg de qualsevol fabricant

per adonar-nos-en. És important saber triar l'adequat per a la nostra instal·lació, això permetrà que la distribució de les temperatures sigui homogènia i la velocitat de circulació de l'aire la correcta en tot el recinte refrigerat. A continuació, s'enumeren alguns dels que podem trobar al mercat:

- Evaporadors cúbics: se solen instal·lar al sostre o la paret. Són molt utilitzats en cambres industrials de mitjana i gran potència.
- Evaporadors de sostre de doble flux: apropiats per a sales de treball, sales d'espejament, etc.
- Evaporadors murals per a petites cambres.
- Evaporadors de plafó per a petites cambres.
- Evaporadors de sostre de flux inclinat per a cambres comercials.
- Evaporador amb ventilador centrífug per a distribució per conductes.
- Evaporador de baixa velocitat per a productes sensibles a la dessecació.

En qualsevol cas, tots els fabricants ens indiquen l'aplicació de cadascun dels seus models d'evaporador.

Separació de les aletes:

Una altra de les coses a tenir en compte a l'hora de seleccionar un evaporador és la separació que tenen les aletes de la bateria. El triar una separació o una altra depèn de si es va a formar escletxa en l'evaporador i la velocitat de formació de la mateixa. La capa d'escletxa formada sobre les aletes va augmentat de gruix amb el pas del temps i si aquestes estan molt juntes l'evaporador quedarà atacat de gel molt ràpid impeding la circulació d'aire i amb això la transmissió de calor, sent necessaris cicles de descarxament molt freqüents.

En el cas que no sigui previsible la formació d'esclatxa en l'evaporador (temperatura d'evaporació superior a 0°C) podem recórrer a evaporadors amb menor separació entre les seves aletes (3 – 4 mm). En el cas que es prevegi la formació d'esclatxa cal augmentar el pas entre aletes (4,5 – 6 mm per a instal·lacions de conservació amb temperatures d'evaporació sota zero i 7 – 10 mm per a aplicacions conservació de congelats i 12 mm per a congelació). Normalment el fabricant indica la separació d' aletes i si l' evaporador és per a conservació o congelació.

Sistema de descarxament:

En el cas que l' evaporador necessiti descongelació, cal tenir en compte el sistema de descarxament que es vulgui utilitzar. N' hi ha fonamentalment tres:

- Circulació d' aire per l' evaporador: s' aplica a cambres petites la temperatura d' evaporació de les quals és propera a 0°C.
- Per resistències elèctriques: és el sistema més utilitzat en instal·lacions comercials i industrials de mitjana potència. El fabricant sol indicar si l' evaporador porta instal·lades les resistències i la potència de les mateixes.
- Per gas calent: molt utilitzats en instal·lacions d' evaporació múltiple i industrials.

Selecció de l' evaporador

Aquest procés consisteix a determinar el model de l' evaporador que millor s' adapta a les característiques de la nostra instal·lació. El model s' ha d' elegir a partir de les taules que figuren en els catàlegs dels fabricants, ja que és aquí on apareixen tots els paràmetres i factors de correcció que ens va a permetre decidir quin el més adequat. Cada fabricant edita les seves pròpies taules de selecció i solen ser diferents entre un fabricant i un altre, per tant, l' important és quedar-se amb la metodologia general que se'n va a explicar a continuació, per a posteriorment ser capaç d' utilitzar de forma adequada la diversitat de taules i àbacs de selecció que podem trobar-nos. Com en el cas de la selecció de compressors, alguns fabricants han desenvolupat programes informàtics per a selecció d' evaporadors que fan més fàcil la tasca. Com ja sabem, el primer element de la instal·lació que s' ha de calcular i seleccionar és el compressor i cal procurar que l' evaporador tingui la seva mateixa potència frigorífica. Altrament el sistema quedarà desequilibrat i el funcionament de la instal·lació no serà el més correcte.

Suposem que el compressor està ben seleccionat però l' evaporador elegit no té la mateixa potència frigorífica. En aquest cas quan la instal·lació comenci a funcionar se'n va a "auto-regular" i podem trobar-nos dues situacions:

- Si l' evaporador és de menor potència que el compressor, quan durant el funcionament s' assolixi l' equilibri, el DT de treball de la instal·lació serà més gran del previst i això implica que la humitat relativa serà més baixa del desitjable desitjant-se una mica més el producte.
- Si l' evaporador és de major potència que el compressor, passarà exactament el contrari, corrent el risc que apareguin fongs, fongs, etc...

És difícil trobar un evaporador que proporcioni la mateixa potència que el compressor, el que cal fer és seleccionar el que més s' apropri i comprovar que la humitat relativa que es desenvoluparà a la cambra amb el par compressor –evaporador seleccionat– no difereix gaire del previst en les condicions inicials.

L'Evaporador – Tipus i Característiques

L' evaporador és l' aparell destinat a la producció de fred a l' interior del recinte mitjançant l' absorció de calor d' aquest, utilitzant per a això l' evaporació d' un líquid.

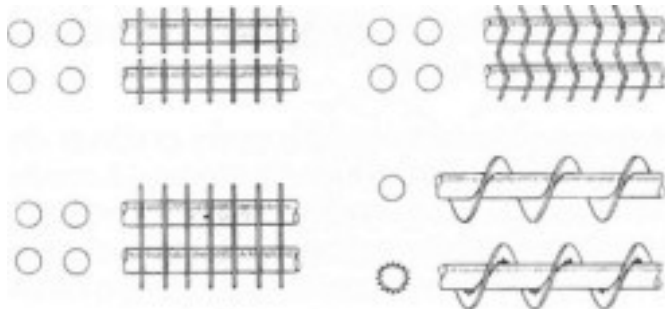
Es tracta per tant d' un intercanvi de calor, que en funció de la capacitat requerida, necessita una determinada superfície d' intercanvi. L' evaporador és l' element que proporciona finalment la temperatura necessària per a la conservació dels productes, mitjançant el canvi d' estat d' un determinat fluid refrigerant, a una pressió i temperatura donades

Tipus d' evaporadors

Es poden establir diversos criteris de classificació dels evaporadors:

Segons com estiguin Construïts

Es pot observar que en la construcció dels evaporadors solen utilitzar-se tubs llisos proveïts d' aletes que permeten augmentar la superfície de transmissió en alguns tipus o bé construïts amb plaques.



Diversas formas de aleteado de tubos.

No s' utilitzen tubs corrugats perquè aquests tenen menor coeficient de transmissió de calor a causa de les ràpides incrustacions de gel que es produeixen.

Els tubs llisos són d' acer quan s' utilitza R717 i se solen trobar en evaporadors de grans capacitats. Per als refrigerants fluorats s' utilitza el coure i solen emprar-se de forma unitària en instal·lacions de menors dimensions, o bé de diversos evaporadors.

Si als tubs llisos se'ls col·loca unes aletes o plaques metàl·liques, soldades o expandides, a pressió sobre els tubs, s' aconseguix augmentar considerablement la superfície d' intercanvi de calor.

Els tubs formen un serpentí i les distàncies de separació entre ells o la de les aletes és variable, sent en general major la densitat com més gran és la temperatura i viceversa, a causa de les exigències de circulació d' aire; si les aletes estan molt juntes s' omplen d' esclatxa impedeixen la circulació d' aire. Per a temperatures baixes el nombre d' aletes pot

oscil·lar de 2 a 3 aletes/polzada, i per a temperatures de refrigeració pot arribar a ser de fins a unes 14 aletes/polzada. El fet d'utilitzar aletes o plaques representa una disminució de mida de l'evaporador, ja que aquestes augmenten el coeficient de transmissió per a una mateixa superfície total d'intercanvi. L'aire sol ser forçat a circular mitjançant ventiladors.



Evaporadores de Superfície de Placa

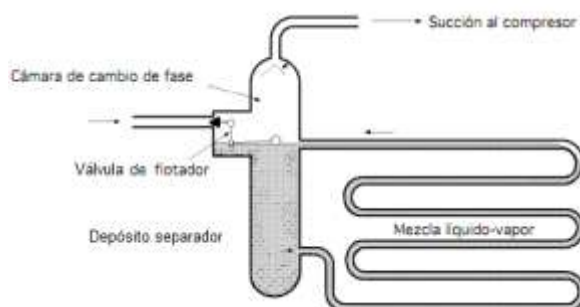
Figura n° .Evaporadors de superfície.

Per a petits congeladors, com els de tipus domèstic, es fabriquen també evaporadors consistents en dues plaques generalment planes, metàl·liques, soldades per punts, de manera que pel seu interior circuli el refrigerant.

Segons com es Comporti i Circuli el Refrigerant

Si tot el líquid refrigerant que penetra en l'evaporador es converteix completament en vapor en l'interval de temps que mitjana des que entra fins que surt per l'altre extrem, el refrigerant arribarà a la canonada d'aspiració del compressor en forma de vapor. Per al seu funcionament sol utilitzar-se una vàlvula d'expansió termostàtica que regula el pas del líquid d'acord amb l'aspiració del compressor, de manera que només deixa entrar la quantitat que pot ser vaporitzada totalment. Per aconseguir aquest efecte sol ser necessari un reescalfament d'uns 8 o 10 ° C aproximadament o major en algunes ocasions.

Això suposa una variació del treball del compressor i un sobredimensionament de l'ordre del 15% de la superfície total de l'evaporador. No obstant això, a causa de la seva senzillesa de disseny i al seu menor preu (penseu que l'evaporador és un dels elements més cars de tota la instal·lació) és el procediment més utilitzat.



Quan els evaporadors s' omplen completament de líquid refrigerant, se' ls anomena de tipus inundat. En aquest cas, el nivell del líquid es controla mitjançant una vàlvula de flotador que es tanca i no deixa passar més líquid quan s' assoleix el nivell fixat.

Mitjançant aquest sistema, s' aconsegueix augmentar el rendiment de l' evaporador fins a un 20% aproximadament. També s'empren dispositius de columna de mercuri per obrir i tancar contactes. Un altre tipus d' evaporador és aquell en què la circulació del refrigerant es controla regulant el cabal mitjançant una vàlvula fixa que dóna pas a una bomba. En aquests, hi ha un excés de líquid, per la qual cosa sol anomenar-se de tipus sobrealimentat; l'excés de líquid se separa del vapor, es recull en un col·lector i es recircula de nou cap a l'evaporador, mentre el vapor és aspirat cap al compressor. Com més gran és el nombre de recirculacions de líquid, més gran és el rendiment de l' evaporador en general.

C) Segons el Mètode de Circulació de l' Aire

Cal procurar que l' aire que circula a l' interior de la cambra o recinte que es vol refrigerar, ho faci de forma adequada, ja que la seva velocitat és essencial en els intercanvis de calor entre l' ambient, els productes i l' evaporador. No tots els productes i el seu període de conservació tenen les mateixes exigències tèrmiques ni de grau d' humitat. L' adequada velocitat de circulació de l' aire està íntimament relacionada amb aquests aspectes.

L' aire pot circular per simple convecció natural assegurada pels gradients tèrmics que es produeixen a les diferents zones. La velocitat de moviment en aquest cas és baixa i els seus efectes deshidratants sobre les superfícies dels productes, en particular els no empaquetats o embolcallats, és mínima. La seva utilització és més extensa en el camp de petits congeladors domèstics, armaris o mobles d' exposició en locals de venda, o en magatzems de refrigeració.



Figura nº . Evaporador horitzontal de superfície

Quan s'utilitzen ventilació per a la succió o impulsió de l'aire per tal d'obligar-lo a passar per entre els serpentins de tub llis amb o sense aletes metàl·liques, es tracta d'evaporadors de convecció forçada. Són molt utilitzats, i en grans instal·lacions els serpentines poden ser secs o humits, tal com ja s'ha explicat en apartats anteriors.

Refredadors

Aquests aparells es poden classificar també pel tipus de fluid que s'hagi de refredar. Com es pot observar, es poden utilitzar per refredar líquids o gasos, generalment aire. Per a refredament de líquids, en indústries de llet, most, vi, cervesa, aigua, etc., es poden també emprar diferents procediments.

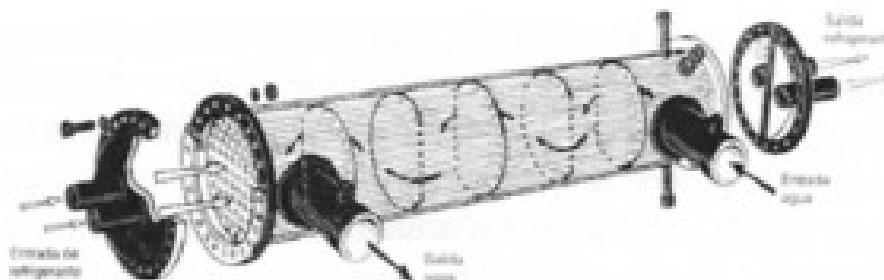


Figura nº. Refredador de feixos

En els d'immersió, els serpentines són de diversos dissenys i estan totalment submergits en el líquid a refredar. Són molt utilitzats amb refrigerants cloro fluorats (R12). Quan s'utilitzen R717 i R22, els submergits es fabriquen amb una disposició tubular transversal a base d'uns rastells que s'introdueixen en el líquid a refredar. Tenen dos tubs de major diàmetre juntament amb altres transversals de menor diàmetre. Amb això s'aconsegueix augmentar el coeficient global de transmissió i disminuir la pèrdua de càrrega en el refredador. Els refredadors de tipus tanc s'utilitzen per a qualsevol classe de líquids, com l'aigua, salmorra, etc., o altres fluids usats com a refrigerants secundaris. Els de doble tub a contracorrent consisteixen en dos tubs situats un a l'interior de l'altre; el fluid a refredar circula en una direcció pel tub interior, mentre que pel tub exterior circula el refrigerant en sentit contrari. Com que ocupen molt d'espai s'utilitzen només en indústries del vi, cervesa, petroli, etc.

Probablement els més utilitzats siguin els refredadors multitubulars, d'emboigiment o carcassa i tubs, verticals o horitzontals, treballant en expansió seca o inundats. Segons siguin d'un o altre tipus, el líquid a refredar passa per l'interior dels tubs o per la carcassa. Sol estar impulsat mitjançant una bomba de tipus centrífug, sent les dimensions de la carcassa i el nombre de tubs molt variable, segons les capacitats. Per refredar aire també es poden fer servir dues modalitats: els refredadors de tipus sec i els de tipus humit. En els de tipus

sec existeix una paret o superfície metàl·lica de separació entre l'aire i el fluid refrigerant a través de la qual es realitza l'intercanvi de calor. Els més usats són els evaporadors o bateries de convecció forçada impulsant l'aire a la càmera. En la seva part inferior solen rentar una cubeta per recollir l'aigua de descarxament. En els de tipus humit hi ha un contacte directe entre l'aire i el fluid refrigerant normalment aigua podent-se del tipus de cascada o pluja i fent circular aire a contracorrent. Aquí quatre exemples:

Sistemes de Descarxament.

El vapor d'aigua que es troba en suspensió en l'aire que travessa l'evaporador, la temperatura del qual és inferior a la de la cambra, si està per sota dels 0°C es diposita en forma d'esclatxa sobre les parets de l'evaporador. A més de les obertures de portes, amb les consegüents entrades d'aire calent i humit, els productes emmagatzemats malbaraten també humitat, cristal·litzant el gel i arribant a impedir el pas de l'aire, ja que en convertir-se en un mitjà menys conductor, dificulta la deguda transmissió tèrmica.



Tot això contribueix al fet que, en descendir la temperatura del refrigerant en ebullició a l'interior de l'evaporador, disminueixi la producció frigorífica, augmenti el temps de funcionament dels compressors i s'elevi el grau higromètric. Per això, cal realitzar periòdicament el descarxament dels evaporadors. Per descarxament el gel format a la temperatura que es troba en els evaporadors d'una cambra, cal valer-se d'aportacions de calor suplementàries per fondre'l. Els mitjans més utilitzats en la refrigeració comercial i industrial són els següents:

Per aigua

- Per elements de calefacció elèctrica
- Per gas calent procedent de la descàrrega del compressor

El primer dels sistemes es realitza per polvorització d'aigua. Una pluja d'aigua a pressió sobre les capes de gel acumulades a les aletes de l'evaporador, fon el gel i neteja l'evaporador. És un sistema que s'empra quan la temperatura d'evaporació no és gaire baixa (per sobre dels 4 °C), i és un bon mètode quan el sistema de condensació és per aigua, ja que així es pot aprofitar l'aigua reescalfada que surt dels condensadors. Normalment, per a instal·lacions de congelats s'utilitzen més els altres sistemes, per la qual cosa es parlarà de cadascun d'ells en els següents apartats.

Descongelació per Resistències Elèctriques

És un sistema còmode, fàcil d'instal·lar i relativament senzill de regular i controlar, per la qual cosa es pot dir que és el més generalitzat. Un joc de resistències elèctriques acoblades a l'evaporador, en íntim contacte amb les aletes, s'encarrega d'escalfar el gel fins a fondre'l per complet. Els problemes que es poden presentar amb aquest mètode són: Escalfament del refrigerant que hi pugui haver a l' evaporador en fase líquida. Una vegada que acaba el desgel, les resistències puguin romandre connectades, amb el perill que es funden, per augmentar la seva temperatura de forma excessiva i anormal. Per a tots dos casos hi ha una solució. En el primer, s' ha d' efectuar un procés de buidatge previ. En el segon, la instal·lació d'un control, bé un

termòstat o pressòstat, que indiqui el final del cicle de descongelació, elimina la possibilitat de fusió de les resistències. El sistema de descarxament per resistències elèctriques es pot automatitzar de diferents maneres:

Mitjançant un rellotge temporitzador es controla el funcionament de la vàlvula solenoide de líquid, dels ventiladors i del joc de resistències. Quan el temporitzador produeixi un cicle de descarxament, s'aturen els ventiladors i tancarà la vàlvula solenoide. Llavors la instal·lació entra en un procés de buit, i les resistències entren en servei quan sembla el compressor, en estar aquest governat per un pressòstat de baixa, necessita un temps abans d'aturar per baixa pressió.

Un cop fet el descarxament controlat per temps, es tornarà a obrir la vàlvula solenoide deixant passar líquid; llavors, per augment de pressió en el circuit, el compressor tornarà a activar-se. Les resistències i el compressor van enclavats i no poden funcionar alhora

Les resistències solen anar controlades per un termòstat, que obre el circuit en aconseguir la temperatura de consigna de final de descarxament, obrint la vàlvula solenoide encara que no hagi passat el temps de descarxament.

Els ventiladors no s' activaran immediatament després d' acabat el descarxament, sinó que se' ls donarà un temps de retard amb el temporitzador, o bé mitjançant un termòstat que controli el ventilador. Aquest retard és per evitar que s'introdueixi aire calent a la càmera, i es pot restablir la temperatura de servei de l'evaporador.

A més, en el cas de quedar refrigerant líquid a l' evaporador, aquest es refreda ràpidament i es vaporitza, assegurant així que no es produeixi cap tipus d'absorció líquida per part del compressor, tot i que aquest problema se soluciona col·locant un acumulador de succió. La safata de desguàs va igualment calefactada, per evitar que l'aigua o plaques de gel que cauen es tornin a congelar.

Descarxament per Gasos calents

L'energia calorífica que subministra una resistència elèctrica d'1 kW durant una hora representa 860 kcal/h. La mateixa potència elèctrica facilitada pel motor elèctric que acciona un compressor frigorífic permet alliberar en l' evaporador una potència frigorífica, variable segons les condicions de treball de la màquina, d'al voltant de 1.800 kcal/h, i dissipar per tant en el condensador 2.600 kcal/h, és a dir, 3 vegades més del que faciliten els mateixos quilowatios utilitzats en les resistències elèctriques. La utilització d'aquesta energia calorífica sembla doncs interessant per al descarxament, tot i que s'ha de reconèixer que el potencial tèrmic d'aquesta energia calorífica (temperatura de gasos de descàrrega), és menys elevat que el de la resistència d'escalfament (temperatura superficial de la resistència); de tota manera, és prou elevat per obtenir el descarxat dels evaporadors, per la qual cosa el sistema és tècnicament molt atractiu.

No obstant això, en ser reduïda la calor específica dels vapors descarregats pel compressor, l' operació es faria molt llarga si no s' utilitzés conjuntament la calor latent de condensació dels gasos, la qual cosa implica la re evaporació del líquid format a l' evaporador durant el descarxament . Aquesta re evaporació es pot assolir de diferents maneres, la qual cosa permet disposar de diversos procediments:

- Descarxament per sistema del reevaporador.
- Descarxament per banc tèrmic (Thermo-bank)

Descarxament per inversió de cicle

No anem a explicar cadascun d' aquests sistemes, però si convé dir que, igual que amb la resistència, cal donar un temps de retard de connexió dels ventiladors dels evaporadors, pels mateixos motius exposats anteriorment. Tot i això, el descarxament per gasos calents també té una sèrie d'inconvenients que cal tenir en compte a l'hora de realitzar la instal·lació.

Entre aquests inconvenients hi ha el que l' entrada de líquid, en la majoria d' evaporadors, es fa normalment per dalt, i la de succió per baix. Quan s' inverteix el cicle, aquest sistema dona lloc a problemes de retorn de líquid, ja que el gas calent entra per la base, la qual cosa requereix que l' evaporador s' ompli totalment de líquid, abans que pugui desguassar en el circuit líquid. Aquest mètode no és recomanable, ja que per a això cal incrementar la càrrega de refrigerant, i això pot donar lloc a la necessitat d' un dipòsit de líquid de major capacitat. Per tant, es recomana que l' entrada de líquid de l' evaporador sigui per baix, per la qual cosa requereix un evaporador de diferent disseny.

Un altre petit problema que presenta el descarxament per gasos calents, és el fet que els motors dels compressors funcionen més temps que si es fa per resistències. Això, quan la instal·lació funciona en condicions de règim normal, no presenta cap problema, ja que els motors treballen entre 12 i 14 hores. Ara bé, quan es presenta un cas de sobrecàrrega tèrmica (com ocorre en ple estiu) i la introducció de gènere és molt elevada, on els compressors funcionen al voltant de 18 hores, si a més se li suma el temps de descarxament,

pot arribar a suposar un total d'unes 20 hores, que són moltes hores de funcionament, podent arribar a deteriorar la màquina per esgotament. Això, en una màquina de petita potència, per exemple una vitrina, pot no suposar un problema greu, però en màquines grans no només suposa un cost elevat d'aquestes màquines, sinó que pot ser necessari haver d'aturar una instal·lació, o que les altres màquines treballin sempre al màxim rendiment fins a la seva reposició.

Índex parcial III:

- **Electrolitzadors**
 - **Introducció**
 - **Fonaments de l' electròlisi de l' aigua.**
 - **Termodinàmica Electroquímica**
 - **Característiques generals dels electrolitzadors**
 - **Electrolitzadors alcalins d' aigua**
 - **Intercanvi de protons. Electrolitzadors de membrana**
 - **Conversió de reacció com a reactor de membrana**
 - **Proposta de electrolitzadors alcalins. Hidrogenics. Hystat**
 - **Especificacions tècniques**
 - **Figures i esquemes de les parts d'equip principals**
 - **Diferents configuracions.**
 - **Bibliografia**

Electrolitzadors

Introducció



L'electròlisi és el mètode més important per obtenir hidrogen de l'aigua. És una tecnologia madura basada en la generació d' hidrogen i oxigen mitjançant l' aplicació d' un corrent elèctric directe a l' aigua per dissociar-la. L' hidrogen obtingut amb aquesta tecnologia té una alta puresa que pot assolir el 99,999 vol.% un cop l' hidrogen produït s'ha assecat i s'han eliminat les impureses d' oxigen. Atès que l' hidrogen electrolític és adequat per ser utilitzat directament en piles de combustible de baixa temperatura, aquests nivells de puresa són de gran avantatge enfront tant als combustibles fòssils com als processos basats en biomassa. Depenent de la mida del sistema d'electròlisi, el cost de processament oscil·la entre els 3 i els 15 euros per quilogram d' hidrogen.

Els sistemes de producció d' hidrogen d' electròlisi hídrica subministrats per energies renovables estan atraient un interès cada vegada més gran, ja que es consideren els únics que poden obtenir grans quantitats d' hidrogen sostenible sense emissió de gasos contaminants ni consum de recursos fòssils o nuclears. Pel moment, aquests sistemes es limiten, però, a alguns projectes de recerca i desenvolupament.

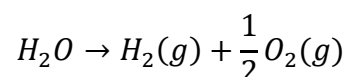
Aquest article revisa l' estat actual i les tendències futures de la producció d' hidrogen a partir de l' electròlisi de l' aigua. Es fa èmfasi en el potencial per utilitzar les energies renovables com a font d' energia primària. En primer lloc, es presenten els fonaments del procés d'electròlisi i la configuració de les cèl·lules d'electròlisi. A continuació, es delega una secció per a cadascuna de les principals tecnologies d' electròlisi de l' aigua: alcalina, PEM i empreses estatals. Posteriorment, es discuteix la integració de les unitats de producció d' hidrogen amb les energies renovables tant en sistemes autònoms com connectats a la xarxa. Finalment, es descriuen alguns dels projectes de demostració més rellevants a nivell mundial sobre hidrogen renovable produït a partir de l' electròlisi de l' aigua.

Fonaments de l' electròlisi de l' aigua.

L' aigua electrolític consisteix a fer circular un corrent a través de l' aigua per separar les seves molècules en hidrogen i oxigen. El corrent flueix entre dos elèctrodes separats i immersos en un electrolític per elevar la conductivitat iònica. Els elèctrodes han de ser resistents a la corrosió, tenir una bona conductivitat elèctrica, exhibir bones propietats catalítiques i mostrar una estructura adequada.

S' ha d' evitar que l' electrolític tingui algun canvi durant el procés, per tant, és important que no reaccioni amb els elèctrodes.

El procés d' electròlisi requereix la implementació d' un diafragma o separador per evitar la recombinació de l' hidrogen i l' oxigen generat en els elèctrodes. La resistència elèctrica del diafragma evita el curtcircuit dels elèctrodes. Tanmateix, el diafragma ha de tenir una alta conductivitat iònica. Finalment, els diafragmes han de mostrar una alta estabilitat tant física com química. Els elèctrodes, el diafragma i l' electrolític són els elements que configuren la cel·la electrolítica. La reacció global d' electròlisi que té lloc és



En el procés d'electròlisi, els electrons són presos o alliberats pels ions en la superfície dels elèctrodes, generant un sistema multifàsic gas-líquid-sòlid. La reacció a mitja reducció té lloc al càtode. Els electrons flueixen a aquest elèctrode des del circuit exterior i el polaritzen de forma negativa. La semireacció d'oxidació passa en l'altre elèctrode, anomenat ànode. Els electrons surten de l'ànode cap al circuit exterior, polaritzant-lo positivament. Per tant, l'hidrogen es genera en el càtode i l'oxigen en l'ànode.

Termodinàmica

Un electrolitzador d'aigua és un dispositiu electroquímic que converteix l'energia elèctrica i tèrmica en energia química emmagatzemada en un combustible (hidrogen). Els processos que ocorren en una cel·la d'electròlisi es poden descriure d'acord amb els fonaments de la termodinàmica [40], [41]. Quan una cel·la electrolítica funciona a temperatura i pressió constants, l'energia requerida per a la reacció d'electricitat de l'aigua està determinada pel canvi d'entalpia del procés (ΔH). Perquè aquesta reacció tingui lloc, part de l'energia ha de ser elèctrica. Aquesta part correspon al canvi d'energia lliure de Gibbs (ΔG). La resta és energia tèrmica (Q) i igual al producte de la temperatura de procés (T) i el canvi d'entropia (ΔS). La següent expressió mostra la relació entre aquestes magnituds termodinàmiques:

$$\Delta G = \Delta H - Q = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

El procés d'electròlisi és una reacció química endotèrmica ($\Delta H > 0$) i no espontània ($\Delta G > 0$). El procés invers passa a les piles de combustible, i és exotèrmic ($\Delta H < 0$) i espontani ($\Delta G < 0$). El voltatge reversible de la cel·la V_{rev} és el més baix requerit voltatge perquè tingui lloc l'electròlisi. Aquest voltatge es pot expressar en funció de ΔG per mitjà de

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{z \cdot F}$$

on z és el nombre de mols d'electrons transferits per mol d'hidrogen ($z=2$) i F és la constant de Faraday, que representa la càrrega sobre un mol d'electrons (96 485 C/mol). Si l'energia tèrmica $T \cdot \Delta S$ se subministra per mitjà d'electricitat, com és el cas en la majoria dels comercials electrolitzadors, el voltatge mínim perquè ocorri l'electròlisi de l'aigua es coneix com a voltatge termo neutra (V_{tn}). En un procés d'electròlisi ideal ($V_{\Delta H}$) és igual a la tensió d'entalpia ΔH ja que l'energia total requerida és igual al canvi d'entalpia (ΔH). En aquest cas, tant $V_{\Delta H}$ com V_{tn} es pot obtenir de la següent expressió:

$$V_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{z \cdot F} \rightarrow \text{ideal proces} \rightarrow V_{tn} = V_{\Delta H}$$

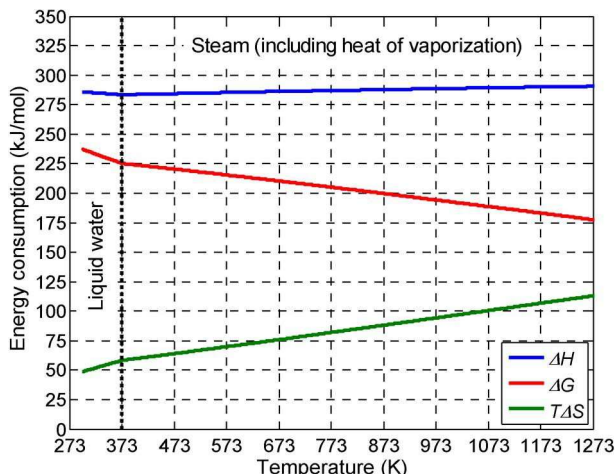
No obstant això, en un procés d'electròlisi real, $V_{tn} > V_{\Delta H}$. La raó és el consum addicional d'energia, tant elèctrica com tèrmica, causat per irreversibilitats termodinàmiques. que estan relacionats principalment amb el vapor d'aigua contingut en els fluxos d'hidrogen i oxigen, la menor temperatura i pressió de l'aigua de subministrament respecte als punts d'ajust d'operació, i el fet que el procés no és realment adiabàtic, la qual cosa dona dret a pèrdues tèrmiques a causa de la convecció i la radiació [42].

En estàndard temperatura i pressió (298.15 K i 1 atm), $\Delta G_0 = 237,21$ kJ/mol, $\Delta S_0 = 0,1631$ kJ/mol K, i $\Delta H = 285,84$ kJ/mol [43]. Substituint ΔG_0 i ΔH_0 en (3) i (4), el reversible i termo-neutral els voltatges d'una cel·la electrofítica en condicions estàndard són Obtingut: $V_{rev} = 1.229$ V i $V_m = 1.481$.

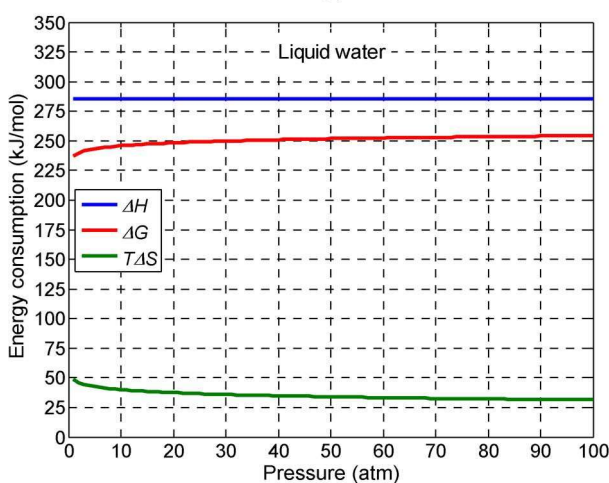
El consum d'energia del procés d'electròlisi depèn, però, de la temperatura i la pressió. Els canvis en aquestes magnituds influeixen en les tensions característiques (V_{rev} i V_{tn}). La Fig. 1(a) mostra l'evolució del consum d'energia del procés a pressió estàndard per a un rang de temperatura de 298 a 1273 K (de 25 °C a 1000 °C). L'energia elèctrica demandada per la reacció d'electròlisi L1G disminueix a mesura que augmenta la temperatura; en el d'altra banda, la demanda tèrmica $T \cdot \Delta S$ augmenta. A l'estat líquid, el consum total d'energia ΔH disminueix lleugerament (entre 298 i 373 K) a mesura que la temperatura

incrementa, mentre que en estat gasós augmenta una mica. Cal assenyalar que per damunt de 373 K la calor latent de vaporització d'aigua (aproximadament 40,8 kJ/mol) s'ha de comptabilitzar en la demanda total d'energia del procés. El consum d'energia elèctrica és significativament menor a altes temperatures. Aquesta és la raó per la qual l'electròlisi de vapor té un gran potencial. Per exemple, quan la temperatura augmenta de 25 oC a 1000 oC, ΔG disminueix de 237.2 a 177.5 kJ / mol, cosa que significa una reducció del 25.1%. Tanmateix, es requereix una font de calor amb una temperatura prou alta per cobrir la demanda tèrmica del procés. De 25 oC a 1000 oC, $T \cdot \Delta S$ augmenta de 48.6 a 112,9 kJ/mol, és a dir, el 132,3%.

La Fig. 1(b) mostra la influència de la pressió en el consum d'energia quan s'opera a temperatura estàndard (298.15 K). A aquesta temperatura i dins del rang de pressió (1–100 atm), la reacció té lloc a l'estat líquid. La demanda d'energia elèctrica ΔG augmenta amb una tendència logarítmica a mesura que augmenta la pressió; més pre-Augmenta un 7,3% quan la pressió passa d'1 a 100 Atm. Contràriament a la demanda elèctrica, el consum tèrmic de reacció, $T \cdot \Delta S$, disminueix a mesura que augmenta la pressió. D' 1 a 100 unitats, disminueix un 35,5%. El consum net d'energia de la reacció d'electròlisi, ΔH , es manté pràcticament constant malgrat la pressió incrementa. A penes disminueix un 0,03% si la pressió puja d'1 a 100 Atm. En aquest sentit, l'increment de la demanda elèctrica dins del rang de pressió analitzat, 17,2 kJ/mol, es compensa amb la disminució de la demanda tèrmica.



(a)



(b)

Figura n° energia consumida per pressió

Electroquímica

Quan se subministra un corrent continu (dc) a una electròlisi cel·la de producció d'hidrogen, la cel·la de voltatge V_{cell} incrementa respecte a V_{rev} . Això es deu a les irreversibilitats cel·lulars, principalment sobretensions i corrents paràsits, que generen pèrdues d'energia i limiten l'eficiència cel·lular. La cel·la de voltatge d'electròlisi V_{cell} es pot expressar com la suma del voltatge reversible i les sobretensions addicionals que apareixen a la cel·la:

$$V_{cell} = V_{rev} + V_{Ohm} + V_{act} + V_{con} \quad (5)$$

El terme V_{ohm} en (5) és la sobretensió causada per les anomenades pèrdues òhmiques. Aquestes pèrdues són causades primer per la resistència de diversos elements de la cel·la.

col·lectors, interconnexions, etc.) als electrons flueixen. També són conseqüència de l'oposició al flux d'ions de l'electròlit, les bombolles de gas i el diafragma. El voltatge Vohm és principalment proporcional al corrent elèctric que flueix a través de la cèl·lula. El terme Vact, conegut com el sobretensió d'activació, es deu a la cinètica dels elèctrodes.

La transferència de càrrega entre les espècies químiques i els elèctrodes demanda energia. Aquesta barrera energètica que la càrrega ha de superar per passar dels reactius als elèctrodes i viceversa depèn en gran mesura de les propietats catalítiques dels materials de l'elèctrode. Causa una sobretensió a través dels elèctrodes Vact. L'anòdic a mitja reacció produeix molt sobretensió d'activació més alta que la meitat catòdica-reacció. El acte V és altament no lineal i es comporta amb una tendència logarítmica respecte al corrent elèctric que flueix a través de la cel·la [45].

El terme Vcon, conegut com a sobretensió de concentració, és causat per processos de transport de massa (convecció i difusió). Les limitacions de transport redueixen la reacció mentre augmenta la concentració dels productes en la interfície entre la elèctrodes i l'electròlit. Normalment, Vcon és molt més baix que Vohm i Vact, especialment en el cas d'electròlisi alcalina.

La relació entre el voltatge cel·lular (Vcell) i l'icell curant li dona la corba de caracterització I-V, que caracteritza el comportament electroquímic d'un electrocèl·lula electrolítica. La corba I-V depèn en gran mesura de la temperatura del procés d'electròlisi. Per a un corrent donat, els voltatges de reversible, òhmic i d'activació disminueixen a mesura que augmenta la temperatura, i també ho fa el voltatge de la cel·la. D'altra banda, els canvis en la pressió del procés a penes influeixen en les corbes I-V [44], [46].

A la Fig. es proporcionen dues corbes característiques I-V d'una cel·lula electrolisi alcalina per a temperatures de funcionament de 25 °C i 65 °C. [44]. El punt d'ajust de pressió és de 20 bar

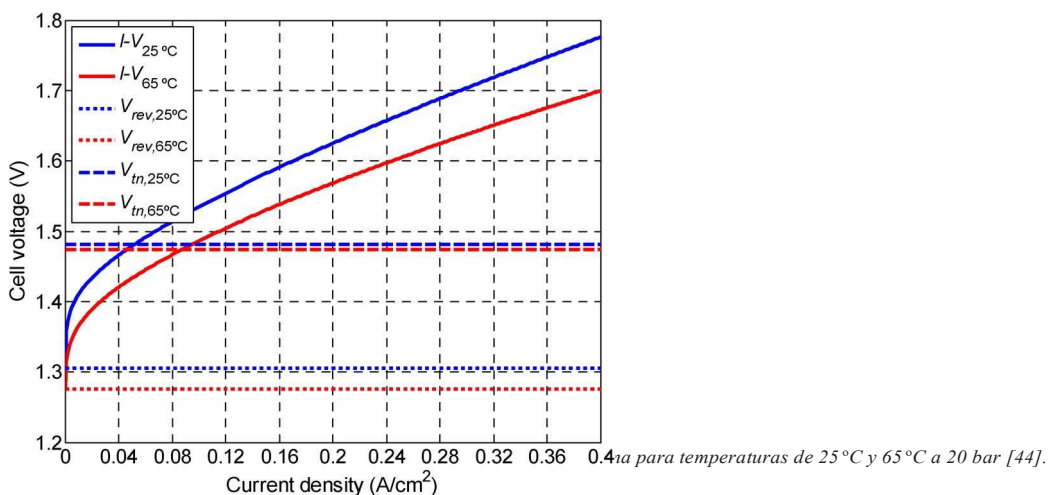


Figura n°. Gràfic cell voltatge (V) per corrent density (A/cm²)

totes dues corbes. Les corbes I-V es representen comunament en termes de densitat de corrent f per permetre la comparació de cel·les de diferents àrees de superfície. Els voltatges reversibles i termoneutres també es mostren per a les mateixes condicions de treball. Tant V_{rev} com V_{tn} disminueixen a mesura que augmenta la temperatura, sent V_{rev} més sensible que V_{tn} . Al principi, l'evolució de la tensió de la cel·la amb el corrent és logarítmica, mentre que es torna lineal a mesura que augmenta el corrent. En el rang de baixa corrent de la corba, predominen els fenòmens d'activació, mentre que per als corrents alts, els fenòmens òhmics i, en menor

mesura, de concentració també són considerables. El voltatge de la cel·la per a qualsevol corrent, i en conseqüència el consum d'energia de la cel·la, és menor a 65 °C que a 25°C. Les corbes I-V mostren que, quan el voltatge de la cel·la és inferior a V_{rev} , el corrent de la cel·la és nul·la i la reacció d'electròlisi no té lloc. Quan el voltatge de la cel·la es troba entre V_{rev} i V_{tn} , s'ha de subministrar calor perquè es produeixi l'electròlisi. Aquesta potència tèrmica és igual al producte de la diferència de voltatge entre la cel·la V_{tn} i la celda V , i la cel·la de corrent I (corresponent a la cel·la V de voltatge de la cel·la). Quan la tensió de la cel·la és més gran que V_{tn} , la potència subministrada a la cel·la és sempre més gran que la mínima requerida en el procés ($V_{tn} \times I_{cell}$) i l'electròlisi i la reacció té lloc. Ara, la cel·lula consumeix una potència extra igual al producte de la diferència entre la cel·la V i V_{tn} , i la cel·la I actual. Aquesta potència extra es deu a les pèrdues de la cel·la, i es fa evident com a calor augmentant així la temperatura del procés fins que el sistema de refredament evacua aquesta energia.

De la llei de Faraday, la taxa de producció d'hidrogen en una cel·la d'electròlisi ideal és proporcional al flux de transferència de càrrega, és a dir, a la cel·la I de corrent elèctric. Suposant que el mateix corrent flueix a través de cada cel·la de l'electrolitzador, la taxa de producció d'hidrogen (f_{H2}) en Nm³/h es pot expressar com on η_F és l'eficiència de Faraday, N_{celda} és el nombre de cel·les que constitueixen el mòdul d'electròlisi, i I_{celda} és el corrent de cel·la en A.

$$f_{H2} = \eta_F \frac{N_{celda} I_{celda}}{zF} \frac{22.41}{1000} 3600$$

L'eficiència de Faraday, també coneguda com a eficiència de corrent, es pot definir com la relació entre la càrrega elèctrica ideal requerida per a la producció d'una quantitat donada d'hidrogen i la càrrega elèctrica real que consumeix el mòdul d'electròlisi. Una eficiència de Faraday inferior a 1 és causada pels corrents paràsits que apareixen en el procés d'electròlisi real i que no contribueixen a la generació d'hidrogen útil. Part de les corbes paràsites flueix entre les cel·lules, ja sigui sense participar en les semireaccions d'oxidació i reducció o sense participar en reaccions electroquímiques no desitjades. La resta dels corrents paràsits generen hidrogen però es perden a través dels diaframes de les cel·lules, μF al seu valor màxim, que generalment és superior a 0.95, quan l'electrolitzador funciona en condicions de producció nominals.

El consum d' energia específic CE relaciona l' energia consumida amb l' hidrogen produït. Comunament s'expressa en kWh/Nm³ i generalment augmenta amb la taxa de producció. Pel que fa al procés d' electròlisi, CE es pot calcular per a un temps donat CE es pot calcular, per a un interval de temps donat L1t, de la manera següent:

Atès que l' expressió anterior es refereix al procés d' electricitat, no considera el consum d' energia dels perifèrics i equips auxiliars que poden incorporar un sistema complet de producció d' hidrogen, com vàlvules magnètiques, sensors, microprocessadors, sistemes de refredament d' electròlits i unitats de purificació utilitzades per eliminar oxigen i humitat de l' hidrogen generat. Tampoc inclou les pèrdues en el subministrament d' energia elèctrica. També hi pot haver pèrdues addicionals d'hidrogen, com l'hidrogen derivat dels sensors de puresa, l'hidrogen perdut en el sistema d'alimentació d'aigua de l'electrolitzador i les fuites d'hidrogen en les vàlvules i en el col·lector de gas. Aquests consums i pèrdues d' energia addicionals s' han de tenir en compte per calcular CE per al sistema global de producció d'hidrogen.

Finalment, un altre paràmetre important d' un electrolitzador és la seva eficiència μ_E . Representa la relació entre l' energia continguda en l' hidrogen produït i l' energia necessària per electrolitzar l' aigua consumida durant el procés. En conseqüència, μ_E es pot calcular fàcilment com la relació entre l'HHV d'hidrogen (3,54 kWh/Nm³) i el consum d'energia CE en kWh/Nm³.

$$\mu_E = \frac{HHV}{C_E} \cdot 100$$

Òbviament, l' eficiència es pot calcular per al procés d' electròlisi o per al sistema global de producció d' hidrogen. de cada cel·la estan connectades als terminals d'alimentació corresponents. Aquesta configuració, en la qual cada elèctrode té una sola polaritat, es denomina monopolar o unipolar. D'altra banda, quan el mòdul consta de cel·les connectades en sèrie, el mateix corrent flueix a través del cèl·lules. En aquest cas, cada elèctrode, a excepció dels inicials i els finals, té dues polaritats, positiva i negativa, pel que fa a les dues cel·les a les quals pertany.

Característiques generals dels electrolitzadors

La cel·la d'electròlisi és l'element bàsic de l'electrolític de producció d'hidrogen. Les cel·les s'utilitzen en paral·lel o en sèrie per formar el mòdul d'electròlisi. Això es mostra a la Fig. 3, on V_{cell} i I_{cell} són el voltatge i el corrent de cada cel·la, i V_M i I_M el voltatge i el corrent del mòdul. Quan el mòdul d'electròlisi està constituït per cel·les connectades en paral·lel.

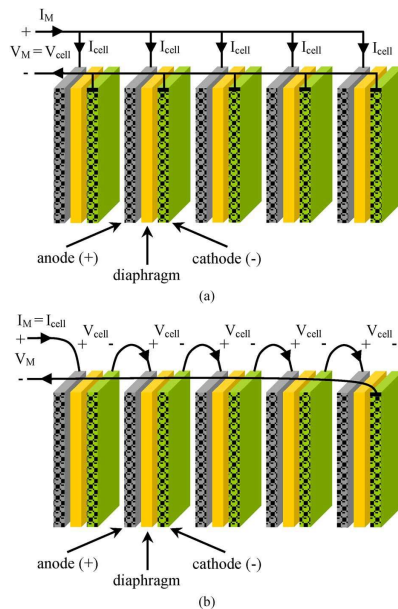


Figura n^o cel·les en cadena amb membrana en sèrie i paral·lel

És important aclarir que cada elèctrode bipolar en realitat consta de dos elèctrodes, l'ànode (+) i el càtode (-), units físicament per mitjà d'un col·lector de corrent, que generalment està format per malla de filferro o plaques (no incloses en la figura) de materials com el grafit i l'acer inoxidable. Finalment, el mòdul d'electròlisi també pot tenir una connexió mixta, amb cèl·lules en sèrie formant branques que, al seu torn, estan connectades en paral·lel. No obstant això, aquesta connexió a penes és adoptada pels fabricants. Suposant que totes les cèl·les d'un mòdul són iguals, el voltatge als terminals del mòdul V_M és la suma de la voltatges de les cèl·les connectades en sèrie, i el corrent del mòdul I_M és la suma de corrents que flueixen a través de les branques cel·lulars connectades en paral·lel. Per tant, en un mòdul monopolar, $V_M = V_{cell}$, mentre que en un bipolar, $I_M = I_{cell}$.

Els mòduls es coneixen com a electrolitzadors de tanc o monopolars. Quan el mòdul és bipolar, es denominen premsa de filtre electrolitzadors bipolars [24], [30], [48]–[51]. Cada tipus d'electrolitzadors té els seus propis avantatges i inconvenients. Els electrolitzadors monopolars són molt simples i robustos, tot i que requereixen un espai considerable. Els electrolitzadors bipolars tenen una configuració més complexa a causa de la unió i segellament de les cèl·les en sèrie, però el seu disseny compacte els permet reduir l'espai. La configuració monopolar requereix fer diverses connexions externes que resulten en pèrdues addicionals. En aquest sentit, els electrolitzadors bipolars aconsegueixen majors densitats de corrent per cel·la respecte als monopolars. A més, tenen diversos canals, en general quatre per cel·la, on es pot subministrar electròlit líquid a través i fluir. Tots aquests canals d'electròlit, així com les cèl·les connectades en sèrie, ofereixen moltes rutes que faciliten el flux de corrents interns (paràsites). Per tant, aquestes pèrdues són molt menors en electrolitzadors amb mòdul monopolar i electròlit líquid.

Els electrolitzadors monopolars requereixen un subministrament elèctric de baix voltatge, al voltant d' 1.9-2.5 V, i corrents molt alts que poden assolir uns mil imperis depenent del rang de producció d' hidrogen. Els nivells de voltatge en els electrolitzadors bipolars depenen del nombre de cèl·les connectades en sèrie. Poden assolir diversos cents de volts a partir de voltatges de cel·la entre 1.7 i 1.9 V. Per contra, el corrent per a la mateixa taxa de producció d' hidrogen és molt menor que en els electrolitzadors monopolars. A més, els monopolars tenen una major incidència de tenir una distribució de corrent no uniforme a través de cada cèl·lula a causa de les diferències en la resistència òhmica interna de la

cèl·lula. La configuració monopolar és totalment modular i permet realitzar treballs de manteniment i reparació d'una cèl·lula mentre les altres continuen funcionant amb normalitat. Tanmateix, en la configuració bipolar, el procés de producció s'ha d'aturar en aquestes situacions i, en general, el mòdul complet s'ha de reemplaçar. La majoria dels fabricants han desenvolupat els seus electrolitzadors a partir de mòduls d'electròlisi biològica, ja que es consideren més adequats que els monopolars per a la producció d'hidrogen.

Els electrolitzadors també poden acoblar connexions en sèrie, paral·leles i mixtes de mòduls. Molts fabricants utilitzen un mòdul d'electròlisi bàsic i després configuren els seus electrolitzadors comercials amb diversos d'ells per aconseguir la taxa de producció desitjada [30], [51]–[53]. Un electrolitzador, o en general una planta de producció d'hidrogen electrolític el, inclou equips addicionals. L'hidrogen i l'oxigen generats es refreden, purifiquen, comprimeixen i emmagatzemen. En moltes instal·lacions, l'oxigen no s'emmagatzema, sinó que es ventila a l'atmosfera. També hi ha electrolitzadors que produeixen hidrogen a molt alta temperatura, pressió, evitant així l'etapa de compressió i el seu cost econòmic i energètic. Les unitats petites evacuen l'excés de calor generat en el procés electrolític mitjançant un sistema de refredament per aire, mentre que les unitats més grans

en fan servir un d'aigua. L'aigua que entra a la unitat es tracta prèviament per complir amb els requisits de puresa per evitar la deposició de minerals a les cèl·lules, el deteriorament ràpid dels elements de la cel·la i les reaccions electroquímiques no desitjades. En general, els electrolitzadors són dispositius fiables que no requereixen manteniment continu ja que a penes inclouen elements mòbils. A més, són silenciosos i tenen un alt grau de modularitat, la qual cosa els fa adequats per a aplicacions descentralitzades en àrees residencials, comercials i industrials.

Tot i que els electrolitzadors s'han utilitzat durant molt de temps, les seves aplicacions futures probablement requeriran sovint que s'apropin a fonts d'energia renovables per generar hidrogen net i contribuir al funcionament de la xarxa elèctrica. En aquest sentit, encara queda un llarg camí per recórrer en molts aspectes com: reducció dels costos de fabricació, distribució i estancació; millora de l'eficiència: mòdul d'electròlisi, subministrament de potencia, perifèrics, sistema de control, etc.; operació sota perfils de subministrament elèctric variable; augment de la temperatura i pressió de funcionament

Electrolitzadors alcalins d'aigua

L'electròlisi d'aigua alcalina és reconeguda com una tecnologia madura; el nombre d'unitats en funcionament el 1902 era superior a 400 [54]. Els electrolitzadors d'aigua alcalina són fiables i segurs, i exhibeixen vides útils que poden assolir fins a 15 anys [29], [55]; com a resultat, constitueixen la tecnologia més estesa a nivell comercial a nivell mundial. Els costos d'inversió s'han estimat en el rang de 1000-5000 \$/kW depenent de la capacitat de producció [24], [56]. Els principals fabricants d'electrolitzadors d'aigua alcalina s'han recopilat a la Taula 1 [52], [57]–[69]. La majoria d'ells fabriquen els mòduls bipolars, excepte les empreses Avalence [58] i Sagim [68], que utilitzen cèl·lules monopolars. Els

electrolitzadors alcalins permeten un funcionament significativament eficient amb valors habituals en el rang del voltant del 47% al 82%.

En els últims anys, s'han aconseguit avenços significatius respecte a l'electròlisi alcalina de l'aigua principalment en dues direccions [30], [50], [70], [71]. D'una banda, s'ha millorat l'eficiència dels electrolitzadors amb l'objectiu de reduir els costos d'explotació associats al consum d'electricitat; d'altra banda, s'han augmentat les densitats de corrent de funcionament per reduir els costos d'inversió. Cal assenyalar que per a les unitats grans, els costos d'inversió són gairebé proporcionals a l'àrea de superfície de les cèl·lules d'electròlisi. A causa de les recents millores, també es coneixen electrolitzadors d'aigua alcalina moderns.

taula n° Electrolitzadors alcalins i especificacions

Manufacturer	Technology (configuration)	Rated production (Nm ³ /h) ^a	Rated power (kW) ^b	Specific energy consumption (kWh/Nm ³) ^c	Efficiency (%) ^d	Maximum pressure (bar)	Hydrogen purity (vol.%)	Location	Ref.
AccaGen	alkaline (bipolar)	1-100	6.7-487	6.7-4.87 ^g	52.8-72.7	10 (optional 30 and 200 ^f)	99.9 (99.999 ^k)	Switzerland	[57]
Avalence	alkaline (monopolar)	0.4-4.6 (139 ^f)	2-25 (750 ^f)	5.43-5 ^h	65.2-70.8	448	n.a.	USA	[58]
Claind	alkaline (bipolar)	0.5-30	n.a.	n.a.	n.a.	15	99.7 (99.999 ^k)	Italy	[59]
ELT	alkaline (bipolar)	3-330	13.8-1518	4.6-4.3 ^h	76.9-82.3	atmospheric	99.8-99.9	Germany	[60]
ELT	alkaline (bipolar)	100-760	465-3534	4.65-4.3 ^h	76.1-82.3	30	99.8-99.9	Germany	[60]
Erredue	alkaline (bipolar)	0.6-21.3	3.6-108	6-5.1 ^g	59-69.8	2.5-4	99.3-99.8 (99.999 ^k)	Italy	[61]
Giner	PEM (bipolar)	3.7	20	5.4 ⁱ	65.5	85	n.a.	USA	[82]
Hydrogen Technologies, division of Statoil	alkaline (bipolar)	10-500	43-2150	4.3 ^h	82.3	atmospheric	99.9 (99.999 ^k)	Norway	[62]
Hydrogenics	alkaline (bipolar)	10-60	54-312	5.4-5.2 ^g	65.5-68.1	10 (optional 25)	99.9 (99.998 ^k)	Canada	[52]
Hydrogenics	PEM (bipolar)	1	7.2	7.2 ^g	49.2	7.9	99.99	Canada	[52]
H2 Logic	alkaline (bipolar)	0.66-42.62	3.6-213	5.45-5 ^g	64.9-70.8	4 (optional 12)	99.3-99.8 (99.999 ^k)	Denmark	[63]
Idroenergy	alkaline (bipolar)	0.4-80	3-377	7.5-4.71 ^h	47.2-75.2	1.8-8	99.5	Italy	[64]
Industrie Haute Technologie	alkaline (bipolar)	110-760	511.5-3534	4.65-4.3 ^h	76.1-82.3	32	99.8-99.9	Switzerland	[65]
Linde	alkaline (bipolar)	5-250	n.a.	n.a.	n.a.	25	99.9 (99.998 ^k)	Germany	[66]
PIEL, division of ILT Technology	alkaline (bipolar)	0.4-16	2.8-80	7-5 ^g	50.6-70.8	1.8-18	99.5	Italy	[67]
Proton OnSite	PEM (bipolar)	0.265-30	1.8-174	7.3-5.8 ^h	48.5-61	13.8-15 (optional 30)	99.999	USA	[53]
Sagim	alkaline (monopolar ^e)	1-5	5-25	5 ^h	70.8	10 ^j	99.9	France	[68]
Teledyne Energy Systems	alkaline (bipolar)	2.8-56	n.a.	n.a.	n.a.	10	99.999	USA	[69]
Treadwell Corporation	PEM (bipolar)	1.2-10.2	n.a.	n.a.	n.a.	75.7	n.a.	USA	[83]

n.a.: not available.
^aGas production rates are commonly given in normal cubic meters per hour (Nm³/h) and kilograms per hour (kg/h): 1 Nm³/h = 0.0899 kg/h.
^bRated power has been obtained either directly from the manufacturers, when the data is available, or as the product of third and fifth columns (rated production and specific energy consumption, respectively).
^cSpecific energy consumption has been obtained either directly from the manufacturers, when the data is available, or as the ratio between fourth and third columns (rated power and rated production, respectively).
^dEfficiency has been calculated as the ratio between the HHV of hydrogen (3.54 kWh/Nm³) and the specific energy consumption (fifth column).
^eModule configuration by series-connected monopolar cells.
^fIn development.
^gThe manufacturer indicates that the specific energy consumption refers to the global hydrogen production system.
^hThe manufacturer does not indicate if the specific energy consumption is exclusively of the electrolysis process (module) or it refers to the global hydrogen production system.
ⁱThe manufacturer indicates that the specific energy consumption refers only to the electrolysis process (module).
^jPressurization with internal compressor, not by isothermal process inside the electrolysis module.
^kWith an additional purification system (to remove oxygen and water vapor from the produced hydrogen gas).

com a electrolitzadors alcalins avançats; algunes d'aquestes millores són les següents:

Minimització de l'espai entre els elèctrodes per reduir les pèrdues òhmiques i permetre treballar amb densitats de corrent més altes. Actualment, les distàncies entre els elèctrodes per sota d'1 mm són típiques, el que es coneix com a configuració de bretxa zero. Alguns fabricants fabriquen les cèl·lules amb els elèctrodes i el diafragma com a únic element, aconseguint així un veritable espai zero [50], [72]. Desenvolupament de nous materials avançats per ser utilitzats com a diafragmes en substitució dels anteriors d'amiant. En aquest sentit, l'ús de membranes inorgàniques d'intercanvi iònic s'ha estès àmpliament. Alguns exemples són les membranes basades en políacids d'antimoni impregnats amb polímers [73], un compost porós compost per una matriu de polisulfone i ZrO_2 (Zirfon) [74], i separadors basats en sulfur de polifenil (Ryton) [24].

Desenvolupament d'aigua alcalina d'alta temperatura. Les temperatures de treball de fins a $150\text{ }^\circ\text{C}$ augmenten la conductivitat electrolítica i promouen la cinètica de les reaccions electroquímiques a la superfície dels elèctrodes. Desenvolupament de materials electrocatalítics avançats per reduir les sobretensions dels elèctrodes. L'ànode és especialment desafiant perquè la reacció a mitja oxidació és més exigent; s'estan considerant òxids de cobalt per a aquest elèctrode.

El principi de funcionament d'una cel·la electrolítica d'aigua alcalina s'il·lustra a la Fig. 4. La cel·la consta de dos elèctrodes separats per un diafragma hermètic al gas. Aquest conjunt se submergeix en un electrolít líquid que sol ser una solució aquosa altament concentrada de KOH , de l'ordre de 25-30 en pes, per maximitzar la seva conductivitat iònica. Les temperatures de funcionament típiques oscil·len entre $65\text{ }^\circ\text{C}$ i $100\text{ }^\circ\text{C}$ [75]. Altres electrolíts possibles, com les solucions de $NaOH$ o $NaCl$, són menys comuns. El principal i obvi inconvenient de l'electrolít alcalí és el seu caràcter corrosiu. El gas hidrogen evoluciona des del càtode, on l'aigua es redueix d'acord amb (9) produint anions d'hidròxid que circulen a través del diafragma fins a l'ànode dins del camp elèctric establert per la font d'energia externa.

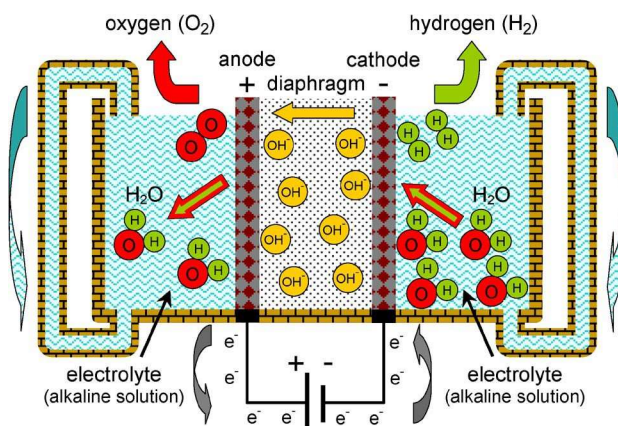
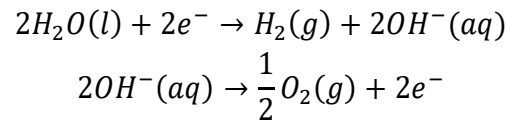


Figura n° 4. Esquema del principi de funcionamiento de una celda de electrolisis alcalina [44].

Els anions d'hidròxid es recombinen a la superfície de l'ànode d'acord amb (10) per produir oxigen que burxa cap a la varietat de gas alliberant electrons que tanquen el circuit elèctric



L'evolució dels productes gasosos dels elèctrics és crítica perquè es pot originar una concentració de sobretensió significativa que redueix l'eficiència de l'electròlisi. Per facilitar la bombolla de gasos, els elèctrodes s'han de dissenyar acuradament per maximitzar l'àrea de contacte interfacial amb l'electròlit líquid. Per a això, és important que els elèctrodes tinguin una textura porosa i mostrin moltes perforacions. Pel que fa a l'electròlit, es mostra en condicions de treball que s'estableix una recirculació contínua, com s'il·lustra en la fig. 4, mitjançant la virtut dels gradients interns de temperatura i el líquid transportat pels gasos en evolució. El moviment del líquid té efectes beneficiosos. En primer lloc, ajuda a l'homogeneïtzació de les concentracions i a la formació de mescles de gasos inflamables [76], [77]. D'altra banda, la densitat de corrent màxim permès és d'aproximadament 0,4 A/cm². Quant a la temperatura, el rang d'operació sol estar entre 5 °C i 100 °C depenent del model, tot i que alguns prototips poden assolir els 400° C [78]. Pel que fa a la pressió d'electròlisi, hi ha models que funcionen a pressió atmosfèrica [62], [66], mentre que d'altres poden assolir fins a 448 bar [58]. No obstant això, la pressió màxima d'electròlisi sol ser propera a 25-30 bar. Curiosament, aquesta pressió és prou alta com per evitar una de les etapes quan l'hidrogen s'emmagatzema com a gas comprimit. Les pressions més altes no es compensen perquè els costos d'inversió augmenten significativament, així com els riscos de formació de mescles de gasos perillosos [77].

Els nivells de puresa d'hidrogen i oxigen poden assolir 99,9 i 99,7 vol.% respectivament, sense equips auxiliars de purificació [29], [55], [71]. D'altra banda, l'aigua alimentada a l'electrolitzador ha de ser significativament pura, amb una conductivitat elèctrica inferior a 5 μS/cm per protegir els elèctrodes i funcionar amb seguretat.

Intercanvi de protons. Electrolitzadors de membrana

L'ús de polímers d'intercanvi iònic en aplicacions electroquímiques es remunta a finals de la dècada de 1950 als Estats Units coincidint amb la carrera aeroespacial. El 1966, General Electric va desenvolupar el primer electrolitzador d'aigua basat en el concepte conductor de protons utilitzant un polímer membrana com a electròlit; el 1978 va començar a comercialitzar-se els primers electrolitzadors d'aigua d'aquest tipus [79], [80].

espècies químiques dins dels porus dels elèctrodes. Facilita, a més, l'evolució dels productes gasosos, i augmenta la taxa de transferència de calor permetent una refrigeració eficaç del mòdul d'electròlisi. Els electrolitzadors alcalins avançats són els més adequats per a la producció d'hidrogen a gran escala. Alguns fabricants (vegeu la Taula 1) fabriquen unitats amb capacitats de producció molt altes en el rang de 500–760 Nm³/h, corresponents a consums d'energia elèctrica al voltant 2150–3534 kW [62]–[65]. La taxa de producció està en la pràctica limitada al 25%-100% del rang nominal per tal d'evitar el funcionament en condicions que potencialment podrien conduir

Aquesta tecnologia també es coneix com a membrana d'electròlit polimèric (PEM), membrana d'intercanvi de pro tones i, amb menys freqüència, com a electròlit de polímer sòlid (SPE) [80], [81]. Actualment, hi ha molt poques empreses que fabriquin electrolitzadors PEM, com es pot observar a la Taula 1 [52], [53], [82], [83]. Això es deu principalment a la seva limitada capacitat de producció, la seva curta vida útil i el seu cost d'inversió comparativament elevat [24], [55], [56], [84].

En PEM electrolitzadors, l'electròlit és hermètic al gas i membrana polimèrica prima (per sota de 0,2 mm de gruix) Any amb una estructura reticulada i un caràcter fortament àcid a causa de la presència de grups funcionals del sulfònic àcid (-SO₃H) tipus. Aquests grups són responsables de la protó (H⁺) realització capacitat del materials a través d'un mecanisme d'intercanvi iònic [85]. Pel que fa a les piles de combustible PEM, el més comunament usat membrana per a Aigua electrolisi és Nafion (a Dupont marca [86]).

Els mòduls dels electrolitzadors PEM adopten gairebé de forma invariable una configuració bipolar en la qual la connexió elèctrica entre cel·les es realitza mitjançant plaques bipolars que també juguen un paper important en l'evacuació dels gasos generats. El conjunt d'ànode, càtode i membrana constitueix l'anomenat conjunt d'electrodes de membrana (MEA). Els elèctrodes consisteixen típicament en metalls nobles com el platí o l'iridi [79].

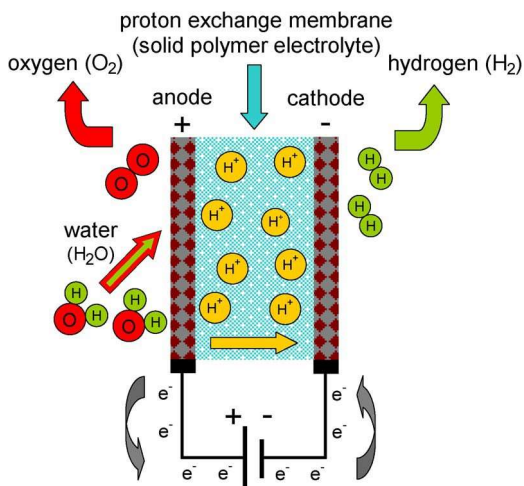
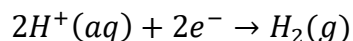
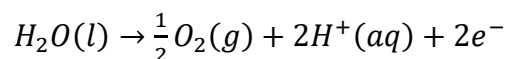


Figura n ° 5. Esquema del principi de funcionamiento de una celda de electrolisis de membrana de intercambio de protones (PEM) [44].

de fins a 85 bar [82]. Això es deu al caràcter compacte dels mòduls d'electròlisi, així com a les propietats estructurals dels AMUMA, que poden suportar grans diferències de pressió entre els comparadors d'elèctrodes. Això permet, per exemple, la producció d'hidrogen a 35 bar i oxigen a pressió atmosfèrica, evitant així els perills de la manipulació d'oxigen a alta pressió [24], [87]. La puresa de l'hidrogen, més alta que en electrolitzadors, sol estar per sobre de 99.99 vol.%.

El principi de funcionament d'una cel·la d'electròlisi d'aigua PEM es mostra a la Fig. 5. A l'ànode, l'aigua s'oxida d'acord amb (11) per produir oxigen, electrons i protons que circulen a través de la membrana fins al càtode on es redueixen d'acord amb (12) tancar el circuit i produir hidrogen que burxa cap a la varietat de gas catòdic:



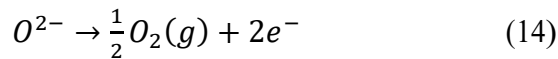
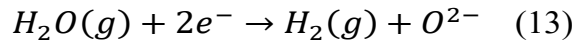
Com s'indica a la Taula 1, els electrolitzadors PEM estan disponibles comercialment per a aplicacions de producció a baixa escala. El rendiment màxim d'hidrogen és de l'ordre de 30 Nm³/h amb un consum d'energia de 174 kW [53]. A diferència dels electrolitzadors alcalins, la taxa de producció pràctica dels electrolitzadors PEM cobreix pràcticament tot el rang nominal [52], [53]. Aquests dispositius poden funcionar a densitats de corrent que són bastant més altes que les seves contraparts alcalines, assolint valors fins i tot per sobre d'1.6 A / cm² [24]. Les seves eficiències oscil·len entre el 48% i el 65%, aproximadament. La presència de la membrana polimèrica limita les temperatures d'electricitat a valors generalment inferiors a 80 °C.

Alguns models assoleixen pressions 99.999 vol.%) sense necessitat d'equips auxiliars [88]. A més, la molt baixa permeabilitat gasosa de les membranes polimèriques redueix el risc de formació de mesclades inflamables; per tant, és permisible operar a densitats de corrent molt baixes. La conductivitat elèctrica de l'aigua alimentada a l'electrolitzador ha d'estar per sota d'1 μS/cm [53]. Una característica interessant dels electrolitzadors PEM és sucapacitat per treballar sota règims d'alimentació de potència variable. Això es deu al fet que el transport de protons a través de la membrana polimèrica respon ràpidament a les fluctuacions de potència. Això contrasta amb els electrolitzadors alcalins, on el transport iònic en electrolits líquids mostra una major inèrcia [24]. Tot i que estan disponibles comercialment, els electrolitzadors PEM tenen alguns drawbacks que requereixen una atenció especial a curt termini. El principal problema són potser els seus alts costos d'inversió, principalment associats a les membranes i els elèctrodes de metall a base de nobles. Els electrolitzadors PEM exhibit, a més, vides més curtes que la tecnologia de la línia alka. Finalment, la seva capacitat de producció d'hidrogen haurà d'augmentar significativament en el futur [79].

Electrolitzadors d'òxid sòlid

Les empreses estatals constitueixen un concepte avançat que permet l'electròlisi de l'aigua, o més aviat, del vapor a altes temperatures (600 oC-900 oC), la qual cosa resulta en majors eficiències en comparació amb els electrolitzadors alcalins o PEM [89]. No obstant això, aquest concepte no és nou; el treball pioner en l'electròlisi de vapor d'òxid sòlid es remunta a finals de la dècada de 1960, principalment als Estats Units i Alemanya [90]. També és pertinent que gran part de la informació disponible sobre les empreses de propietat estatal s'hagi obtingut treballant amb piles de combustible d'òxid sòlid (SOFC) operades en mode invers [89], [91]. El principi de funcionament d'una cel·lula SOE es mostra

a la Fig. 6. Tant el vapor com l'hidrogen reciclat s'alimenten al càtode, on l'aigua es redueix per produir hidrogen d'acord amb (13). Els anions d'òxid generats al càtode passen a través de l'electròlit sòlid a l'ànode, on es tornen a combinar d'acord amb (14) formant oxigen i tancant el circuit amb els electrons alliberats.



Aquestes reaccions evolucionen amb els elèctrodes en contacte amb una fase de gas o vapor, cosa que contrasta clarament amb els processos que tenen lloc en els elèctrodes dels electrolitzadors alcalins o PEM i fa que la qüestió de maximitzar l'àrea interfacial en contacte entre els elèctrodes i les espècies químiques gasoses sigui un desafiament [92]. Aquesta és la raó del caràcter porós dels elèctrodes de les empreses estatals. Pel que fa als SOFC, una pel·lícula prima hermètica als gasos d'itria (Y2O3) estabilitzada

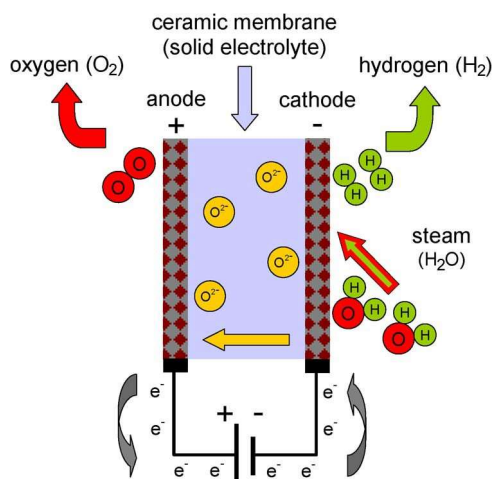


Figura nº 6. Esquema del principi de funcionament de una cel·la de electrolísi d'òxid sòlid (SOE).

La zircònia (ZrO2) (YSZ) es fa servir típicament com a electròlit d'òxid sòlid. Aquest material exhibeix una bona conductivitat iònica a les altes temperatures de funcionament prevalent a través d'un mecanisme que involucra les vacants d'oxigen presents a la xarxa d'òxid mixt. El càtode és un cermet que generalment consisteix en níquel i YSZ. L'ànode és comunament un compost de YSZ i perovskites com manganites de lantà (LaMnO3), ferrites (LaFeO3) o cobaltites (LaCoO3) parcialment substituïdes per estronci per tal de promoure defectes estructurals i electrònics que augmenten l'electròlisi activitat [93]–[96].

va urgir l'electròlisi de vapor amb l'objectiu de reduir la intensitat energètica i, per tant, els costos operatius d'electròlisi convencional d'aigua líquida [97]. Aquest fet pot ser entès sobre la base de consideracions termodinàmiques com s'explica a la secció II-B. De fet, mentre que el total augmenta la demanda d'energia de la reacció de divisió de l'aigua només molt lleugerament a mesura que augmenta la temperatura, la demanda d'energia

trical disminueix significativament. Això significa que la proporció de l'energia requerida que pot ser substituït en forma d'augment de calor amb electròlisi temperatura. Per donar una idea el termo neutre cel·la voltatge V_{Tn} augmenta d'1,4 a 1,52 V si La temperatura va de 25 a 1000°C.

Gran part de les dades reportades s'han obtingut amb cèl·lules tubulars ja sigui com cèl·lules individuals o piles formades per diverses cèl·lules connectades a la presó. En aquesta configuració de cel·la, s'utilitza un tub ceràmic de, per exemple, zirconia estabilitzada amb calci (CaO) (CSZ) com a suport. Les dimensions típiques del tub són de 12 a 13 mm de diàmetre interior, d' 1 a 1,5 mm de gruix i de fins a 1 m de longitud. S'aplica una capa porosa prima (per sota de 0,25 mm) d'una perovskita de lantà a la superfície exterior del suport per actuar com a ànode. L'ànode està cobert amb una capa molt prima d'electrolit (YSZ, aproximadament 0,04 mm de gruix) que al seu torn es recobreix finalment amb una capa (0,1 mm de gruix) de Cermet de Ni/YSC que actua com a càtode. Aquesta configuració de cel·la ha permès obtenir 17,6 NI/h d'hidrogen a 1000 °C, 0,4 A/cm² i 39,3 W permetido obtenir 17,6 NI/h de hidrógeno a 1000 °C, 0,4 A/cm² y 39,3 W de potència aplicada. Una pila que consta de 1000 cel·les d'electròlisi va produir fins a 600 NI/h d'hidrogen [99]. Aquesta tecnologia d'electròlisi de vapor es caracteritza per altes sobretensions produïdes per les altes pèrdues òhmiques que prevalen en les interconnexions entre cel·les.

Les sobretensions degudes a les limitacions de transport de difusió del vapor també són altes. En els últims anys, les cèl·lules d'electròlisi de vapor planes autoportants estan atraient gran atenció [89], [106]. Contràriament a les cèl·lules tubulars, les planes permeten la fabricació de piles més compactes, cosa que resulta en millors taxes de producció d'hidrogen [99].

El principal obstacle actual per a l'aplicació industrial de les empreses estatals és la limitada estabilitat a llarg termini de les cèl·lules d'electròlisi [89]. La degradació de les cèl·lules d'òxid sòlid és més ràpida en els electrolitzadors que en les piles de combustible. Alguns dels problemes que s'han identificat són l'envelliment electrolític i l'electrolitzador. Els esforços de I + D s'han de centrar en aquest tema a curt pla

Conversió de reacció Com a reactor de membrana

La conversió de reacció α es defineix com la fracció del reactiu (aigua en aquest cas) que es converteix en els productes (hidrogen i oxigen). La Taula A1 informa dels balanços de massa d'un reactor tradicional on es duu a terme la reacció de divisió de l'aigua (1).

Taula A1. Balanços de massa de la reacció de divisió d' aigua en un reactor tradicional expressats en termes de conversió de reacció α .

	H ₂ O	O ₂	H ₂	Total
moles inicials	1	0	0	1
moles finals	1 - α	0,5 α	α	1 + 0,5 α
Fracções	$\frac{1-\alpha}{1+0,5\alpha}$	$\frac{0,5\alpha}{1+0,5\alpha}$	$\frac{\alpha}{1+0,5\alpha}$	1

Introducció dels resultats d' aquests balanços de massa en l' expressió del mol fraccions **equilibri** constant, la conversió de reacció es calcula com l' arrel real de la següent equació:

$$(Kx^2 - 1) \alpha^3 - 3Kx^2\alpha + 2Kx^2 = 0 \quad (A1)$$

En el cas d' un reactor de membrana, una fracció dels productes s' extreu a través de membranes selectives i, específicament, η i ϵ són, respectivament, la fracció d' hidrogen i oxigen separades per les membranes. En conseqüència, els balanços de massa es modifiquen com s' indica a la taula **A2**.

Taula A2. Balanços de massa de la reacció de divisió d'aigua en un reactor de **membrana** expressats en termes de conversió de reacció α i la fracció d' hidrogen (η) i oxigen (ϵ) separats per les membranes.

	H ₂ O	O ₂	H ₂	Total
moles inicials	1	0	0	1
moles finals	1 - α	(1 - ϵ) 0,5 α	(1 - η) α	1 + 0,5(1 - ϵ) - η] α
fraccions molars finals	$\frac{1-\alpha}{1+[0,5(1-\epsilon)-\eta]\alpha}$	$\frac{(1-\epsilon) 0,5\alpha}{1+[0,5(1-\epsilon)-\eta]\alpha}$	$\frac{(1-\eta) \alpha}{1+[0,5(1-\epsilon)-\eta]\alpha}$	1



Un cop fixades les fraccions d'hidrogen (η) i oxigen (ε) separades per les membranes, la conversió de reacció α es calcula prenent l'arrel real de la següent equació:

$$Kx^2(1 - \varepsilon - 2\eta) - (1 - \varepsilon)(1 - \eta)^2 \alpha^3 + 2Kx^2(\varepsilon + 2\eta) \alpha^2 - (3 + \varepsilon + 2\eta)Kx^2\alpha + 2Kx^2 = 0$$

(A2)

Els casos particulars d'un reactor de membrana capaç de separar només hidrogen o només oxigen poden tractar-se plantejant en l'expressió (A2) $\varepsilon = 0$ o $\eta = 0$, respectivament. En el cas d'un reactor tradicional ($\varepsilon = \eta = 0$), es pot verificar que l'expressió (A2) es converteix en (A1).

Proposta de electrolitzadors alcalins

Hystat Alkaline Electrolitzadors,

és un sistema d'electròlit alcalí provat a nivell mundial dissenyat per a una fàcil instal·lació in situ per dins i per fora, amb una simple interconnectivitat per ,un registre inigualable de fiabilitat, baix manteniment i seguretat. Recomanat per a projectes entre 10-90 Nm³/h

Especificacions tècniques per a models Hystat 10,15 i 30

TECHNICAL SPECIFICATIONS

	HySTAT® - 10	HySTAT® - 15	HySTAT® - 30
Operating range	40-100%		40-100% (optional 20-100%)
System specific consumption*	55-60 kWh/kg		
Utilities required to operate the plant	Electrical power, potable water, nitrogen for purging requirements		
Rectifier input and efficiency	3 X 400 VAC ± 10% 50/60 Hz		
Installed power	115 kVA	155 kVA	275 kVA
Potable water consumption	Scope of supply includes a water treatment plant with reverse osmosis that requires 1.2 to 2 L/Nm ³ [13 to 17 L/kg of H ₂] (varies depending potable water quality) to produce 0.8 L/Nm ³ of demin water for the electrolysis process		
Total footprint (including maintenance area)	9.4 m x 5.8 m (~ 54 m ²)		
Product setup	Outdoor (20ft ISO container) / Indoor (skidded setup)		
Installation environment	Outdoors -20°C to 40°C / -4°F to 104°F		

*System specific consumption considers: the standard scope of supply refers to the outdoor version of this product (refer to BOS and BOP tables); 100% Load capacity; Beginning Of Life; 1% increase per annum (at >8500 hours operation); Range for indoor and outdoor setup

FEATURES

	HySTAT® - 10	HySTAT® - 15	HySTAT® - 30
Technology	Alkaline		
Hydrogen production	10 Nm ³ /h (21 kg/day)	15 Nm ³ /h (32 kg/day)	30 Nm ³ /h
H ₂ delivery pressure	10 bar _g (145 psig) without a compressor		10 bar _g
H ₂ quality max impurities	99.998% O ₂ < 2 ppm, N ₂ < 12 ppm (higher purities optional); Atm. Dew point: -75°C		99.998% O ₂ < 2 ppm; Atm. Dew point: -75°C

STACK AND BALANCE-OF-STACK (BOS)

	Outdoor	Indoor
Cell stacks and gas generation system	■	■
Power rectifiers	■	■
Control panel	■	■
Water quality monitoring system	■	■

BALANCE-OF-PLANT (BOP)

	Outdoor	Indoor
Rectifier cooling	■	■
Gas cooling	■	■
Electrolysis cooling	■	■
Water purification system	■	■
Instrument air compressor	■	■
Hydrogen purification system	■	■

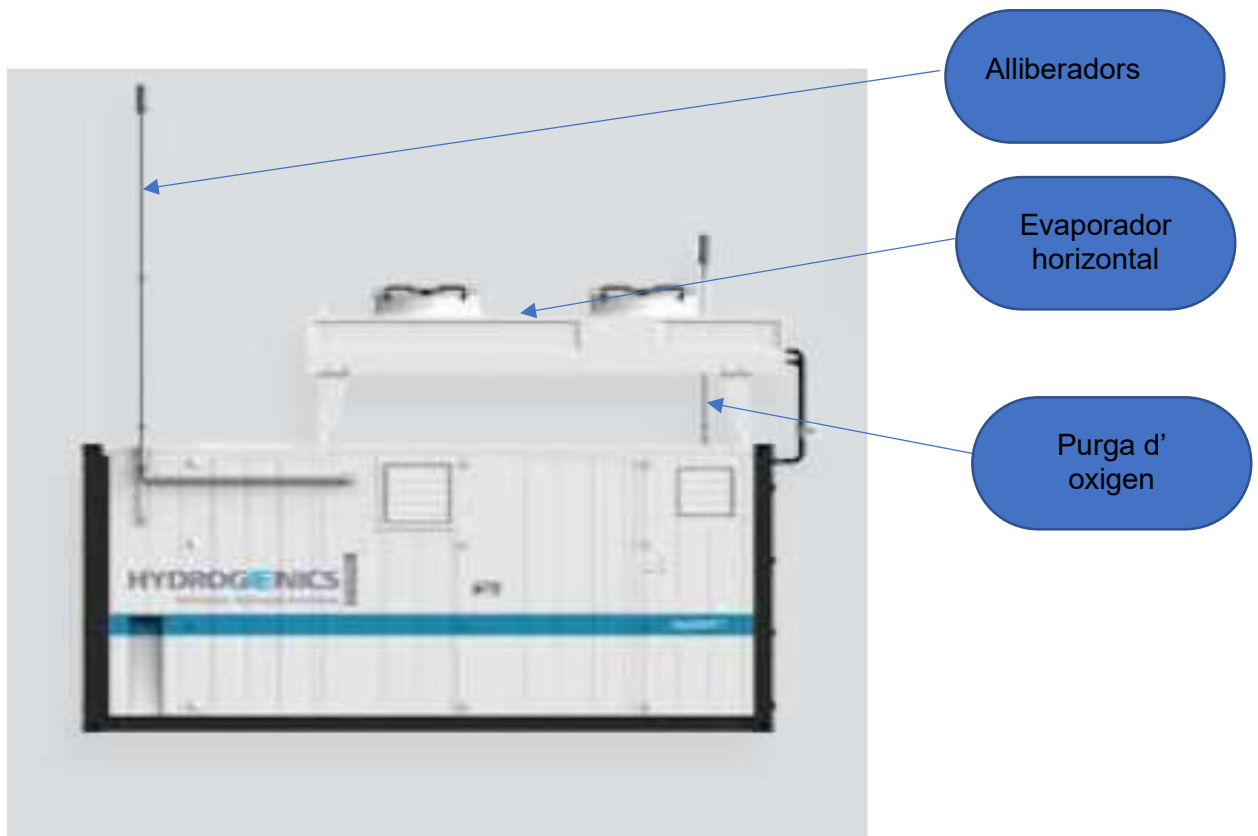
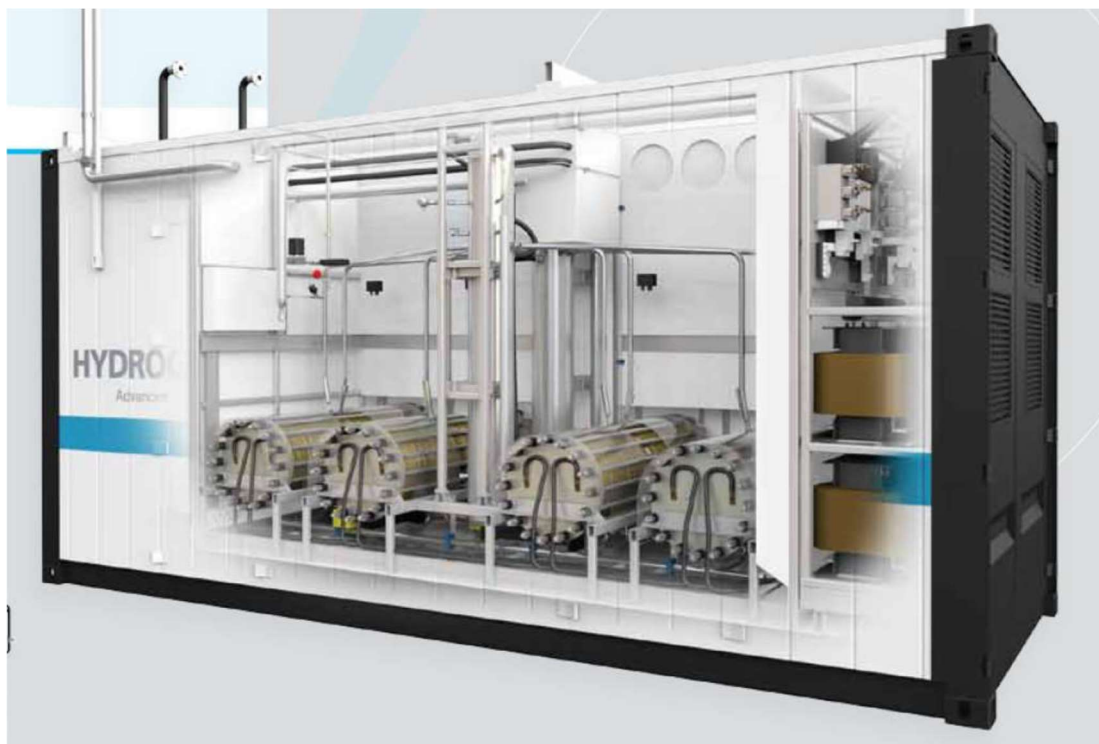


Figura n°. Vista lateral equipo Hystat , evaporador i purgas d'oxigen i alliberadors

Figura n°. Hystat de quatre electrolitzadors, models 60 i 70



Technical specifications

MODEL	HySTAT [®] -10-10	HySTAT [®] -15-10	HySTAT [®] -10-25
Operating Pressure	10 barg		25 barg
Max. Nominal Hydrogen Flow	10 Nm ³ /h	15 Nm ³ /h	10 Nm ³ /h
Hydrogen Flow range	40 - 100% (25 - 100% as an option)		
Hydrogen Purity (before HPS)	99,9%; H ₂ O saturated, O ₂ < 1,000 ppm		
Hydrogen Purity (after HPS)	99,998% (99,999% as an option); O ₂ < 2ppm; N ₂ < 12ppm; Atm. Dew point: -60°C or -76°F (-75°C or -103°F as an option)		
Nr. of cell stacks	1		
Estimated AC power consumption (all included)	4,9 kWh/Nm ³ at full load		
Voltage	3 x 400 VAC ± 3% (3 x 480 or 575 VAC ± 3% as an option)		
Frequency	50 Hz ± 3% (60 Hz ± 3% as an option)		
Installed power	100 KVA	120 KVA	100 KVA
Max. cooling water t° (electrolyte)	40°C	40°C	30°C
Design flow cooling water (electrolyte)	2 m ³ /h		
Max. cooling water t° (gas cooling)	15°C		
Design flow cooling water (gas cooling)	0,15 m ³ /h		
Demineralized water consumption	< 1 liter/Nm ³ H ₂		
Electrolyte	H ₂ O + 30% wt. KOH		
Approx. Electrolyte Quantity	300 L		
Installation Area	Indoor, in dedicated building		
Ambient Temperature Range	+5°C to +40°C		
Dimensions Process Part (LxWxH)**	1,7m x 1,85m x 2,6m		
Dimensions Power Rack (LxWxH)	0,9m x 0,9m x 2,3m		
Dimensions Control Panel (LxWxH)	1,0m x 0,5m x 2,1m		
Approx. empty Weight Process Part	1.350 kg	1.500 kg	1.400 kg
Weight Power Rack	750 kg		
Weight Control Panel	400 kg		

(*) HPS = hydrogen purification system

Tabla n°. Especificacions tècniques

Parts importants del equip Hystat 10-25 de un a 3 electrolitzadors.



Figura n° . Hidrogenics, Hystat 10 amb un electrolitzador

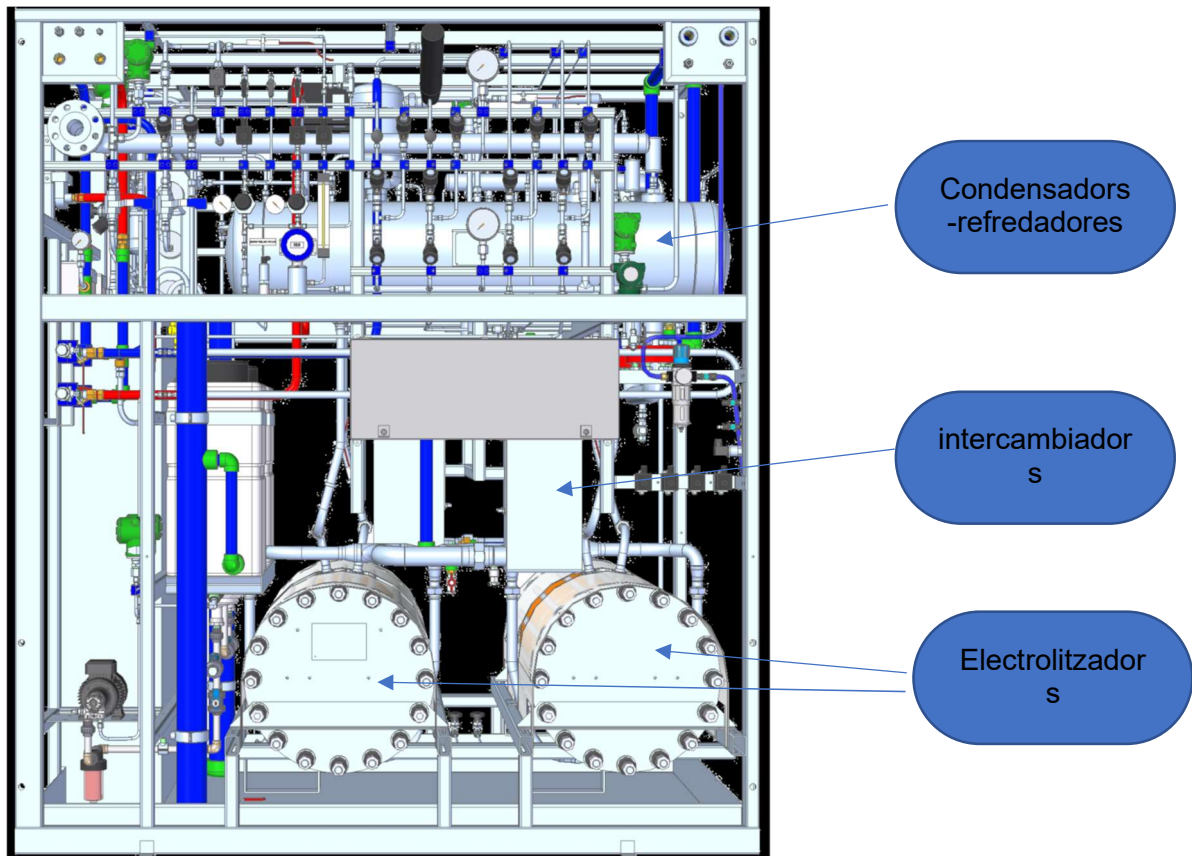


Figura n° . Hydrogenics, Hystat 30 amb dos electrolitzadors

Bibliografia

- Hydrogenics. Hystat Alkaline Electrolyzers
- Hydrogen and Oxygen Production via Water Splitting in a Solar-Powered Membrane Reactor.
- Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends.



Bibliografia:

http://kryolab.fysik.lu.se/dokument/e_techn.html

<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/07/destilacion-flash.html>

6. Referències

<https://biblioteca.upc.edu/investigadors/citar-elaborar-bibliografia>

- 6] Muradov, N. (2015). Low-carbon production of hydrogen from fossil fuels. In Compendium of Hydrogen Energy (pp. 489-522). Woodhead Publishing.
- [7] Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. International Journal of Hydrogen Energy, 40(34), 11094-11111.
- Hystat. Alkaline Electrolizers. Cummins.com/hydrogen
- www.ingenieriaquimica.net/articulos/302-produccion-de-hidrogeno-mediante-electrolizadores-estado-del-arte-de-la-tecnologia-electrolizadores
- Wikipedia

