

Trabajo Fin de Grado

Diseño y cálculo para integración de un electrolizador
alcalino en un sistema de aplicación de H₂ para bancos de
ensayo, pilas de combustible e hidrogenera en Fundación
Hidrógeno Aragón (FHa): Anexo

*Design and calculation for integration of an alkaline
electrolyzer in an H₂ application system for test benches, fuel
cells and hydrogen plants at Fundación Hidrógeno Aragón
(FHa): Exhibit*

Autor

Francisco Oliva Serrano

Director

Miguel Ángel Torres Portero

Codirector

Pedro Casero Cabezón

Grado en Ingeniería Mecánica

2024



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Índice

Índice	2
Índices de figuras y tablas	5
Estado del arte de la electrólisis	9
Electrólisis. Principios básicos	9
Electrolizadores alcalinos (Alkaline Water Electrolyzers)	11
Celda.....	11
Componentes.....	12
Electrolizadores PEM (Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers)	14
Celda.....	14
Componentes.....	15
Electrolizadores AEM (Anion Exchange Membrane Water Electrolyzers)	17
Celda.....	17
Componentes.....	18
Necesidades de producción	20
Estudio opción electrolizador de la marca Enapter, modelo EL2.1 versión 2.....	28
Características técnicas	28
Capacidad productiva	29
Producción simultánea con la compresión.....	30
Alternativas a la producción simultánea.....	31
Primer método: Producción contra depósito pulmón.....	31
Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”	32
Pérdida de carga en las instalaciones	38
Primer método: Producción contra depósito pulmón.....	39
Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”	43
Coste adquisición equipos para funcionamiento del electrolizador Enapter	46
Primer método: Producción contra depósito pulmón.....	46
Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”	46
Gasto energético del electrolizador Enapter	46
Primer método: Producción contra depósito pulmón.....	46
Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”	47

Coste económico total según metodología del electrolizador Enapter	48
Primer método: Producción contra depósito pulmón	48
Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”	48
Conclusiones y resumen de resultados del electrolizador Enapter	48
Resumen	48
Conclusión	49
Estudio opción electrolizador de la marca McPhy, modelo Piel by McPhy, Rev:1.03..	50
Características técnicas	50
Capacidad productiva	50
Producción simultánea con la compresión	52
Alternativas a la productividad simultánea	54
Primer método: Producción contra depósito pulmón	54
Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor ...	54
Tercer método: Compresión contra depósito “prepulmón”	61
Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”	61
Pérdida de carga en las instalaciones actuales	68
Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor ...	68
Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”	71
Coste adquisición de equipos para funcionamiento del electrolizador McPhy	71
Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor ...	71
Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”	73
Gasto energético del electrolizador McPhy	74
Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor ...	74
Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”	75
Coste económico total según metodología del electrolizador McPhy	77
Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor ...	77
Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”	78
Conclusiones y resumen de resultados del electrolizador McPhy	79

Resumen.....	79
Conclusiones	80
Referencias	82
Anexos.....	83
Tabla presiones finales de descarga de depósito prepulmón a depósito pulmón con presión inicial de depósito pulmón de 24 bar	83
Tabla presiones finales de descarga de depósito prepulmón a depósito pulmón con presión inicial de depósito pulmón de 26,36 bar	87
Planos.....	91
Plano 1, PLANO LÍNEA HIDRÓGENO.....	91
Plano 2, PLANO DETALLE ANILLO HIDROGENO.....	92
Plano 3, PLANO ZONAS TALLER.....	93

Índices de figuras y tablas

Figura 1: Esquema de una celda de electrólisis alcalina mostrando las especies químicas que intervienen en la reacción [1].....	12
Figura 2: Esquema de una celda de electrólisis PEM mostrando las especies químicas que intervienen en la reacción [1]	15
Figura 3: Curva de succión del compresor PDC modelo PDC-3-6000/15000(100)	23
Figura 4: Curva de compresión del compresor Haskel modelo 8AGD-5 [7].....	53
Figura 5: Datos necesarios de la aplicación dell compresor Haskel [7].....	55
Tabla 1: Factor de compresibilidad del hidrógeno	21
Tabla 2: Características principales compresor PDC modelo PDC-3-6000/15000(100)	23
Tabla 3: Características por módulo del electrolizador Enapter modelo EL2.1 versión 2 [2]	28
Tabla 4: Características del electrolizador Enapter modelo EL2.1 versión 2	29
Tabla 5: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 35 bar con presión inicial de 24 bar.....	36
Tabla 6: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 34,9 bar con presión inicial de 24 bar.....	36
Tabla 7: Tiempo de producción del electrolizador Enapter para la primera recarga del segundo método.....	36
Tabla 8: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 35 bar con presión inicial de 26,36 bar	37
Tabla 9: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 34,9 bar con presión inicial de 26,36 bar.....	37
Tabla 10: Tiempo de producción del electrolizador Enapter para la segunda recarga del segundo método.....	37
Tabla 11: Tiempos totales de producción del electrolizador Enapter con distintos tamaños de depósito prepulmón	38
Tabla 12: Tamaño de los depósitos de medidas estándar.....	38
Tabla 13: Coste de adquisición de los depósitos “prepulmón” según volumetría del electrolizador Enapter para el segundo método.....	46

Tabla 14: Coste energético según volumetría del depósito “prepulmón” del electrolizador Enapter para el segundo método.....	47
Tabla 15: Coste total según volumetría del depósito “prepulmón” del electrolizador Enapter para el segundo método.....	48
Tabla 16: Coste-Tiempo del electrolizador Enapter para el primer método	48
Tabla 17: Coste-Tiempo según volumetría del depósito “prepulmón” del electrolizador Enapter para el segundo método.....	49
Tabla 18: Características del electrolizador McPhy modelo Piel by McPhy, Rev:1.03 [3]	50
Tabla 19: Características principales compresor Haskel modelo 8AGD-5 [4]	52
Tabla 20: Características productivas compresor Haskel modelo 8AGD-5 [4]	53
Tabla 21: Tiempos totales de producción del electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador para el segundo método	61
Tabla 22: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2,5 m ³	64
Tabla 23: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2 m ³	65
Tabla 24: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m ³	66
Tabla 25: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1 m ³	67
Tabla 26: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 0,5 m ³	68
Tabla 27: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría y del compresor del electrolizador McPhy para el segundo método.....	72
Tabla 28: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 2,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	73
Tabla 29: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 2 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método .	73
Tabla 30: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 1,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	73

Tabla 31: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 1 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método .	74
Tabla 32: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 0,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	74
Tabla 33: Coste energético según volumetría del depósito acumulador del electrolizador McPhy para el segundo método	75
Tabla 34: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	76
Tabla 35: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	76
Tabla 36: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	76
Tabla 37: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	77
Tabla 38: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 0,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	77
Tabla 39: Coste total según volumetría del depósito acumulador del electrolizador McPhy para el segundo método	77
Tabla 40: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 2,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	78
Tabla 41: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 2 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	78
Tabla 42: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 1,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	78
Tabla 43: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 1 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	78
Tabla 44: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 0,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	78
Tabla 45: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador del electrolizador McPhy para el segundo método	79
Tabla 46: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método	79

Tabla 47: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método.....	79
Tabla 48: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método.....	80
Tabla 49: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método.....	80
Tabla 50: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 0,5 m ³ del electrolizador McPhy para el cuarto método.....	80

Estado del arte de la electrólisis

Electrólisis. Principios básicos

Dentro de las tecnologías disponibles hoy en día para la producción de hidrógeno, la electrólisis del agua tiene especial relevancia. Esta tecnología está basada en la reacción electroquímica de la separación de la molécula de agua, y más concretamente, consiste en la separación de la molécula del agua para producir hidrógeno y oxígeno, alimentando el equipo de energía eléctrica (y térmica). El proceso cobra importancia en el marco del hidrógeno como vector energético, ya que, si la electricidad de entrada al proceso es de origen renovable el hidrógeno producido, denominado hidrógeno verde, puede apoyar a los procesos de descarbonización de la industria, ser utilizado para combustible de vehículos ligeros y pesados, o ser vertido en la red de gas para conseguir una integración de sistemas energéticos a la vez que actúa como un almacenamiento de energía en sí mismo.

A grandes rasgos, estos son los tres constituyentes principales que se identifican en un electrolizador:

La **celda** es el núcleo central de los electrolizadores y es donde tiene lugar la reacción de electrólisis. Están compuestos por dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos o en contacto con un electrolito, dos capas de transporte porosas con la función de mover los reactantes y las placas bipolares, que proporcionan soporte mecánico y distribuyen el flujo. La diferente naturaleza química de los electrolitos es lo que da lugar a los nombres de los distintos electrolizadores.

El **stack** es la agrupación de dichas celdas en serie, para aumentar la potencia y la capacidad de producción del equipo, así como aislantes, soportes mecánicos y colectores de fluidos.

El **Balance de Planta** es el conjunto de equipos auxiliares que son necesarios para el correcto funcionamiento del **stack**. Entre sus funciones: los procesos de suministro y adaptación del agua/electrolito, los procesos de evacuación, filtrado y acondicionamiento del hidrógeno y el propio control del equipo.

El hecho de utilizar la tecnología alcalina o la tecnología de membrana polimérica va a afectar a los tres campos y por ello, se van a presentar las principales características/diferencias de los distintos elementos que participan en ambas comenzando desde nivel de celda hasta el balance de planta (BoP).

Es importante destacar además que de cara a la fabricación de equipos que vayan a trabajar con hidrógeno se ha de considerar las interacciones del gas con los materiales. El hidrógeno degrada metales y aleaciones haciendo frágil el material y creando grietas, fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno (embrittlement).

Es por ello, que resulta indispensable el uso de materiales compatibles con el hidrógeno, así como el aseguramiento de que los equipos auxiliares (bombas, válvulas, etcétera) estén diseñados para el trabajo con hidrógeno. Por otro lado, el hidrógeno difunde fácilmente entre materiales debido al pequeño tamaño de la molécula, característica para tener en cuenta a la hora de seleccionar acoplamientos o juntas.

Actualmente, las tecnologías más utilizadas son la electrólisis alcalina y la electrólisis por membrana de intercambio de protones, apodada PEM por sus siglas en inglés Proton Exchange Membrane. La principal diferencia es el electrolito por el que viajan los portadores de carga desde el ánodo al cátodo del electrolizador, siendo líquido (hidróxido de potasio, KOH) en los alcalinos y sólido (membrana polimérica) en los PEM. Los alcalinos trabajan típicamente en puntos de operación constantes mientras que la electrólisis PEM, tecnología menos madura, está creciendo debido a sus respuestas más rápidas y mayores densidades de corriente. El principal problema de los PEM es su elevado precio ya que, a diferencia de los alcalinos, se fabrican con materiales nobles.

Un punto que aplica a ambas tecnologías es el hecho de que la operación a alta presión implica directamente el uso de materiales y componentes que soporten solicitaciones más altas, desde la celda hasta el balance planta. Esto implica automáticamente un aumento de los costes.

Electrolizadores alcalinos (Alkaline Water Electrolyzers)

Un electrolizador alcalino es un dispositivo en el que se produce la electrólisis del agua en el seno de un medio alcalino. En el electrolizador se produce la reacción no espontánea de separar el agua en hidrógeno y oxígeno al hacer circular una corriente continua de una manera conveniente.

De forma general, la calidad de los gases producidos después de la etapa de secado se encuentra en el intervalo 99,5 - 99,9% para el hidrógeno y 99 - 99,8% para el oxígeno. Tras la etapa de purificación, la pureza del hidrógeno puede llegar a superar 99,999%.

Celda

En la tecnología alcalina, la celda electrolítica está formada generalmente por el ánodo (producción de oxígeno) basado en níquel o aleaciones de níquel como electrodo, con catalizadores de Ni₂CoO₄, La-Sr-CoO₃ o Co₃O₄, mientras que el cátodo está formado por níquel y catalizadores de espuma de níquel, aleaciones de Ni-Mo o de ZrO₂-TiO₂.

El electrolito es una disolución de KOH con una concentración típica de entre el 25 y el 30% en un agua desionizada confiriéndole un pH básico que ha de ser tenido en cuenta en el diseño y manejo de esta tecnología.

Tanto los electrodos como el diafragma están sumergidos en esta disolución por lo que el transporte de carga se realiza por el movimiento de los OH⁻ contenidos en el líquido de un compartimento a otro. El fabricante más reconocido de estos diafragmas es AGFA con su membrana ZIRFON, la cual se compone de una malla abierta tejida con fibras de sulfuro de polifenileno, PPS, y recubierta con una mezcla de polímero y óxido de Zirconio (ZrO₂).

Las placas bipolares en esta tecnología son del mismo material que los electrodos y actúan de colectores de corriente y de contenedores de la celda. En este caso, el stack ha de ser estanco para evitar potenciales fugas, y disponer de conexiones, tanto para la entrada de la disolución como para la salida de la mezcla de disolución-hidrógeno de los cátodos y de la de disolución-oxígeno de los ánodos.

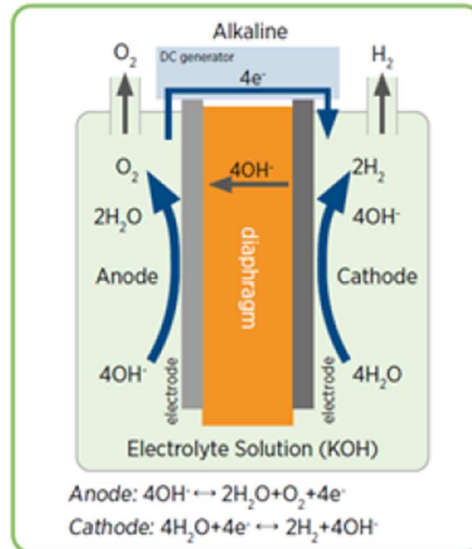


Figura 1: Esquema de una celda de electrólisis alcalina mostrando las especies químicas que intervienen en la reacción [1]

Componentes

Tal y como se puede extraer de las necesidades del *stack* (electrolito líquido y extracción de gases en mezcla con la disolución), en la tecnología alcalina es necesario tener varios circuitos.

Circuito de disolución KOH + Agua desmineralizada

El objetivo de este circuito es el abastecimiento de electrolito al *stack* y la gestión térmica del equipo. La disolución está formada por KOH y agua desmineralizada, siendo esta última consumida por la propia reacción de electrólisis. Es por ello, que en la tecnología alcalina se tiene un suministro de agua desmineralizada la cual se va

introduciendo al sistema, conforme se consume, de forma que se mezcla con el KOH, en las proporciones indicadas y es impulsada por una bomba al *stack*.

El consumo de esta bomba es generalmente bajo, pero ha de ser tenido en cuenta para el estudio energético global del equipo. Además, algunos fabricantes introducen filtros tras la bomba de recirculación, para proteger el *stack* de posibles impurezas derivadas de la recirculación y el bombeo. La recirculación, el bombeo y el posible deterioro de los equipos de la línea por el uso, debido a que están continuamente operando bajo condiciones muy exigentes de temperatura y pH, son potenciales fuentes de contaminación. Se dispone también de un intercambiador de calor, para mantener la disolución de KOH a la correcta temperatura de operación.

Una vez se ha producido la electrólisis del agua, la disolución arrastra la corriente de oxígeno y la de hidrógeno del ánodo y del cátodo respectivamente. Es por ello que ambas corrientes pasan a través de dos separadores gas-líquido donde se produce la separación, la disolución de KOH obtenida del separador se vuelve a recircular, para continuar con el proceso.

Circuito de oxígeno

Pese a tener potenciales usos, la tendencia observada es que el oxígeno se ventee como práctica habitual una vez la disolución abandona el separador gas-líquido. Puede conectarse un intercambiador de calor para el aprovechamiento del calor residual de la corriente.

Circuito de hidrógeno

Siendo el hidrógeno el producto buscado, tras la etapa de separación, la corriente de hidrógeno pasa por procesos de purificación donde se eliminan posibles trazas de oxígeno y vapor de agua que pueda quedar en la corriente de salida.

El hidrógeno se almacenará en un buffer intermedio o se comprimirá, en función de cuales sean los requisitos finales del mismo.

Elementos de control

Tanto para el correcto funcionamiento del equipo, como para la gestión eléctrica, térmica y de seguridad del electrolizador, es necesario sistemas de control ad hoc para el equipo en cuestión. Es necesario un suministro de corriente continua para el funcionamiento del stack, mientras que para otros equipos auxiliares como bombas va a ser generalmente necesario un suministro de corriente alterna.

Electrolizadores PEM (Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers)

Los electrolizadores PEM utilizan una membrana de intercambio de protones y un electrolito polimérico sólido. Cuando se aplica corriente a la pila, el agua se divide en hidrógeno y oxígeno y los protones del hidrógeno pasan a través de la membrana para formar gas de hidrógeno en el lado del cátodo.

La pureza alcanzada por esta tecnología es muy elevada gracias a la poca permeabilidad de la membrana, alcanzando un 99,9% en la salida del stack (con unos valores típicos de 20 ppm de O₂) y llegando a 99,999% tras la etapa de purificación y secado.

Celda

Entrando en el nivel de la celda de la tecnología PEM, la primera diferencia que encontramos con la tecnología alcalina es el hecho de que el electrolito no es un líquido, sino que se usa una membrana de PFSA (Nafion como marca registrada), que permite el transporte de los iones H⁺.

En el ánodo sucede la formación de oxígeno y en el cátodo la de hidrógeno. El electrolito es el separador físico de los dos electrodos. En esta tecnología, se habla de la MEA (*Membrane Electrode Assembly*) como una unidad básica, que se encuentra limitada por las placas bipolares y capa de transporte poroso (PTL). Las celdas PEM usan componentes metálicos basados en titanio, en óxidos de titanio o en acero inoxidable

recubierto para las estructuras porosas de difusión debido a las condiciones de funcionamiento.

Sobre la PTL se colocan los electrodos. El catalizador del ánodo es óxido de iridio o de rutenio, mientras que en el cátodo se usa platino. El platino sobre el cátodo se encuentra depositado en forma de nanopartículas sobre una estructura porosa de carbono, y el catalizador del ánodo se deposita sobre titanio.

El aislante es goma sintética o PTFE entre otros materiales, y los colectores de corriente/placas bipolares son de titanio (revestido de platino en el ánodo y de oro en el cátodo en algunas ocasiones). Todo el stack está contenido en acero inoxidable.

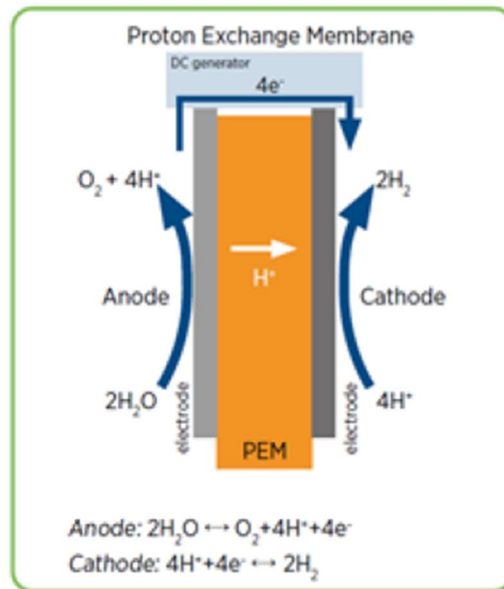


Figura 2: Esquema de una celda de electrolisis PEM mostrando las especies químicas que intervienen en la reacción [1]

Componentes

En el caso de los electrolizadores de tecnología PEM, el circuito de KOH desaparece. No obstante, hay una similitud grande entre los circuitos y la clasificación de ellos es similar.

Circuito de agua desmineralizada

De cara a suministrar el agua para la reacción, es necesario un equipo de desmineralización de agua al igual que en los equipos alcalinos. En este caso, ese equipo vierte el agua al separador de oxígeno y tras él, se adecua en presión y temperatura para llevarlo al stack.

Circuito de oxígeno

En este caso, el agua que no ha reaccionado que arrastra la corriente de O₂ es extraída del stack y llevada a un separador, al igual que en el caso del alcalino, para su posterior venteo a la atmósfera.

Circuito de hidrógeno

El agua que no ha reaccionado y que arrastra la corriente de H₂ es extraída y separada. El caudal de agua se vuelve a introducir en el stack para continuar con la reacción, mientras que el hidrógeno pasa por elementos de condensación para eliminar trazas de agua, un desoxigenador para eliminar el oxígeno que pueda darse en la corriente, y finalmente elementos de limpieza llevan el hidrógeno a estar disponible para su suministro.

Elementos de control

Al igual que en el caso del electrolizador alcalino, es necesario considerar el uso de electrónica de potencia, así como elementos de control térmico de los distintos equipos para asegurar el funcionamiento óptimo de la instalación. Será necesario un suministro de corriente continua para el funcionamiento del stack, mientras que para otros equipos auxiliares como bombas, ventiladores o el propio sistema de control va a ser generalmente necesario un suministro de corriente alterna. [2]

Electrolizadores AEM (Anion Exchange Membrane Water Electrolyzers)

La electrólisis alcalina basada en membranas de intercambio aniónico (AEM), es la tecnología más nueva de todas, y surge como un proceso intermedio entre la alcalina convencional y la PEM, consiguiendo aunar las ventajas de ambas tecnologías. La estructura de la celda es igual que en PEM, se utiliza una membrana para transportar iones sustituyendo al diafragma y al electrolito líquido, pero en este caso la membrana transporta iones OH⁻.

El potencial de esta tecnología es que ofrece todas las ventajas de la PEM y además permite utilizar catalizadores de metales no nobles y componentes sin titanio, en definitiva, sería una tecnología más barata. Sin embargo, el gran problema de esta tecnología es la baja durabilidad de la membrana, lo que disminuye la vida útil del electrolizador.

Celda

En la celda se encuentra la membrana de intercambio aniónico, encargada de transportar los iones OH⁻ del cátodo al ánodo. Junto a la membrana se encuentran las capas catalíticas, tanto del cátodo como del ánodo. Este elemento está formado por catalizadores, que habitualmente están aglutinados mediante un ionómero. Después se encuentran las GDL (Gas Diffusion Layer), que además de ser el soporte de la capa catalítica, son las encargadas de transportar los iones entre los catalizadores y las placas bipolares que se encuentran en último lugar. Las capas catalíticas se pueden depositar directamente en la membrana o en la GDL. El ensamblado de la membrana, capas catalíticas y GDLs al igual que en las celdas PEM se conoce como MEA (Membrane Electrode Assembly).

En esta tecnología, el electrolito es la membrana de intercambio de aniones, por lo que para producirse la electrólisis solo habría que alimentar el electrolizador con agua, pero actualmente no es agua pura sino una disolución de KOH, la cual llega hasta la GDL a través de las placas bipolares, las cuales tienen una serie de canales que permiten que el agua o disolución de KOH llegue hasta la GDL. Este último transporta el agua y los iones a las capas catalíticas donde ocurren las reacciones electroquímicas. La membrana se

encarga de transportar los iones OH⁻ para que ocurran las reacciones. El oxígeno e hidrógeno generados hacen el camino inverso; cruzan la GDL desde la capa catalítica para ser evacuados de la celda por las placas bipolares. Por lo tanto, por la celda entra agua y sale un flujo bifásico compuesto por agua y gas. Aunque este tipo de electrólisis es alcalina, su funcionamiento difiere mucho de la tecnología convencional debido a que no hay un medio alcalino líquido, sustituido por la membrana de intercambio aniónico, por ello se asemeja mucho más a la electrólisis PEM.

En cuanto a los materiales de los distintos componentes, los electrolizadores AEM utilizan metales no nobles como Ni, Fe o Co al igual que en los electrolizadores alcalinos.

Componentes

El stack es el corazón de un sistema de electrólisis ya que es donde se genera el hidrógeno. Pero para el correcto funcionamiento de un stack se necesitan una serie de equipos y sistemas auxiliares alrededor del mismo que constituyen el balance de planta (BoP).

Circuito de agua desmineralizada

Como el electrolizador consume agua para la producción de hidrógeno, el depósito de agua desionizada, con una pureza y conductividad determinada, suministra el agua necesaria al separador gas-líquido.

Circuito de oxígeno

Pese a tener potenciales usos, la tendencia observada es que el oxígeno se ventea como práctica habitual una vez la disolución abandona el separador gas-líquido. Puede conectarse un intercambiador de calor para el aprovechamiento del calor residual de la corriente.

Circuito de hidrógeno

Siendo el hidrógeno el producto buscado, tras la etapa de separación, la corriente de hidrógeno pasa por procesos de purificación donde se eliminan posibles trazas de oxígeno y vapor de agua que pueda quedar en la corriente de salida.

El hidrógeno se almacenará en un buffer intermedio o se comprimirá, en función de cuales sean los requisitos finales del mismo.

Elementos de control

Tanto para el correcto funcionamiento del equipo, como para la gestión eléctrica, térmica y de seguridad del electrolizador, es necesario sistemas de control ad hoc para el equipo en cuestión. Es necesario un suministro de corriente continua para el funcionamiento del stack, mientras que para otros equipos auxiliares como bombas va a ser generalmente necesario un suministro de corriente alterna. [3]

Necesidades de producción

La Fundación Hidrógeno Aragón cuenta con el Hyundai Nexo como vehículo de empresa, para desplazamientos de sus empleados, por lo que se toma como referencia la recarga completa del depósito de éste vehículo, que cuenta con un total de casi 157 litros. El depósito del vehículo Nexo se trata de un almacenamiento de hidrógeno a presión de tipo IV, recipientes fabricados con una camisa polimérica de alta densidad totalmente envuelta de un compuesto de fibra de carbono.

Las necesidades de recarga, y por tanto las de producción, dependerán de cómo se encuentra la presión en el depósito del vehículo a la hora del repostaje.

Es complicado entonces prever cual será la necesidad de producción, porque además no existen datos del fabricante, ni datos tomados empíricamente para determinar la presión exacta del depósito a la que el Nexo no podría avanzar más. Sí se sabe que en otros recipientes de hidrógeno a presión de tipo IV ya ubicados en la Fundación Hidrógeno Aragón la presión mínima a la que se permite descargar este tipo de depósitos es de 15 bares.

Ante esta ausencia de datos, y considerando insuficiente tomar la restricción de presión mínima de los depósitos tipo IV, se considera una recarga completa desde cero del vehículo por la necesidad mayor de hidrógeno frente a una recarga convencional.

Se considera también que los todos los almacenamientos de hidrógeno a presión están completos al inicio de la recarga para simplificar las suposiciones.

La hidrogena presenta un tipo de recarga en cascada, como se comenta en la memoria, el tiempo de recarga corresponderá con el tiempo necesario para realizar la transferencia de hidrógeno desde el almacenamiento final, que cuenta con 900 bares de presión y con una capacidad de 26 kg de hidrógeno hasta el vehículo, siendo este tiempo de 5 minutos. [4]

Al tener en cuenta todas estas consideraciones, un criterio de diseño de tiempo mínimo de la producción de hidrógeno podría ser el tiempo que tarde el compresor diseñado para este propósito, de la marca PDC modelo PDC-3-6000/15000(100), en comprimir el volumen requerido hasta el almacenamiento de alta presión de 900 bar, entendiendo que es más costoso rellenar éste almacenamiento que el de 500 bar.

A considerar también que, al aumentar mucho la presión, el gas deja de seguir el comportamiento de gas ideal. Las moléculas se encuentran más cercanas y las fuerzas de atracción y repulsión entre ellas comienzan a ser significativas.

Para el uso de la ecuación de los gases ideales, hay que corregirla mediante el denominado factor de compresibilidad (Z) para que represente de manera eficaz el comportamiento de los gases reales.

El valor del factor de compresibilidad (Z) depende de la presión y de la temperatura y por tanto debe obtenerse de tablas, gráficas o ecuaciones.

La siguiente tabla muestra los valores del factor de compresibilidad del hidrógeno para varias presiones y temperaturas:

Presión (bar)	Temperatura (K)						
	250	273.15	298.15	350	400	450	500
1	1.00070	1.00040	1.00060	1.00055	1.00047	1.00041	1.00041
5	1.00337	1.00319	1.00304	1.00270	1.00241	1.00219	1.00196
10	1.00672	1.00643	1.00605	1.00540	1.00484	1.00435	1.00395
50	1.03387	1.03235	1.03037	1.02701	1.02411	1.02159	1.01957
100	1.06879	1.06520	1.06127	1.05369	1.04807	1.04314	1.03921
150	1.10404	1.09795	1.09189	1.08070	1.07200	1.06523	1.05836
200	1.14056	1.13177	1.12320	1.10814	1.09631	1.08625	1.07849
250	1.17789	1.16617	1.15499	1.13543	1.12034	1.10793	1.08764
300	1.21592	1.20101	1.18716	1.16300	1.14456	1.12957	1.11699
350	1.25461	1.23652	1.21936	1.19051	1.16877	1.15112	1.13648
400	1.29379	1.27220	1.25205	1.21842	1.19317	1.17267	1.15588
450	1.33332	1.30820	1.28487	1.24634	1.21739	1.19439	1.17533
500	1.37284	1.34392	1.31784	1.27398	1.24173	1.21583	1.19463
600	1.45188	1.41618	1.38797	1.33010	1.29040	1.25920	1.23373
700	1.53161	1.48880	1.44991	1.38593	1.33914	1.30236	1.27226

Tabla 1: Factor de compresibilidad del hidrógeno

El factor de compresibilidad (Z) se define como la relación entre el volumen molar del gas real y el volumen molar como gas ideal en las mismas condiciones:

$$Z = \frac{v_{real}}{v_{ideal}}$$

Donde v representa el volumen molar, es decir, V/n .

La ecuación de estado de un gas ideal sería:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Aplicando el factor de compresibilidad, la ecuación de estado de un gas real quedará de la siguiente forma:

$$P \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T$$

Por tanto:

$$P \cdot V = Z \cdot n \cdot R \cdot T \rightarrow R \cdot n = \frac{P \cdot V}{Z \cdot T}$$

A la hora de facilitar los cálculos, a no ser que se especifiquen otras condiciones distintas, y puesto que, aunque el hidrógeno se caliente al ser producido, se considerará a temperatura ambiente, 25 °C, en todos los cálculos, ya que todas las instalaciones se conservan a esa temperatura.

Para saber el número de moles necesarios para la recarga del vehículo, se tiene que:

$$n_{Dep. Nexo} = \frac{P_{700} \cdot V_{dep.Nexo}}{Z_{700} \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{700 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,157 \text{ m}^3}{1,44991 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 3.057,65 \text{ mol}$$

Multiplicando este valor por la masa molecular del hidrógeno diatómico:

$$m_{Dep.Nexo} = 3.057,65 \text{ mol} \cdot 0,002016 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 6,16 \text{ kg}$$

Para hacerse una idea del tiempo necesario para comprimir dicha cantidad de hidrógeno se tiene la siguiente imagen de la capacidad de succión del compresor:

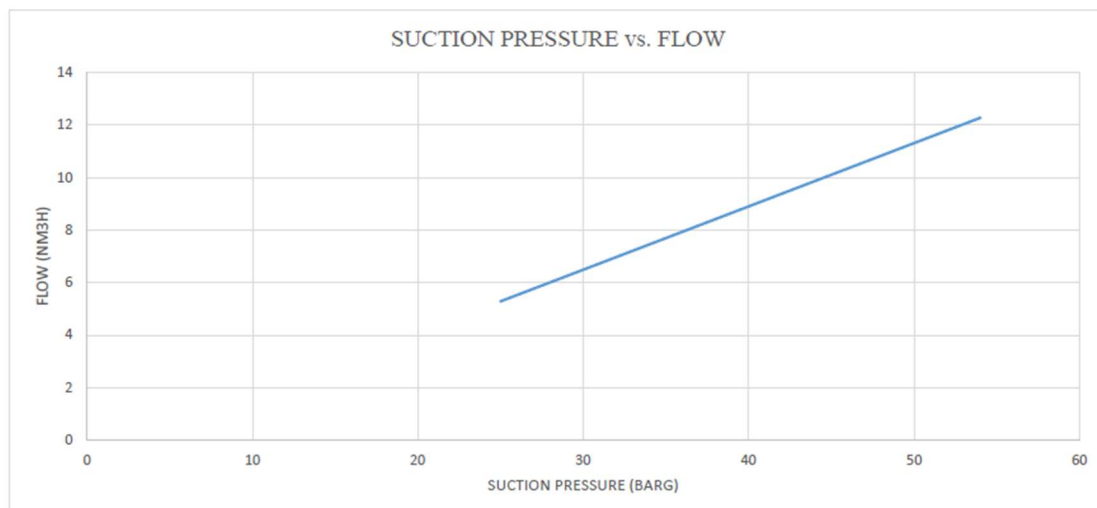


Figura 3: Curva de succión del compresor PDC modelo PDC-3-6000/15000(100)

Como la presión de succión es de 35 bar, que es la presión a la que se encuentra el depósito pulmón, el flujo será de unos 7,5 Nm³/hr.

Este y otros datos que se necesitan saber del compresor de la marca PDC, modelo PDC-3-6000/15000(100) vienen representados en la siguiente tabla:

Características principales PDC	Valor
Capacidad de succión	7,5 Nm ³ /hr
Presión de succión	25-54 barg
Presión de hidrógeno a la salida	900 barg
Potencia	7,5 kW

Tabla 2: Características principales compresor PDC modelo PDC-3-6000/15000(100)

Con la capacidad de succión se puede obtener el caudal que el compresor es capaz de trasegar. Para empezar, hay que transformar los Nm³, que son metros cúbicos en condiciones de 0 °C y 1 atmósfera de presión a m³ en las condiciones de operación, que son de 25 °C, temperatura y 35 bar. Para ello se usa la ecuación general de los gases ideales, pero, asemejar el comportamiento de un gas real al de un gas ideal solo puede realizarse de forma fiable a presiones muy bajas como se comentó con anterioridad.

En condiciones normales de 273,15 K y 1 bar el factor de compresibilidad es de 1,0004. A 35 bar y temperatura ambiente (298,15 K) el valor del factor de compresibilidad no se refleja en la tabla, por lo que se opta por interpolar el valor inmediatamente superior y el inmediatamente inferior, de este modo:

$$\frac{1,03037 - 1,00605}{50 - 10} = \frac{1,03037 - Z_{35}}{50 - 35} \rightarrow \frac{1,03037 - Z_{35}}{15} = 0,000608$$

$$Z_{35} = 1,03037 - (0,000608 \cdot 15) = 1,03037 - 0,00912 = 1,02125$$

$$Z_{35} = 1,02125$$

Por lo tanto:

$$\frac{P_N \cdot V_N}{Z_N \cdot T_N} = \frac{P_{35} \cdot V_{35}}{Z_{35} \cdot T_{amb}}$$

$$\frac{1 \cdot 7,5}{1,0004 \cdot 273,15} = \frac{35 \cdot V_{35}}{1,02125 \cdot 298,15}$$

$$V_{35} = \frac{1 \cdot 7,5 \cdot 1,01517 \cdot 298,15}{1,0004 \cdot 273,15 \cdot 35} = 0,238 \text{ m}^3$$

$$V_{35} = 0,238 \text{ m}^3$$

Se transforma este mismo volumen para saber que volumen ocuparía a 900 bar operando exactamente de la misma manera:

$$\frac{P_{35} \cdot V_{35}}{Z_{35} \cdot T_{amb}} = \frac{P_{900} \cdot V_{900}}{Z_{900} \cdot T_{amb}}$$

A falta de más datos en la tabla, se interpolará entre los dos máximos valores para hallar la compresibilidad a 900 bar.

$$\frac{1,44991 - 1,38797}{700 - 600} = \frac{Z_{900} - 1,44991}{900 - 700} \rightarrow \frac{Z_{900} - 1,44991}{200} = 0,0006194$$

$$Z_{900} = 1,44991 + (0,0006194 \cdot 200) = 1,44991 + 0,12388 = 1,57379$$

$$Z_{900} = 1,57379$$

Sustituyendo:

$$\frac{35 \cdot 0,238}{1,01517 \cdot 298,15} = \frac{900 \cdot V_{900}}{1,57379 \cdot 298,15}$$

$$V_{900} = \frac{35 \cdot 0,237 \cdot 1,57379 \cdot 298,15}{1,01517 \cdot 298,15 \cdot 900} = 0,014 \text{ m}^3$$

$$V_{900} = 0,014 \text{ m}^3$$

Para saber el número de moles que se producirán a 900 bar con este volumen, tendremos que:

$$n_{900} = \frac{P_{900} \cdot V_{900}}{Z_{900} \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{900 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,014 \text{ m}^3}{1,57379 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 322,96 \text{ mol}$$

Multiplicando este valor por la masa molecular del hidrógeno diatómico:

$$m_{900} = 322,96 \text{ mol} \cdot 0,002016 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0,651 \text{ kg}$$

Por lo tanto, el compresor PDC tendrá un caudal de hidrógeno comprimido a 900 bar de:

$$Q_{PDC,900} = 7,5 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 0,014 \text{ m}^3/\text{hr} = 322,96 \text{ mol/hr} = 0,651 \text{ kg/hr}$$

En el depósito pulmón hay una cantidad de:

$$n_{35} = \frac{P_{35} \cdot V}{Z_{35} \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{35 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 4 \text{ m}^3}{1,01517 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 5.563,15 \text{ mol}$$

Sabiendo que el compresor puede succionar hasta los 24 bar, a esa presión en el depósito pulmón hay una cantidad de:

$$\frac{1,03037 - 1,00605}{50 - 10} = \frac{1,03037 - Z_{24}}{50 - 24} \rightarrow \frac{1,03037 - Z_{24}}{26} = 0,000608$$

$$Z_{24} = 1,03037 - (0,000608 \cdot 26) = 1,014562$$

$$Z_{24} = 1,014562$$

$$n_{24} = \frac{P_{24} \cdot V}{Z_{24} \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{24 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 4 \text{ m}^3}{1,014562 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 3.817,01 \text{ mol}$$

Restando las cantidades halladas:

$$n_{por \text{ compresión}} = 5.563,15 \text{ mol} - 3.817,01 \text{ mol} = 1.746,14 \text{ mol}$$

Como el depósito del Nexo tiene una capacidad de:

$$n_{Dep. Nexo} = 3.057,65 \text{ mol}$$

Serán necesarias:

$$N = \frac{n_{Dep. Nexo}}{n_{por \text{ compresión}}} = \frac{3.057,65}{1.746,14} = 1,75 \text{ veces}$$

Para comprimir el hidrógeno necesario para una recarga, por lo que, sabiendo la cantidad de hidrógeno a comprimir, el tiempo será de:

$$Q_{PDC,900} = \frac{m_{Depósito Nexo}}{t_{PDC}} \rightarrow t_{PDC} = \frac{n_{comprimido}}{Q_{PDC,900}} = \frac{1.746,14 \text{ mol}}{322,96 \text{ mol/hr}} = 5,41 \text{ hr}$$

Además del tiempo necesario para comprimir el resto:

$$t_{PDC} = \frac{n_{comprimido} \cdot 0,75}{Q_{PDC,900}} = \frac{1.746,14 \text{ mol} \cdot 0,75}{322,96 \text{ mol/hr}} = 4,06 \text{ hr}$$

$$t_{total,PDC} = 5,41 + 4,06 = 9,47 \text{ hr}$$

$$t_{total,PDC} = 9,47 \text{ hr}$$

El tiempo total de compresión es de aproximadamente 9,5 horas, pero se necesita comprimir en 2 tandas, por lo tanto, una de las condiciones de elección entre los dos electrolizadores vendrá determinada por que sea capaz de producir 3,52 kg de hidrógeno en un tiempo mínimo de 5,4 horas.

Estudio opción electrolizador de la marca Enapter, modelo EL2.1 versión 2

Características técnicas

Como indica en el manual de usuario, este electrolizador utiliza la tecnología de membrana de intercambio aniónico (AEM), con la membrana patentada de Enapter, haciéndolo un sistema estandarizado, modular y flexible para producir hidrógeno in situ. Además, se pueden apilar varios electrolizadores formando un módulo con el cual lograr el caudal de hidrógeno requerido. [5]

Las principales características de producción vienen reflejadas en la siguiente tabla:

Características Enapter (por módulo)	Valor
Producción nominal de hidrógeno	0,5 Nm ³ /hr
Consumo de energía nominal por Nm³ de H₂ producido	4,8 kWh/Nm ³
Presión de salida de hidrógeno	35 bar
Pureza de salida de hidrógeno	~99,90
Consumo eléctrico	2,4 kW
Consumo de agua desmineralizada	0,4 l/hr

Tabla 3: Características por módulo del electrolizador Enapter modelo EL2.1 versión 2 [5]

Fundación Hidrógeno Aragón tiene un módulo conformado por 4 de estos electrolizadores, así pues, la tabla de características definitiva quedaría de la siguiente forma:

Características Enapter	Valor
Producción nominal de hidrógeno	2 Nm ³ /hr
Consumo de energía nominal por Nm³ de H₂ producido	19,2 kWh/Nm ³
Presión de salida de hidrógeno	35 bar
Pureza de salida de hidrógeno	~99,90
Consumo eléctrico	38,4 kW
Consumo de agua desmineralizada	1,6 l/hr

Tabla 4: Características del electrolizador Enapter modelo EL2.1 versión 2

Capacidad productiva

Para obtener la capacidad productiva, o caudal, que es capaz de proporcionar el electrolizador Enapter se procede exactamente como se hizo con anterioridad:

$$\frac{P_N \cdot V_N}{Z_N \cdot T_N} = \frac{P_{35} \cdot V_{35}}{Z_{35} \cdot T_{amb}}$$

$$\frac{1 \cdot 2}{1,0004 \cdot 273,15} = \frac{35 \cdot V_{35}}{1,01517 \cdot 298,15}$$

$$V_{35} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 1,01517 \cdot 298,15}{1,0004 \cdot 273,15 \cdot 35} = 0,0633 \text{ m}^3$$

$$V_{35} = 0,0633 \text{ m}^3$$

Para saber el número de moles que se producirán con ese volumen:

$$n_{35} = \frac{P_{35} \cdot V_{35}}{Z_{35} \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{35 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,0633 \text{ m}^3}{1,01517 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 88,04 \text{ mol}$$

$$88,04 \text{ mol} \cdot 0,002016 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0,1775 \text{ kg}$$

El electrolizador Enapter tendrá un caudal productivo de hidrogeno comprimido de:

$$Q_{Enapter} = 2 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 0,0633 \text{ m}^3/\text{hr} = 88,04 \text{ mol/hr} = 0,1775 \text{ kg/hr}$$

Producción simultánea con la compresión

El electrolizador Enapter tiene un caudal productivo de hidrogeno comprimido de:

$$Q_{Enapter} = 2 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

A su vez, el compresor de PDC tiene un caudal de succión a 35 bar de:

$$Q_{PDC} = 7,5 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

Como:

$$Q_{Enapter} < Q_{PDC}$$

El electrolizador Enapter no será capaz de mantener una producción simultánea con la compresión del compresor PDC.

Alternativas a la producción simultánea

Primer método: Producción contra depósito pulmón

Se espera a que el compresor PDC termine de comprimir para que el electrolizador Enapter comience a producir.

Es necesario conocer el tiempo que necesita el electrolizador Enapter para producir el volumen que solicita el compresor para una recarga. Se necesitan:

$$n_{por\ compresión} = 1.746,14\ mol$$

Se conoce que:

$$Q_{Enapter} = 2\ Nm^3/hr = 0,0633\ m^3/hr = 88,04\ mol/hr = 0,1775\ kg/hr$$

Entonces:

$$t_{Enapter} = n_{por\ compresión}/Q_{Enapter} = 1.746,14\ mol/88,04\ mol/hr = 19,83\ hr$$

Para la segunda tanda:

$$t_{Enapter} = n_{por\ compresión} \cdot 0,75/Q_{Enapter}$$

$$t_{Enapter} = 1.746,14\ mol \cdot 0,75/88,04\ mol/hr = 14,88\ hr$$

Se suma el tiempo de compresión del compresor PDC con el tiempo de producción de Enapter para saber cuánto tiempo costaría reponer una recarga del Nexo.

$$t_{tot} = t_{PDC} + t_{Enapter} + t_{PDC} + t_{Enapter}$$

$$t_{tot} = 5,41 + 19,83 + 4,06 + 14,88 = 44,18\ hr$$

El tiempo total empleado será de:

$$t_{tot} = 44,18 \text{ hr}$$

Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”

El volumen ideal del depósito “prepulmón”, calificando de ideal al volumen que te permita recargar el depósito pulmón en una sola operación, es el volumen a producir capaz de realizar la operación en un solo paso. Como la operación será comunicar con el depósito pulmón directamente se tiene la siguiente fórmula:

$$P_f \cdot V_f = n_f \cdot R \cdot T \cdot Z_f$$

El número de moles a producir final será:

$$n_f = n_{prepulmón} + n_{pulmón}$$

Con:

$$n_{pulmón} = n_{pulmón} - n_{por \text{ compresión}} = 5.563,15 - 1.746,14 = 3.817,01 \text{ mol}$$

Teniendo en cuenta que:

$$V_f = V_{pulmón} + V_{prepulmón} = 4 + V_{prepulmón}$$

Sustituyendo de la primera ecuación:

$$P_f = \frac{(n_{prepulmón} + 3.817,01) \cdot R \cdot T \cdot Z_f}{4 + V_{prepulmón}} = 3.500.000 \text{ Pa}$$

Además:

$$n_{\text{prepulmón}} = \frac{P_{35} \cdot V_{\text{prepulmón}}}{Z_{35} \cdot R \cdot T_{\text{amb}}} = \frac{35 \cdot 10^5 \cdot V_{\text{prepulmón}}}{1,01517 \cdot 8,31446 \cdot 298,15}$$

$$n_{\text{prepulmón}} = 1.390,79 \cdot V_{\text{prepulmón}}$$

Sustituyendo:

$$\frac{(1.390,79 \cdot V_{\text{prepulmón}} + 3.817,01) \cdot 8,31446 \cdot 298,15 \cdot 1,01517}{4 + V_{\text{prepulmón}}} = 3.500.000 \text{ Pa}$$

Operando:

$$(1390,79 \cdot V_{\text{prepulmón}} + 3.817,01) \cdot 2.516,6 = 14.000.000 + 3.500.000 \cdot V_{\text{prepulmón}}$$

$$3.500.006,48 \cdot V_{\text{prepulmón}} + 9.605.734,69 = 14.000.000 + 3.500.000 \cdot V_{\text{prepulmón}}$$

$$V_{\text{prepulmón}} = \frac{14.000.000 - 9605734,69}{3.500.006,48 - 3.500.000} = 678.127,36 \text{ m}^3$$

El depósito tiene un volumen ideal desmesurado, para poder tener una idea de las medidas que tendría el depósito, se recurre al cálculo de un cilindro de mínima superficie que sea capaz de almacenar dicho volumen. Para ello se tiene las fórmulas de la superficie del cilindro y de su volumen en función del radio y de la altura:

$$S_{\text{cilindro}}(r, h) = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

$$V_{\text{cilindro}}(r, h) = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Se despeja una en la otra para obtener la fórmula de la superficie en función del radio:

$$S_{Cilindro}(r) = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \frac{V_{Cilindro}}{r}$$

Por último, se deriva respecto del radio y se iguala a 0 para minimizarla:

$$4 \cdot \pi \cdot r - 2 \cdot \frac{V_{Cilindro}}{r^2} = 0$$

Despejando el radio, se obtiene el radio mínimo.

$$r_{min} = \sqrt[3]{\frac{V_{Cilindro}}{2 \cdot \pi}}$$

Y despejando en la fórmula del volumen el radio mínimo se obtiene la altura mínima.

$$h_{min} = \frac{V_{Cilindro}}{\pi \cdot r_{min}^2}$$

Sustituyendo:

$$r_{min} = \sqrt[3]{\frac{678.127,36}{2 \cdot \pi}} = 47,6 \text{ m}$$

$$h_{min} = \frac{678.127,36}{\pi \cdot 47,6^2} = 95,2 \text{ m}$$

$$r_{min} = 47,6 \text{ m}$$

$$h_{min} = 95,2 \text{ m}$$

La volumetría del depósito ideal para conseguir el equilibrio de presiones en una sola operación es desmesurada y no vale la pena considerarla, se opta por escoger entre los tamaños de depósitos más estandarizados.

Como la operación volverá a ser comunicar el depósito prepulmón con el depósito pulmón directamente se calcula el número de veces necesarias de esta operación con la fórmula usada anteriormente:

$$P_f \cdot V_f = n_f \cdot R \cdot T_{amb}$$

Solo que esta vez lo que se calcula es la presión final del conjunto, viendo cual es el número de veces necesarias para que ésta alcance los 35 bar necesarios.

Se toma como valores las condiciones del depósito prepulmón completamente cargado a 35 bar con los distintos volúmenes elegidos y del depósito pulmón justo antes de iniciar la recarga. El volumen del depósito pulmón justo antes de iniciar la recarga es de 4000 litros y la presión será la mínima a la que el compresor PDC es capaz de succionar:

$$P = 24 \text{ bar}$$

Para calcular el número de iteraciones, o número de ves que hay que igualar la presión entre el depósito “prepulmón” y el depósito pulmón, se despeja la presión de la fórmula anterior quedando lo siguiente:

$$P_f = \frac{n_f \cdot R \cdot T_{amb}}{V_f}$$

Con V_f como la suma de volúmenes del depósito “prepulmón”, que varía según el depósito elegido, y el depósito pulmón, de 4 m³. Y con n_f siendo en inicio la suma de moles que se encuentran en el depósito pulmón a 24 bar y el número de moles que se encuentran en el depósito “prepulmón” a 35 bar, sumando en cada iteración el número de moles del depósito “prepulmón” al ya existente en el depósito pulmón y obteniendo así la presión final a la que se encontraría el depósito cada vez que se comuniquen.

En el Anexo se incluye una tabla con las presiones finales en las distintas iteraciones de las distintas volumetrías de los depósitos, se puede observar allí que el número disparatado de iteraciones es debido a que al final se hace muy costoso igualar las presiones.

De esa tabla se obtiene que:

V depósito “prepulmón” (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Nº iteraciones	40	48	61	87	164

Tabla 5: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 35 bar con presión inicial de 24 bar

Si se tiene en consideración que el depósito pulmón estaría completamente recargado a una presión de 34,9 bar, se obtienen el siguiente número de iteraciones:

V depósito “prepulmón” (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Nº iteraciones	10	12	15	22	40

Tabla 6: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 34,9 bar con presión inicial de 24 bar

Se observa como el número de iteraciones cae drásticamente teniendo en cuenta esta consideración.

Se calcula el tiempo de producción teniendo en cuenta el número de iteraciones a 34,9 bar. Para ello se tendrá en cuenta que el tiempo que se tardará en recargar el depósito “prepulmón” será de:

$$t_{Enapter} = V_{prepulmón} / Q_{Enapter} \cdot N_{iteraciones}$$

$$t_{Enapter} = V_{prepulmón} / 0,0633 \text{ m}^3/\text{hr} \cdot N_{iteraciones}$$

V depósito “prepulmón” (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	394,95	379,15	355,45	347,55	315,95

Tabla 7: Tiempo de producción del electrolizador Enapter para la primera recarga del segundo método

La presión a la que quedará el depósito pulmón después de la segunda compresión será de:

$$P = \frac{(n_{\text{pulmón}} - 0,75 \cdot n_{\text{por compresión}}) \cdot R \cdot T_{\text{amb}}}{V_{\text{pulmón}}}$$

$$P = \frac{(5.563,15 - 0,75 \cdot 1.746,14) \cdot 8,31446 \cdot 298,15}{4}$$

$$P = 2.636.088 \text{ Pa} = 26,36 \text{ bar}$$

Del mismo modo que antes, para una presión inicial de 26,36 bar se obtiene de la tabla del Anexo que:

V depósito "prepulmón" (m³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Nº iteraciones	40	47	60	86	162

Tabla 8: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 35 bar con presión inicial de 26,36 bar

Si se tiene la misma consideración que en la ocasión anterior de que el depósito pulmón estaría completamente recargado a una presión de 34,9 bar, se obtienen el siguiente número de iteraciones:

V depósito "prepulmón" (m³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Nº iteraciones	10	11	15	20	38

Tabla 9: Número de iteraciones necesarias para recargar el depósito pulmón a 34,9 bar con presión inicial de 26,36 bar

Se calculará el tiempo del mismo modo que en el caso anterior:

$$t_{\text{Enapter}} = V_{\text{prepulmón}} / 0,0633 \text{ m}^3/\text{hr} \cdot N_{\text{iteraciones}}$$

V depósito "prepulmón" (m³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	394,95	347,55	355,45	315,96	300,16

Tabla 10: Tiempo de producción del electrolizador Enapter para la segunda recarga del segundo método

De este modo el tiempo total de producción para este método será de:

Volumen depósito prepulmón (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo primera recarga (h)	394,95	379,15	355,45	347,55	315,95
Tiempo primera compresión (h)	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Tiempo segunda recarga (h)	394,95	347,55	355,45	315,96	300,16
Tiempo segunda compresión (h)	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06
Tiempo total (h)	789,9	726,7	710,9	663,51	616,11

Tabla 11: Tiempos totales de producción del electrolizador Enapter con distintos tamaños de depósito prepulmón

El tiempo total será la suma de los mayores tiempos entre recarga y compresión de la primera y la segunda recarga, ya que recarga y compresión se pueden hacer simultáneamente.

Del mismo modo que antes, para poder tener una idea de las medidas que tendrían los depósitos, se recurre al cálculo de un cilindro de mínima superficie que sea capaz de almacenar dicho volumen. Obteniendo los siguientes resultados de medidas estimadas:

Volumen depósito prepulmón (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
r min (m)	0,73	0,68	0,62	0,54	0,43
h min (m)	1,47	1,36	1,24	1,08	0,86

Tabla 12: Tamaño de los depósitos de medidas estándar

Pérdida de carga en las instalaciones

El anillo de hidrógeno de baja presión que está instalado en el taller, tal y como se muestra en el Plano 2, está realizado con tubo de 1/2" de la marca Alleima, exactamente el modelo Alleima 3R60, de acero inoxidable austenítico con un contenido de 13% de Níquel, esto es así debido a que al deformar un material austenítico puede formarse martensita de deformación que hará que el material sea muy susceptible a la pérdida de ductilidad si se expone a hidrógeno, una mayor cantidad de níquel en la aleación promoverá una microestructura austenítica más estable, evitando la formación excesiva de martensita de deformación.

La instalación se compone de un anillo principal que rodea todo el taller que consta de 66.150 mm de tramo recto, 9 codos a 90° y 10 Ts, una para cada una de las

bajantes distribuidas a lo largo del taller, otra para la salida de venteo y otra para la salida de la producción.

Las bajantes para los distintos equipos son todas iguales y se componen de 2.920 mm de tubo recto y 2 codos a 90°. La salida de venteo está compuesta de 4.340 mm de tubo recto y 4 codos. Finalmente, la salida de la producción está compuesta de 6.730 mm de tubo recto, 4 codos a 90° y una válvula de corte.

Las conexiones finales entre los equipos de los electrolizadores y las bajantes se realizan con tubo flexible, que no será tomado en consideración a la hora de calcular la pérdida de carga.

Primer método: Producción contra depósito pulmón

Para el cálculo de la pérdida de carga se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

El factor de fricción lo obtendremos del diagrama de Moody, para ello primero se tiene que calcular el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

La densidad del hidrógeno es:

$$\rho_{H_2} = 0,0899 \frac{kg}{Nm^3}$$

El tubo de la instalación es de 1/2", por lo que:

$$D = 1/2" = 12,7 \text{ mm} = 0,0127 \text{ m}$$

La velocidad se obtiene:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde el área es:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{12,7}{2}\right)^2 = 126,67 \text{ mm}^2$$

El caudal es el ofrecido por el electrolizador Enapter:

$$Q = 0,0633 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \cdot \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} = 0,0000175 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sustituyendo:

$$v = \frac{0,0000175}{126,67 \cdot 10^{-6}} = 0,14 \text{ m/s}$$

Y para terminar, la viscosidad cinemática de los gases reales no se reproduce de forma precisa mediante el modelo del gas ideal, por lo que es necesario acudir a la ley de Sutherland que describe las fuerzas repulsivas intermoleculares a pequeña distancia a través de un modelo de esferas sólidas.

Con esto, para calcular la viscosidad cinemática se utilizará la siguiente fórmula:

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T_0 + C_s}{T + C_s}\right) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Donde para el hidrógeno, los datos que se utilizan son los siguientes:

$$\mu_0 = 8,76 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}; T_0 = 293,85 \text{ K}; C_s = 72 \text{ K}$$

$$\mu = 8,76 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{293,85 + 72}{298,15 + 72} \right) \cdot \left(\frac{298,15}{293,85} \right)^{\frac{3}{2}} = 8,85 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

Resumiendo:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{0,0899 \cdot 0,14 \cdot 126,67 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-6}} = 0,18$$

$$Re = 0,18$$

Como el número de Reynolds está por debajo de 2.300 nos encontramos en flujo laminar, donde el factor de fricción es:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Aunque para números de Reynolds tan bajos, según el diagrama de Moody el factor de fricción será:

$$f = 0,1$$

Lo último que nos faltaría para calcular la pérdida de carga sería la longitud de la tubería, como se explicó anteriormente el anillo principal que rodea todo el taller que son 66.150 mm de tramo recto, la bajante son 2.920 mm de tubo recto y la salida de la producción son 6.730 mm de tubo recto. Como se realiza el estudio a régimen estacionario se descartan las pérdidas en las demás bajantes al situarse estas a más de 1.000·D de distancia mínima entre ellas. Esto hace que la longitud de tubo recto sea de:

$$L = 66.150 + 2.920 + 6.730 = 75.800 \text{ mm}$$

$$L = 75.800 \text{ mm} = 75,8 \text{ m}$$

Faltarán por último las pérdidas de carga singulares debidas a los diferentes componentes de la instalación, que son 15 codos a 90°, 1 T de derivación y una T de confluencia. Debido a que no se tienen datos facilitados por el fabricante del tubo se opta por utilizar fórmulas aproximadas que dan los metros de tubería equivalente de los distintos componentes, por lo que se tiene lo siguiente:

$$Codo a 90^\circ = 30 \cdot D = 30 \cdot 0,0127 = 0,381 \text{ m}$$

$$T \text{ de derivación} = 50 \cdot D = 50 \cdot 0,0127 = 0,635 \text{ m}$$

$$T \text{ de confluencia} = 20 \cdot D = 20 \cdot 0,0127 = 0,254 \text{ m}$$

Dando en total:

$$L_{eq} = 15 \cdot 0,381 + 0,635 + 0,254 = 6,604 \text{ m}$$

A su vez:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0,1 \cdot \frac{(75,8 + 6,604)}{126,67 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0,14^2}{2 \cdot 9,81} = 64,98 \text{ m}$$

Estas pérdidas están dadas en metros de columna de hidrógeno, para transformarlo en una unidad más común habría que:

$$P_p = \rho \cdot g \cdot h_p = 0,0899 \cdot 9,81 \cdot 64,98 = 57,3 \text{ Pa}$$

$$P_p = 57,3 \text{ Pa} = 0,0006 \text{ bar}$$

La presión efectiva de las instalaciones con este equipo será entonces la resta de la que es capaz de suministrar menos las pérdidas, por lo tanto:

$$P_e = P - P_p = 35 - 0,0006 = 34,9994 \text{ bar}$$

$$P_e = 34,9994 \text{ bar}$$

Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”

Se utiliza de nuevo la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Con utilizando los datos obtenidos para el método anterior:

$$L = 82,404 \text{ m}; D = 0,0127 \text{ m}$$

Solo que esta vez, a falta de más especificaciones, para el cálculo del caudal se usara la fórmula que aparece en los anexos de la norma UNE 62620-84/2, que dice así:

$$P_1^2 - P_2^2 = 48,6 \cdot s \cdot L \cdot Q^{51,5} \cdot D^{-4,82}$$

La fórmula no va en unidades del sistema internacional, sino que, la presión está expresada en bares, la s es la densidad ficticia del gas, como aproximación se toma la densidad relativa del hidrógeno al aire, calculada como:

$$s = \frac{\rho_{\text{hidrógeno}}}{\rho_{\text{aire}}} = \frac{0,0899}{1,2} = 0,075$$

La longitud del tramo en metros, el caudal en Nm^3/h y el diámetro expresado en milímetros.

Despejando el caudal tenemos que:

$$Q = \sqrt[51,5]{\frac{P_1^2 - P_2^2}{48,6 \cdot s \cdot L \cdot D^{-4,82}}} = \sqrt[51,5]{\frac{35^2 - 24^2}{48,6 \cdot 0,075 \cdot 82,404 \cdot 12,7^{-4,82}}} = 1,287 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$Q = 1,287 \text{ Nm}^3/h$$

Transformándolo:

$$\frac{P_N \cdot V_N}{Z_N \cdot T_N} = \frac{P_{35} \cdot V_{35}}{Z_{35} \cdot T_{amb}}$$

$$V_{35} = \frac{P_N \cdot V_N \cdot Z_{35} \cdot T_{amb}}{Z_N \cdot T_N \cdot P_{35}} = \frac{1 \cdot 1,287 \cdot 1,01517 \cdot 298,15}{1,0004 \cdot 273,15 \cdot 35} = 0,041 \text{ m}^3$$

$$Q = 1,298 \text{ Nm}^3/h = 0,041 \text{ m}^3/h$$

Ahora se obtiene la velocidad de:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,041}{126,67 \cdot 10^{-6}} = 323,7 \text{ m/s}$$

Se calcula así el número de Reynolds como:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,0899 \cdot 323,7 \cdot 0,0127}{8,85 \cdot 10^{-6}} = 41.760,2$$

$$Re = 41.760,2$$

Como el número de Reynolds está por encima de 4.000 nos encontramos en flujo turbulento, donde el factor de fricción se obtendrá del diagrama de Moody.

Para entrar al diagrama de Moody se necesita la rugosidad relativa que se obtiene de:

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D}$$

El fabricante del tubo dice que la rugosidad interna de su tubo para diámetros mayores a 12 mm es de 1µm, por lo tanto:

$$Rugosidad\ relativa = \frac{0,000001}{0,0127} = 0,00008 \approx 0,0001$$

Entrando al diagrama de Moody con el número de Reynolds $Re=41.760,2$ y la rugosidad relativa como 0,0001 se obtiene un factor de fricción de:

$$f = 0,021$$

Sustituyendo en la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$h_p = 0,021 \cdot \frac{82,404}{0,0127} \cdot \frac{323,7^2}{2 \cdot 9,81} = 727.696,52\ m$$

Estas pérdidas están dadas en metros de columna de hidrógeno, para transformarlo en una unidad más común habría que:

$$P_p = \rho \cdot g \cdot h_p = 0,0899 \cdot 9,81 \cdot 444.881,2 = 641.769,4\ Pa$$

$$P_p = 641.769,4\ Pa = 6,4\ bar$$

La presión efectiva de las instalaciones con este equipo será entonces la resta de la que es capaz de suministrar menos las pérdidas, por lo tanto:

$$P_e = P - P_p = 35 - 6,4 = 28,6\ bar$$

$$P_e = 28,6\ bar$$

Coste adquisición equipos para funcionamiento del electrolizador Enapter

Primer método: Producción contra depósito pulmón

No lleva costes de adquisición de equipos asociados.

Segundo método: Producción contra depósito "prepulmón"

Para hacer una estimación de los precios que costaría fabricar un almacenamiento de hidrógeno a presión se utiliza una página web diseñada para tal uso [8], la cual funciona simplemente introduciendo el volumen del almacenamiento y la presión máxima del mismo.

Aunque los precios de la página web llevan unos años sin ser actualizados, la información que ofrece es lo suficientemente precisa como para hacer la estimación.

Se obtiene entonces que:

Volumen depósito "prepulmón" (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste de adquisición (€)	3.406	2.725	2.044	1.362	661,75

Tabla 13: Coste de adquisición de los depósitos "prepulmón" según volumetría del electrolizador Enapter para el segundo método

Gasto energético del electrolizador Enapter

Primer método: Producción contra depósito pulmón

El electrolizador Enapter tiene una potencia de 38,4 kW en régimen estacionario, como tendrá que estar trabajando 34,71 horas para producir el hidrógeno necesario, el consumo energético será de:

$$E_{prod} = P \cdot t = 38,4 \cdot 34,71 = 1.332,86 \text{ kWh}$$

Además, tiene un consumo de 1,6 litros de agua desmineralizada por hora. Para llevar esa agua al equipo se usa una bomba con una potencia de 0,4 kW, por lo que:

$$E_{bomb} = P \cdot t = 0,4 \cdot 34,71 = 13,88 \text{ kWh}$$

El consumo total de este equipo para la producción de 6,16 kilogramos de hidrógeno será de:

$$E_{tot} = E_{prod} + E_{bomb} = 1.332,86 + 13,88 = 1.346,74 \text{ kWh}$$

$$E_{tot} = 1.346,74 \text{ kWh}$$

Con un coste promedio de todo el día en la actualidad de 0,1833 € el kWh, tendrá un gasto económico de:

$$\text{Coste energético} = E_{tot} \cdot \text{Precio} = 1.346,74 \text{ kWh} \cdot 0,1833 \text{ €/kWh} = 246,86 \text{ €}$$

$$\text{Coste energético} = 246,86 \text{ €}$$

Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”

Operando exactamente igual que en el método anterior, se tabulan los resultados para los distintos tamaños de depósito obteniendo:

Volumen depósito (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo total producción (h)	789,9	726,7	710,9	663,51	616,11
Energía de producción (kWh)	30.332,16	27.905,28	27.298,56	25.478,78	23.658,62
Energía bombeo (kWh)	315,96	290,68	284,36	265,40	246,44
Energía total (kWh)	30.648,12	28.195,96	27.582,92	25.744,19	23.905,07
Coste energético (€)	5.617,8	5.168,32	5.055,95	4.718,91	4.381,8

Tabla 14: Coste energético según volumetría del depósito “prepulmón” del electrolizador Enapter para el segundo método

Coste económico total según metodología del electrolizador Enapter

Primer método: Producción contra depósito pulmón

Dada la simplicidad del método propuesto y al no llevar costes de adquisición asociados, el coste total es el coste del gasto energético:

$$\text{Coste total} = 246,86 \text{ €}$$

Segundo método: Producción contra depósito "prepulmón"

El coste total de este método será la suma del coste energético con el coste de adquisición del depósito de la volumetría oportuna. Obteniéndose así la siguiente tabla de costes totales:

Volumen depósito "prepulmón" (m3)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	9.024	7.893	7.100	6.081	5.044

Tabla 15: Coste total según volumetría del depósito "prepulmón" del electrolizador Enapter para el segundo método

Conclusiones y resumen de resultados del electrolizador Enapter

Resumen

Para finalizar con el estudio del funcionamiento del electrolizador Enapter, se ofrece una tabla resumen con los tiempos de producción totales y los costes que implica aplicar esa metodología:

Primer método: Producción contra depósito pulmón

Coste total (€)	246,86
Tiempo total de la producción (h)	44,18

Tabla 16: Coste-Tiempo del electrolizador Enapter para el primer método

Segundo método: Producción contra depósito “prepulmón”

Volumen depósito "prepulmón" (m3)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	9.024	7.893	7.100	6.081	5.044
Tiempo total de la producción (h)	799,37	736,17	720,37	672,98	625,58

Tabla 17: Coste-Tiempo según volumetría del depósito “prepulmón” del electrolizador Enapter para el segundo método

Conclusión

Producir contra un depósito “prepulmón” para luego verter la producción al depósito pulmón dispara exageradamente los tiempos de producción y los costes, debido al número disparatado de horas que debe de estar produciendo y el precio por adquisición de un depósito para hidrógeno a presión, quedando completamente descartado este método si lo comparamos con el primer método. Además de tener unas pérdidas de presión muy elevadas en las instalaciones al conectar los depósitos pulmón y “prepulmón”.

De los dos métodos propuestos, el primer método, esperar a que el compresor PDC termine de comprimir para volcar la producción al depósito pulmón, es el método más viable de llevar a cabo, con un tiempo total de 44,18 horas y un coste total sólo del gasto energético de 246,86 €.

Estudio opción electrolizador de la marca McPhy, modelo Piel by McPhy, Rev:1.03

Características técnicas

El electrolizador Piel by McPhy utiliza la electrólisis alcalina, una de las tecnologías más probadas y más confiables del mercado para producir hidrógeno.

Del mismo modo que en el caso anterior, las principales características de producción vienen reflejadas en la siguiente tabla:

Características McPhy	Valor
Producción nominal de hidrógeno	10 Nm ³ /hr
Consumo de energía nominal por Nm³ de H₂ producido	4,56 kWh/Nm ³
Presión de salida de hidrógeno	8 barg
Pureza de salida de hidrógeno	~99,50
Consumo eléctrico	45,6 kW
Consumo de agua desmineralizada	9 l/hr

Tabla 18: Características del electrolizador McPhy modelo Piel by McPhy, Rev:1.03 [6]

Capacidad productiva

Se procede del mismo modo que con el electrolizador Enapter, solo que esta vez la presión de salida del electrolizador McPhy es de 8 barg, que son 9 bar, y el caudal es de 10 Nm³/hr, para obtener la capacidad productiva:

$$\frac{P_N \cdot V_N}{Z_N \cdot T_N} = \frac{P_9 \cdot V_9}{Z_9 \cdot T_{amb}}$$

A 9 bar y temperatura ambiente (298,15 K) el valor del factor de compresibilidad se haya interpolando el valor inmediatamente superior y el inmediatamente inferior, de este modo:

$$\frac{1,00605 - 1,00304}{10 - 5} = \frac{1,00605 - Z_9}{10 - 9} \rightarrow \frac{1,00605 - Z_9}{1} = 0,000602$$

$$Z_9 = 1,00605 - 0,000602 = 1,005448$$

$$Z_9 = 1,005448$$

Por lo tanto:

$$\frac{1 \cdot 10}{1,0004 \cdot 273,15} = \frac{9 \cdot V_9}{1,005448 \cdot 298,15}$$

$$V_9 = \frac{1 \cdot 10 \cdot 1,005448 \cdot 298,15}{1,0004 \cdot 273,15 \cdot 9} = 1,22 \text{ m}^3$$

$$V_9 = 1,22 \text{ m}^3$$

Para saber la masa que se producirá con ese volumen:

$$n_9 = \frac{P_9 \cdot V_9}{Z_9 \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{9 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 1,22 \text{ m}^3}{1,005448 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 440,53 \text{ mol}$$

$$440,53 \text{ mol} \cdot 0,002016 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 0,888 \text{ kg}$$

El electrolizador McPhy tendrá un caudal productivo de hidrógeno a 9 bar de:

$$Q_{McPhy} = 10 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,22 \text{ m}^3/\text{hr} = 440,53 \text{ mol/hr} = 0,888 \text{ kg/hr}$$

Producción simultánea con la compresión

Como el electrolizador McPhy produce hidrógeno a 9 bar, lo primero que hay que hacer es aumentar la presión hasta los 35 bar necesarios para cargar el depósito pulmón y dejar el anillo presurizado.

El caudal productivo de McPhy a 9 bar es de:

$$Q_{McPhy} = 10 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,22 \text{ m}^3/\text{hr} = 440,53 \text{ mol/hr} = 0,888 \text{ kg/hr}$$

Para aumentar la presión hasta los 35 bar, Fundación Hidrógeno Aragón cuenta con un compresor de gas de una sola etapa y doble acción de la marca Haskel, modelo 8AGD-5, con una relación de compresión de 5:1.

Haskel cuenta con una aplicación [7] que es capaz de proporcionar la curva de compresión, con los distintos consumos. Las características que no pueden ser sacadas de la curva de compresión se muestran en la siguiente tabla:

Características principales HASKEL	Valor
Presión de succión	4-172 barg
Potencia	7,5 kW

Tabla 19: Características principales compresor Haskel modelo 8AGD-5 [7]

Para el caso del 8AGD-5 se obtiene la siguiente curva:

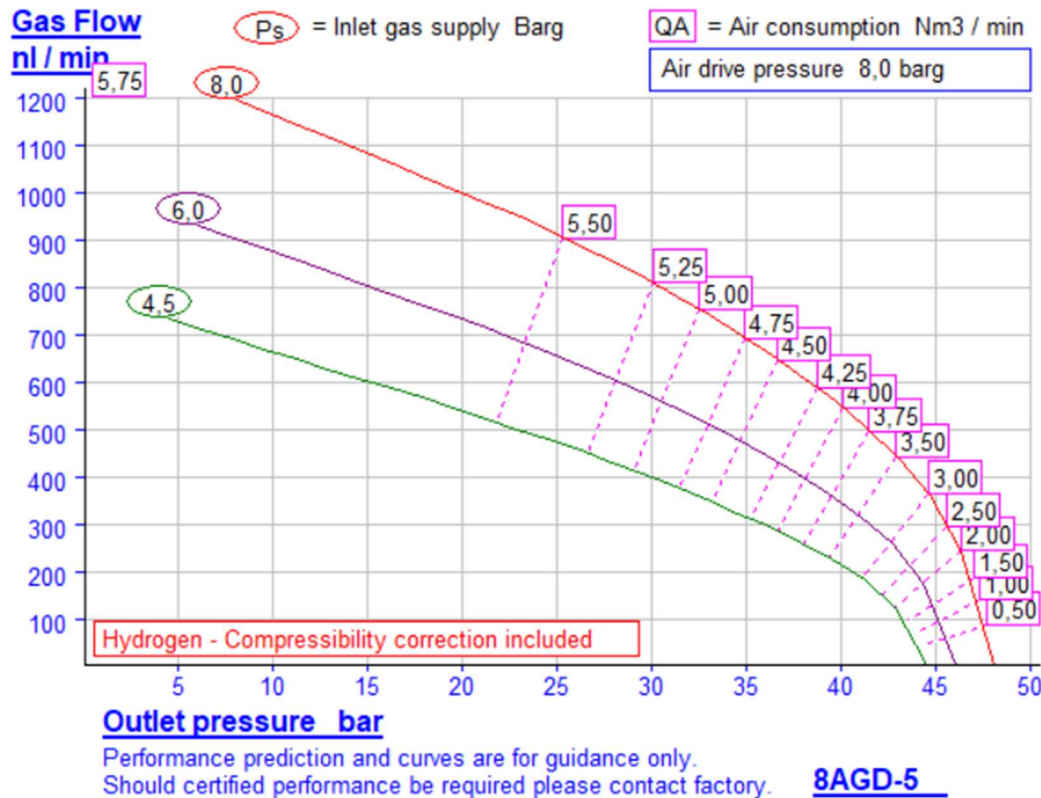


Figura 4: Curva de compresión del compresor Haskel modelo 8AGD-5 [7]

Para el caso concreto que está en estudio, la presión a la salida debería de ser de 34 barg, entrando con este valor a la curva de compresión se puede obtener la siguiente tabla resumen de consumos específicos:

Características productivas HASKEL 8AGD-5	Valor
Presión aire comprimido	8 barg
Caudal de hidrógeno	710 Nl/min
Presión de hidrógeno a la entrada	8 barg
Presión de hidrógeno a la salida	34 barg

Tabla 20: Características productivas compresor Haskel modelo 8AGD-5 [7]

Se transforma el caudal a las unidades que se llevan usando durante este proceso:

$$Q_{8AGD-5} = 710 \text{ Nl/min} = 42,6 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

Si comparamos este dato con la producción del electrolizador McPhy:

$$Q_{McPhy} = 10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

Contando también con el caudal del compresor PDC:

$$Q_{PDC} = 7,5 \text{ Nm}^3/\text{hr}$$

Se ve que:

$$Q_{PDC} < Q_{McPhy} < Q_{8AGD-5}$$

SI McPhy produjera el hidrógeno a 35 bar, sería capaz de producir simultáneamente con la compresión del compresor PDC, pero, como la producción es a 8 bar, el caudal es insuficiente para el compresor Haskell, que es el encargado de proporcionar hidrógeno a 35 bar, por lo tanto, la producción simultánea con la compresión del compresor PDC no es una opción para el electrolizador McPhy.

Alternativas a la productividad simultánea

Primer método: Producción contra depósito pulmón

Debido a que la producción de McPhy no se considera constante, sino que es más bien pulsante, este método queda eliminado porque el compresor Haskell sufriría mucho con los arranques y paradas debidas a la producción pulsante.

Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor

Para el cálculo del volumen ideal, comprendiendo ideal como el volumen necesario para realizar la recarga del pulmón de una sola vez, se utiliza la aplicación que ofrece Haskell para la elección de los compresores, teniendo en cuenta que el compresor elegido será el modelo 8AGD-5.

La aplicación del compresor Haskell ofrece datos dependiendo del tipo de recarga, en este caso se elige el método compresión de depósito contra depósito:

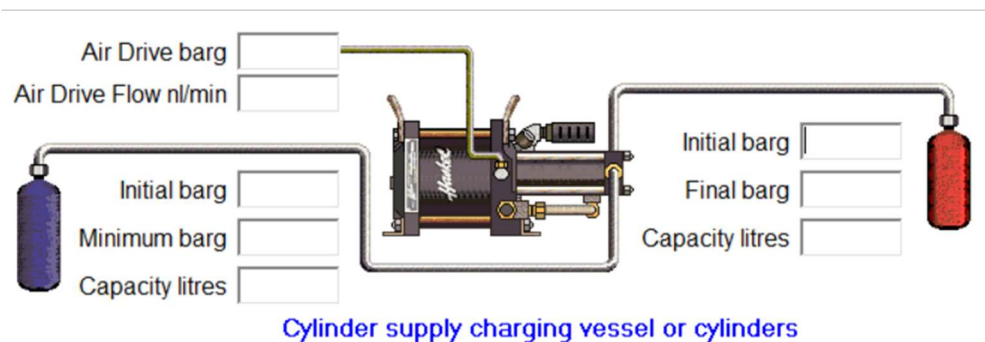


Figura 5: Datos necesarios de la aplicación dell compresor Haskell [7]

Se necesitan los datos que aparecen en la imagen superior para obtener los tiempos de compresión.

Los datos necesarios para el depósito acumulador son:

En la parte izquierda de la Figura 3, la presión inicial será la que ofrece el electrolizador McPhy de 8 barg. La presión mínima será la presión mínima de succión del compresor Haskell modelo 8AGD-5, en este caso de 4 barg. La capacidad del depósito será la que deje una presión de 4 barg en el depósito acumulador para realizar la recarga del depósito pulmón completa a 35 bar.

En la parte derecha de la Figura 3, los datos serán los del depósito pulmón: la presión final es la presión máxima a la que está diseñado el depósito, de 34 barg. La capacidad del depósito pulmón es de 4000 litros. La presión inicial a la que se encuentra el depósito pulmón será la misma que la utilizada en el caso del electrolizador Enapter, que era de:

$$P = 24 \text{ bar}$$

Considerando la presión ambiental como 1 bar:

$$P = 23 \text{ barg}$$

Con respecto a la presión de aire comprimido, Fundación Hidrógeno Aragón tiene a su servicio un compresor de la marca Josval, modelo M-780, que ofrece aire comprimido a 15 bar.

El compresor Haskell necesita un flujo de aire comprimido para un funcionamiento a máxima capacidad de unos 7.000 NI/min a una presión de 10 bares. Dada la discrepancia entre presión de salida necesaria y la presión que ofrece el compresor de Fundación Hidrógeno Aragón, se decide aconsejar que adquieran un nuevo compresor que sea capaz de producir unos 7.000 NI/min a una presión de 10 bares. La elección de éste compresor será descrita más adelante.

Se utilizará en todos los casos, para obtener tiempos, las cantidades de presión y flujo previamente nombradas.

Así con todo lo descrito con anterioridad, la aplicación de Haskell determina que se necesita un volumen del acumulador ideal de:

$$V_{acum} = 11.000 \text{ litros} = 11 \text{ m}^3$$

Y, además, dice que el tiempo de compresión es de:

$$t_{compresión} = 70 \text{ min} = 1,17 \text{ h}$$

Si el electrolizador McPhy tiene un caudal productivo de:

$$Q_{McP} = 10 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,22 \text{ m}^3/\text{hr}$$

El tiempo necesitado para producir esa cantidad será de:

$$t_{McPhy} = V_{acum}/Q_{McPhy} = 11 \text{ m}^3/1,22 \text{ m}^3/\text{hr} = 9 \text{ h}$$

Por lo tanto, el tiempo de la primera recarga será de:

$$t_{primera} = t_{McPhy} + t_{compresión} = 9 \text{ h} + 1,17 = 10,17 \text{ h}$$

$$t_{primera} = 10,17 \text{ h}$$

Del mismo modo que en el caso del estudio del electrolizador Enapter, hacen falta dos recargas del depósito pulmón para que el compresor PDC produzca el hidrógeno suficiente, por ello se necesitan conocer los tiempos de producción de esta segunda recarga, para comprimir la recarga desde 26,36 bar el tiempo de compresión es de:

$$t_{compresión} = 47 \text{ min} = 0,78 \text{ h}$$

Como el depósito acumulador no se vacía totalmente, sino que se queda a una presión de 4 barg, el tiempo de rellenado será menor que el tiempo de recarga del depósito completo.

Se calcula el tiempo de rellenado de la siguiente forma, se obtiene el número de moles totales que entran en el depósito completo y a este resultado se le resta el número de moles que quedarán al terminar la compresión.

Con el depósito acumulador después de la compresión habrá:

$$n_5 = \frac{P_5 \cdot V_{acum}}{Z_5 \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{5 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot V_{acum}}{1,00304 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 201,9 \cdot V_{acum} \text{ mol}$$

$$n_5 = 201,9 \cdot V_{acum} \text{ mol}$$

Con el depósito acumulador lleno habrá:

$$n_9 = \frac{P_9 \cdot V_9}{Z_9 \cdot R \cdot T_{amb}} = \frac{9 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot V_{acum}}{1,005448 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 361,09 \cdot V_{acum} \text{ mol}$$

$$n_9 = 361,09 \cdot V_{acum} \text{ mol}$$

Se debe producir la diferencia:

$$n_{prod.} = n_9 - n_5 = 361,09 \cdot V_{acum} - 201,9 \cdot V_{acum} = 159,19 \cdot V_{acum} \text{ mol}$$

Si McPhy tiene un caudal productivo de:

$$Q_{McPhy} = 10 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 1,22 \text{ m}^3/\text{hr} = 0,888 \text{ kg/hr}$$

$$0,888 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} / 0,002016 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = 440,48 \text{ mol/hr}$$

El tiempo de producción de recarga del depósito acumulador será de:

$$t_{\text{rellenado}} = 159,19 \cdot V_{\text{acum}} / 440,48$$

Por lo tanto, el tiempo de la segunda recarga será de:

$$t_{\text{segunda}} = t_{\text{rellenado}} + t_{\text{compresión}} = 159,19 \cdot V_{\text{acum}} / 440,48 + 0,78 \text{ h}$$

Con un volumen del depósito acumulador de 11 m³:

$$t_{\text{segunda}} = 159,19 \cdot 11 / 440,48 + 0,78 = 3,99 + 0,78 = 4,77 \text{ hr}$$

El tiempo total será de:

$$t_{\text{tot}} = t_{\text{primera}} + t_{\text{segunda}} + t_{\text{compresión,PDC}} = 10,17 + 4,77 + 9,47 = 24,4 \text{ hr}$$

$$t_{\text{tot}} = 24,4 \text{ hr}$$

El tamaño aproximado del depósito acumulador se obtiene de nuevo con el método del cilindro con menor superficie, obteniendo:

$$r_{\text{min}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{cilindro}}}{2 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{11}{2 \cdot \pi}} = 1,2 \text{ m}$$

$$h_{min} = \frac{11}{\pi \cdot r_{min}^2} = 2,4 \text{ m}$$

$$r_{min} = 1,2 \text{ m}$$

$$h_{min} = 2,4 \text{ m}$$

Dada la gran volumetría del depósito y el poco espacio disponible en el taller de Fundación Hidrógeno Aragón, tal y como se muestra en el Plano 3, se opta además por calcular también los tiempos de producción para depósitos de menor volumen con volumen estándar.

Se elegirán depósitos con volúmenes estandarizados de 2.500, 2.000, 1.500, 1.000 y 500 litros como en el caso del electrolizador Enapter.

Se necesitarán varias recargas para lograrlo. Para calcular el tiempo de producción se calcula el tiempo de llenado completo del depósito como:

$$t_{llenado} = V_{acu}/Q_{McPhy}$$

Como el depósito acumulador no se vacía totalmente, sino que se queda a una presión de 4 barg, el tiempo de rellenado será menor que el tiempo de recarga del depósito completo.

Se calcula el tiempo de rellenado como en el caso anterior:

$$t_{rellenado} = 159,19 \cdot V_{acum} / 440,48$$

Para saber el número de veces que habrá que recargar el depósito acumulador para rellenar el depósito pulmón, con la aplicación de Haskel se puede obtener la diferencia de presiones entre entrada y salida que es capaz de ofrecer el compresor con cada recarga haciendo que el depósito acumulador quede a una presión de 4 barg. Ésta diferencia de presión se mantiene constante, aumentando el mismo diferencial de presión en el depósito cada vez que se comprime. Así pues, dividiendo la diferencia de presiones final e inicial del depósito pulmón entre la diferencia que se obtiene en la aplicación se puede calcular el número de veces que habrá que rellenar el depósito acumulador como:

$$N^{\circ} \text{ recargas} = \frac{P_{\text{Final dep. pulmón}} - P_{\text{Inicial dep. pulmón}}}{\Delta P_{\text{compresor}}}$$

Cuando el número de veces no sea un número exacto, tendrá que ser redondeado al alza para poder tener las mismas condiciones en el depósito acumulador que en las veces anteriores a la hora de hacer la última recarga. El tiempo empleado para las compresiones, tanto completas como parciales, también vendrá determinado por la aplicación de Haskel.

El tiempo de la primera recarga se calculará con la siguiente fórmula:

$$t_{\text{primera}} = t_{\text{llenado}} + t_{\text{rellenado}} \cdot (N^{\circ} \text{ recargas}_{\text{Al alza}} - 1) + t_{\text{compresión}} \cdot (N^{\circ} \text{ recargas}_{\text{Al alza}} - 1) + t_{\text{última compresión}}$$

El tiempo de la segunda recarga se calculará como:

$$t_{\text{segunda}} = t_{\text{rellenado}} \cdot (N^{\circ} \text{ recargas}_{\text{Al alza}}) + t_{\text{compresión}} \cdot (N^{\circ} \text{ recargas}_{\text{Al alza}} - 1) + t_{\text{última compresión}}$$

El tiempo total será la suma de los tiempos más altos entre la recarga y la compresión del compresor PDC de la primera y la segunda recarga debido a que se hace simultáneamente.

Con todos estos detalles descritos, se puede obtener la siguiente tabla de resultados:

Volumen depósito acumulador (m ³)	11	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo llenado depósito acumulador (h)	9,02	2,05	1,64	1,23	0,82	0,41
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	1	4	5	6,67	10	20
Nº de recargas al alza	1	4	5	7	10	20
Tiempo de compresión Haskel (h)	1,17	0,27	0,22	0,17	0,1	0,05
Tiempo de última compresión (h)	0	0,27	0,22	0,12	0,1	0,05
Tiempo de compresión PDC (h)	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Tiempo primera recarga (h)	10,19	5,86	5,66	5,61	5,06	4,83
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	3,98	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	1	3,06	3,82	5,09	7,64	15,28
Nº de recargas al alza	1	4	4	6	8	16
Tiempo de compresión Haskel (h)	0,78	0,28	0,22	0,17	0,1	0,05
Tiempo de última compresión (h)	0	0,02	0,2	0,02	0,08	0,02
Tiempo de compresión PDC (h)	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06
Tiempo segunda recarga (h)	4,76	4,5	3,78	4,11	3,66	3,65
Tiempo total (h)	14,95	10,36	9,72	9,72	9,47	9,47

Tabla 21: Tiempos totales de producción del electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador para el segundo método

Tercer método: Compresión contra depósito “prepulmón”

Por desgracia, al igual que ocurría en el primer método, la producción pulsante, no continúa, del electrolizador McPhy inválida este método.

Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”

Como el compresor Haskel debe de comprimir contra un depósito al menos presurizado a la misma presión que tiene a la entrada, se producirá hidrógeno con McPhy primero contra el depósito “prepulmón”, y una vez este se encuentre a una presión de 8 barg se procederá a producir contra el depósito acumulador para comprimir la producción contra el depósito “prepulmón”. De esta manera habrá que contabilizar este tiempo de producción para sumarlo al total. A su vez, al variar la presión inicial del depósito receptor

del hidrógeno comprimido de 24 barg a 8 barg, también varía el volumen del depósito acumulador ideal, ofreciendo Haskel una solución de:

$$V_{accum} = 26000 \text{ litros} = 26 \text{ m}^3$$

Se descartará el uso de este volumen del depósito acumulador por la gran capacidad que es necesaria en el mismo.

Del mismo modo que en el método anterior, se procede a ver los tiempos de producción para los distintos tamaños del depósito acumulador y del depósito “prepulmón”.

Se descarta el uso del volumen ideal del depósito acumulador debido a que está sobredimensionado para las volumetrías que se manejan del depósito “prepulmón”, el tamaño ideal del depósito “prepulmón” es desmesurado como se vio en el estudio del electrolizador Enapter.

Se utilizarán los mismos tamaños de depósito acumulador y de depósito “prepulmón” utilizados en los cálculos de los anteriores métodos de producción. Al utilizar los mismos tamaños de depósito prepulmón que con el electrolizador Enapter, ya se conocen el número de iteraciones necesarias para rellenar el depósito pulmón con el depósito prepulmón.

Para saberla presión a la que quedará el depósito “prepulmón” a la hora de iniciar la segunda recarga, se procede del mismo modo que se ha venido haciendo con anterioridad, como la operación será comunicar con el depósito pulmón directamente se tiene la siguiente fórmula:

$$P_{inicial} \cdot V_{inicial} = n_{inicial} \cdot R \cdot T$$

La presión inicial será:

$$P_f = \frac{(n_{prepulmón} + n_{pulmón}) \cdot R \cdot T}{V_{prepulmón} + V_{pulmón}}$$

Sustituyendo los valores conocidos:

$$P_f = \frac{(n_{\text{prepulmón}} + 3.817,01) \cdot R \cdot T}{V_{\text{prepulmón}} + 4}$$

Con:

$$n_{\text{prepulmón}} = \frac{P_{\text{prepulmón}} \cdot V_{\text{prepulmón}}}{R \cdot T}$$

$$n_{\text{prepulmón}} = \frac{35 \cdot 10^5 \cdot V_{\text{prepulmón}}}{8,31446 \cdot 298,15} = 1.411,88 \cdot V_{\text{prepulmón}}$$

$$n_{\text{prepulmón}} = 1.411,88 \cdot V_{\text{prepulmón}}$$

Así pues:

$$P_{\text{inicial}} = \frac{(1.411,88 \cdot V_{\text{prepulmón}} + 3.817,01) \cdot 2.478,96}{4 + V_{\text{prepulmón}}}$$

Para el inicio de la segunda recarga del depósito pulmón:

$$n_{26,36} = \frac{P_{26,36} \cdot V}{Z_{26,36} \cdot R \cdot T_{\text{amb}}} = \frac{26,36 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 4 \text{ m}^3}{1,01599688 \cdot 8,31446 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K mol}} \cdot 298,15 \text{ K}} = 4186,43 \text{ mol}$$

De tal modo:

$$P_{\text{inicial}} = \frac{(1.411,88 \cdot V_{\text{prepulmón}} + 4186,43) \cdot 2.478,96}{4 + V_{\text{prepulmón}}}$$

Se obtendrán así las siguientes tablas de tiempo con las distintas configuraciones de depósitos.

Depósito “prepulmón” de 2,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo llenado depósito “prepulmón” (h)	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Tiempo llenado depósito acumulador (h)	2,05	1,64	1,23	0,82	0,41
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	6,50	8,13	10,83	16,25	32,50
Nº de recargas al alza	7,00	9,00	11,00	17,00	33,00
Tiempo de compresión Haskel 1 ite. (h)	1,58	1,63	1,63	1,70	2,15
Presión post. depósito “prepulmón” (bar)	28,02	28,02	28,02	28,02	28,02
Tiempo compresión 2 ite. y más (h)	0,43	0,52	0,53	0,54	0,59
Número de iteraciones	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Tiempo primera recarga (h)	116,97	138,29	145,67	187,88	309,35
Tiempo de compresión PDC (h)	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Presión inicial depósito “prepulmón” (bar)	29,43	29,43	29,43	29,43	29,43
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	1,14	1,43	1,91	2,86	5,72
Nº de recargas al alza	2,00	2,00	2,00	3,00	6,00
Tiempo de compresión Haskel (h)	0,43	0,52	0,53	0,54	0,59
Numero de iteraciones	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
Tiempo segunda recarga (h)	29,50	27,34	23,64	29,80	50,92
Tiempo de compresión PDC (h)	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06
Tiempo total (h)	146,47	165,63	169,31	217,68	360,27

Tabla 22: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2,5 m³

Depósito “prepulmón” de 2 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo llenado depósito “prepulmón” (h)	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
Tiempo llenado depósito acumulador (h)	2,05	1,64	1,23	0,82	0,41
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	5,20	6,50	8,67	13,00	26,00
Nº de recargas al alza	6,00	7,00	9,00	13,00	26,00
Tiempo de compresión Haskel 1 ite. (h)	1,58	1,63	1,63	1,70	2,15
Presión post. depósito “prepulmón” (bar)	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44
Tiempo compresión 2 ite. y más (h)	0,35	0,52	0,50	0,53	0,50
Número de iteraciones	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Tiempo primera recarga (h)	94,56	108,06	116,27	143,09	216,15
Tiempo de compresión PDC (h)	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Presión inicial depósito “prepulmón” (bar)	28,96	28,96	28,96	28,96	28,96
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	1,01	1,26	1,68	2,52	5,04
Nº de recargas al alza	2,00	2,00	2,00	3,00	6,00
Tiempo de compresión Haskel (h)	0,35	0,52	0,50	0,53	0,50
Numero de iteraciones	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
Tiempo segunda recarga (h)	27,67	27,34	22,98	29,58	44,98
Tiempo de compresión PDC (h)	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06
Tiempo total (h)	122,22	135,39	139,25	172,67	261,13

Tabla 23: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2 m³

Depósito “prepulmón” de 1,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo llenado depósito “prepulmón” (h)	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
Tiempo llenado depósito acumulador (h)	2,05	1,64	1,23	0,82	0,41
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	3,90	4,88	6,50	9,77	19,55
Nº de recargas al alza	4,00	5,00	7,00	10,00	20,00
Tiempo de compresión Haskel 1 ite. (h)	0,88	0,92	0,95	0,98	1,28
Presión post. depósito “prepulmón” (bar)	26,75	26,75	26,75	26,75	26,75
Tiempo compresión 2 ite. y más (h)	0,23	0,23	0,23	0,32	0,30
Número de iteraciones	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Tiempo primera recarga (h)	71,47	74,78	84,31	104,30	146,89
Tiempo de compresión PDC (h)	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Presión inicial depósito “prepulmón” (bar)	28,41	28,41	28,41	28,41	28,41
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	0,84	1,05	1,40	2,10	4,20
Nº de recargas al alza	1,00	2,00	2,00	3,00	5,00
Tiempo de compresión Haskel (h)	0,23	0,23	0,23	0,32	0,30
Numero de iteraciones	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Tiempo segunda recarga (h)	17,11	28,78	23,34	30,59	36,11
Tiempo de compresión PDC (h)	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06
Tiempo total (h)	88,59	103,56	107,64	134,89	183,01

Tabla 24: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m³

Depósito “prepulmón” de 1 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo llenado depósito “prepulmón” (h)	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
Tiempo llenado depósito acumulador (h)	2,05	1,64	1,23	0,82	0,41
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	2,60	3,25	4,33	6,50	13,00
Nº de recargas al alza	3,00	4,00	5,00	7,00	13,00
Tiempo de compresión Haskel 1 ite. (h)	0,62	0,65	0,65	0,65	0,73
Presión post. depósito “prepulmón” (bar)	25,92	25,92	25,92	25,92	25,92
Tiempo compresión 2 ite. y más (h)	0,15	0,28	0,23	0,17	0,20
Número de iteraciones	22,00	22,00	22,00	22,00	22,00
Tiempo primera recarga (h)	72,23	90,92	87,49	83,33	110,69
Tiempo de compresión PDC (h)	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Presión inicial depósito “prepulmón” (bar)	27,76	27,76	27,76	27,76	27,76
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	0,62	0,78	1,04	1,56	3,12
Nº de recargas al alza	1,00	1,00	2,00	2,00	4,00
Tiempo de compresión Haskel (h)	0,15	0,28	0,23	0,17	0,20
Numero de iteraciones	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Tiempo segunda recarga (h)	21,15	20,19	31,11	21,19	30,52
Tiempo de compresión PDC (h)	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06
Tiempo total (h)	93,38	111,11	118,60	104,52	141,21

Tabla 25: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1 m³

Depósito “prepulmón” de 0,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo llenado depósito “prepulmón” (h)	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Tiempo llenado depósito acumulador (h)	2,05	1,64	1,23	0,82	0,41
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	1,30	1,63	2,17	3,25	6,50
Nº de recargas al alza	2,00	2,00	3,00	4,00	7,00
Tiempo de compresión Haskel 1 ite. (h)	0,30	0,32	0,33	0,33	0,37
Presión post. depósito “prepulmón” (bar)	24,92	24,92	24,92	24,92	24,92
Tiempo compresión 2 ite. y más (h)	0,07	0,13	0,13	0,17	0,12
Número de iteraciones	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
Tiempo primera recarga (h)	79,72	70,26	82,64	85,78	84,38
Tiempo de compresión PDC (h)	5,41	5,41	5,41	5,41	5,41
Presión inicial depósito “prepulmón” (bar)	26,95	26,95	26,95	26,95	26,95
Tiempo rellenado depósito acumulador (h)	0,91	0,73	0,54	0,36	0,18
Nº de recargas	0,35	0,44	0,59	0,88	1,76
Nº de recargas al alza	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00
Tiempo de compresión Haskel (h)	0,07	0,13	0,13	0,17	0,12
Numero de iteraciones	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
Tiempo segunda recarga (h)	37,02	32,66	25,76	20,13	22,66
Tiempo de compresión PDC (h)	4,06	4,06	4,06	4,06	4,06
Tiempo total (h)	116,74	102,91	108,40	105,91	107,04

Tabla 26: Tiempos totales de producción de electrolizador McPhy con distintos tamaños de depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 0,5 m³

Pérdida de carga en las instalaciones actuales

Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor

Para calcular la pérdida de carga se procede como en el caso anterior con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

El factor de fricción, de nuevo, lo obtendremos del diagrama de Moody, se vuelve a calcular el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

La velocidad se calculará como:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Para hallar el caudal que da el compresor Haskel se operará de la siguiente manera:

Se sabe que el pistón de dicho compresor desplaza por cada ciclo 71,4 pulgadas³, transformado a unidades del sistema internacional:

$$V = 71,4 \text{ pulgadas}^3/\text{ciclo} = 0,00117 \text{ m}^3/\text{ciclo}$$

Además, el compresor es capaz de alcanzar los 50 ciclos por minuto. Se tomará esta medida para calcular el caudal máximo y a su vez, las pérdidas de carga máximas.

$$Q = n \cdot V = 0,00117 \text{ m}^3/\text{ciclo} \cdot 50 \text{ ciclos}/\text{min} = 0,0585 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q = 0,0585 \text{ m}^3/\text{min} = 0,000975 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sustituyendo:

$$v = \frac{0,000975}{126,67 \cdot 10^{-6}} = 7,69 \text{ m/s}$$

La viscosidad cinemática será la misma que ya se ha hallado:

$$\mu = 8,85 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

Resumiendo:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{0,0899 \cdot 7,69 \cdot 126,67 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-6}} = 9,89$$

$$Re = 9,89$$

De nuevo el número de Reynolds está por debajo de 2300, por lo que nos encontramos en flujo laminar, donde el factor de fricción es:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Como el número de Reynolds vuelve a ser muy bajo, por el diagrama de Moody se vuelve a extraer que el factor de fricción será:

$$f = 0,1$$

La instalación sigue siendo la misma, por lo que la longitud equivalente de los distintos elementos vuelve a ser:

$$L_{eq} = 6,604 \text{ m}$$

Calculando de nuevo la pérdida de carga:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = 0,1 \cdot \frac{(75,8 + 6,604)}{126,67 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{7,69^2}{2 \cdot 9,81} = 197120,3 \text{ m}$$

Estas pérdidas, otra vez, vienen en metros de columna de hidrógeno, para transformarlo en una unidad más común habría que:

$$P_p = \rho \cdot g \cdot h_p = 0,0899 \cdot 9,81 \cdot 197120,3 = 173844,16 \text{ Pa}$$

$$P_p = 173844,16 \text{ Pa} = 1,7 \text{ bar}$$

La presión efectiva de las instalaciones con este equipo será entonces la resta de la que es capaz de suministrar menos las pérdidas, por lo tanto:

$$P_e = P - P_p = 35 - 1,7 = 33,3 \text{ bar}$$

$$P_e = 33,3 \text{ bar}$$

Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”

Las pérdidas de carga en este caso serán las mismas que en el segundo método del electrolizador Enapter, al causarse de la misma situación.

$$P_p = 6,4 \text{ bar}$$

La presión efectiva de las instalaciones con esta configuración será entonces la resta de la que es capaz de suministrar menos las pérdidas, por lo tanto:

$$P_e = P - P_p = 35 - 6,4 = 28,6 \text{ bar}$$

$$P_e = 28,6 \text{ bar}$$

Coste adquisición de equipos para funcionamiento del electrolizador McPhy

Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor

Se necesita dimensionar y elegir un compresor que sea capaz de mandar el caudal necesario al compresor, para ello, como se sabe que el compresor necesita 7.000 NI/h, se transforma a las unidades requeridas como se ha venido haciendo hasta ahora:

$$\frac{P_N \cdot V_N}{T_N} = \frac{P_{10} \cdot V_{10}}{T_{amb}}$$

$$V_{10} = \frac{P_N \cdot V_N \cdot T_{amb}}{T_N \cdot P_{10}} = \frac{1 \cdot 7 \cdot 298,15}{273,15 \cdot 10} = 0,76 \text{ m}^3$$

$$V_{10} = 0,76 \text{ m}^3$$

El caudal necesario del compresor a 10 bar será entonces de:

$$Q_{compresor} = 0,76 \text{ m}^3/\text{hr} = 760 \text{ l/hr} = 12,67 \text{ l/min}$$

Se buscará un compresor que cumpla con estas características.

Como Fundación Hidrógeno Aragón ya cuenta con un compresor de la marca Josval se elegirá en el catálogo de dicha marca, ya que, tienen contratado el mantenimiento con la casa y se podría contratar también el mantenimiento del nuevo compresor, haciendo ambos mantenimientos con una sola visita ahorrándole conste así a Fundación Hidrógeno Aragón.

Se escoge para tal propósito el compresor de la marca Josval Modelo PRACTIKO 5,5-500 -YA- -EDS- capaz de cumplir con las especificaciones requeridas con un precio aproximado de 6.500 €.

Para el correcto funcionamiento de éste método se necesitará también un almacenamiento de hidrógeno a 9 bar, se estiman los precios de dicho almacenamiento como se hizo con la metodología del electrolizador Enapter:

Volumen depósito acumulador (m ³)	11	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste de adquisición depósito (€)	4.151	755	604	453	302	226
Coste de adquisición compresor (€)	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Coste total de adquisición (€)	10.651	7.255	7.104	6.953	6.802	6.726

Tabla 27: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría y del compresor del electrolizador McPhy para el segundo método

Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”

Del mismo modo que para el caso anterior, se necesita también un depósito acumulador y un compresor, que serán los mismos que en el método anterior, y a su vez, se necesita también un depósito “prepulmón”, que serán los mismos que con la metodología del electrolizador Enapter, obteniendo de esta forma los siguientes costes totales de adquisición:

Depósito “prepulmón” de 2,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste de adquisición depósito acumulador (€)	755	604	453	302	226
Coste de adquisición compresor (€)	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Coste de adquisición depósito “prepulmón” (€)	3.406	3.406	3.406	3.406	3.406
Coste total de adquisición (€)	10.661	10.510	10.359	10.208	10.132

Tabla 28: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 2,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 2 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste de adquisición depósito acumulador (€)	755	604	453	302	226
Coste de adquisición compresor (€)	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Coste de adquisición depósito “prepulmón” (€)	2.725	2.725	2.725	2.725	2.725
Coste total de adquisición (€)	9.980	9.829	9.678	9.527	9.451

Tabla 29: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 2 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste de adquisición depósito acumulador (€)	755	604	453	302	226
Coste de adquisición compresor (€)	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Coste de adquisición depósito “prepulmón” (€)	2.044	2.044	2.044	2.044	2.044
Coste total de adquisición (€)	9.299	9.148	8.997	8.846	8.770

Tabla 30: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 1,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste de adquisición depósito acumulador (€)	755	604	453	302	226
Coste de adquisición compresor (€)	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Coste de adquisición depósito “prepulmón” (€)	1.362	1.362	1.362	1.362	1.362
Coste total de adquisición (€)	8.617	8.466	8.315	8.164	8.088

Tabla 31: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 1 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 0,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste de adquisición depósito acumulador (€)	755	604	453	302	226
Coste de adquisición compresor (€)	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
Coste de adquisición depósito “prepulmón” (€)	662	662	662	662	662
Coste total de adquisición (€)	7.917	7.766	7.615	7.464	7.388

Tabla 32: Coste de adquisición del depósito acumulador según volumetría, del compresor y del depósito “prepulmón” de 0,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Gasto energético del electrolizador McPhy

Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor

El electrolizador McPhy tiene una potencia de 45,6 kW en régimen estacionario, como tendrá que estar trabajando distintos tiempos según el depósito acumulador el consumo energético será diferente en cada caso, calculado como:

$$E_{prod} = P \cdot t_{prod}$$

Además, tiene un consumo de 9 litros de agua desmineralizada por hora, se usa la misma bomba que para la metodología del electrolizador Enapter, con una potencia de 0,4 kW. Así que el consumo se calculará como:

$$E_{bomb} = P \cdot t_{prod}$$

Por otra parte, también se necesita aire comprimido para hacer funcionar al compresor, por lo que se tiene un consumo energético adicional provocado por el funcionamiento del compresor, con 4 kW de potencia:

$$E_{comp} = P \cdot t_{comp}$$

El consumo total de este equipo para la producción de 6,16 kilogramos de hidrógeno será la suma de ambos consumos.

$$E_{tot} = E_{prod} + E_{bomb} + E_{comp}$$

Con un coste promedio de todo el día de 0,1833 € el kWh, se obtiene el coste energético como:

$$Coste\ energético = E_{tot} \cdot Precio$$

Tabulando los resultados anteriores en la siguiente tabla se obtiene:

Volumen depósito acumulador (m ³)	11	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	13	8,42	7,48	7,71	6,94	6,71
Gasto energético electrolizador (kWh)	592,8	383,95	341,08	351,57	316,46	305,97
Gasto energético bomba (kWh)	5,20	3,37	2,99	3,08	2,78	2,68
Tiempo de compresión (h)	1,95	2,2	1,98	2,16	1,8	1,8
Gasto energético compresor (kWh)	7,8	8,8	7,92	8,64	7,2	7,2
Coste total de producción (€)	111,04	72,61	64,52	66,59	59,84	57,90

Tabla 33: Coste energético según volumetría del depósito acumulador del electrolizador McPhy para el segundo método

Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”

Con los mismos datos que en método anterior se tabula para conseguir los resultados económicos de producción de este método para los distintos tamaños de depósito “prepulmón”:

Depósito “prepulmón” de 2,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	99,39	97,35	86,59	88,54	86,13
Gasto energético electrolizador (kWh)	4.532,15	4.438,97	3.948,51	4.037,42	3.927,69
Gasto energético bomba (kWh)	39,76	38,94	34,64	35,42	34,45
Tiempo de compresión (h)	47,08	68,28	82,72	129,14	274,14
Gasto energético compresor (kWh)	188,33	273,13	330,89	516,56	1.096,56
Coste energético (€)	865,26	863,73	784,42	834,74	920,94

Tabla 34: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 2 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	88,09	79,51	73,11	70,71	70,48
Gasto energético electrolizador (kWh)	4.016,86	3.625,72	3.333,90	3.224,17	3.213,76
Gasto energético bomba (kWh)	35,24	31,80	29,24	28,28	28,19
Tiempo de compresión (h)	34,13	55,88	66,13	101,97	190,65
Gasto energético compresor (kWh)	136,53	223,53	264,53	407,87	762,60
Coste energético (€)	761,32	705,57	659,59	665,75	728,87

Tabla 35: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	70,44	78,38	75,42	72,47	69,52
Gasto energético electrolizador (kWh)	3.211,89	3.573,93	3.439,36	3.304,80	3.170,24
Gasto energético bomba (kWh)	28,17	31,35	30,17	28,99	27,81
Tiempo de compresión (h)	18,15	25,18	32,22	62,42	113,48
Gasto energético compresor (kWh)	72,60	100,73	128,87	249,67	453,93
Coste energético (€)	602,05	673,57	654,06	651,53	664,31

Tabla 36: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	80,01	80,14	83,18	71,70	67,48
Gasto energético electrolizador (kWh)	3.648,42	3.654,56	3.793,13	3.269,56	3.077,06
Gasto energético bomba (kWh)	32,00	32,06	33,27	28,68	26,99
Tiempo de compresión (h)	13,37	30,97	35,42	32,82	73,73
Gasto energético compresor (kWh)	53,47	123,87	141,67	131,27	294,93
Coste energético (€)	678,56	692,59	721,25	623,37	618,09

Tabla 37: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 0,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Tiempo de producción (h)	108,64	86,99	87,13	72,74	65,25
Gasto energético electrolizador (kWh)	4.954,00	3.966,94	3.973,08	3.317,08	2.975,60
Gasto energético bomba (kWh)	43,46	34,80	34,85	29,10	26,10
Tiempo de compresión (h)	8,10	15,92	21,27	33,17	41,78
Gasto energético compresor (kWh)	32,40	63,67	85,07	132,67	167,13
Coste energético (€)	914,01	738,81	743,86	632,34	576,06

Tabla 38: Coste energético según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 0,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Coste económico total según metodología del electrolizador McPhy

La suma entre los costes de adquisición y los costes energéticos de producción:

Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor

Volumen depósito acumulador (m ³)	11	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	10.762,04	7.327,61	7.168,52	7.019,59	6.861,84	6.783,90

Tabla 39: Coste total según volumetría del depósito acumulador del electrolizador McPhy para el segundo método

Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y compresión contra depósito “prepulmón”

Depósito “prepulmón” de 2,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	11.526,26	11.373,73	11.143,42	11.042,74	11.052,94

Tabla 40: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 2,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 2 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	10.741,32	10.534,57	10.337,59	10.192,75	10.179,87

Tabla 41: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 2 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	9.901,05	9.821,57	9.651,06	9.497,53	9.434,31

Tabla 42: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 1,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	9.295,56	9.158,59	9.036,25	8.787,37	8.706,09

Tabla 43: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 1 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 0,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	8.831,01	8.504,81	8.358,86	8.096,34	7.964,06

Tabla 44: Coste total según volumetría del depósito acumulado y depósito “prepulmón” de 0,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Conclusiones y resumen de resultados del electrolizador McPhy

Resumen

Del mismo modo que en el caso anterior, para finalizar con el estudio del funcionamiento del electrolizador McPhy, se ofrecen tablas resumen con los tiempos de producción totales y los costes que implica aplicar la metodología indicada:

Segundo método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor

Volumen depósito acumulador (m ³)	11	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	10.762,04	7.327,61	7.168,52	7.019,59	6.861,84	6.783,90
Tiempo total de la producción (h)	14,95	10,36	9,72	9,72	9,47	9,47

Tabla 45: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador del electrolizador McPhy para el segundo método

Cuarto método: Producción contra depósito acumulador previo al compresor y Compresión contra depósito “prepulmón”

Depósito “prepulmón” de 2,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	11.526,26	11.373,73	11.143,42	11.042,74	11.052,94
Tiempo total de la producción (h)	146,47	165,63	169,31	217,68	360,27

Tabla 46: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 2 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 2 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	10.741,32	10.534,57	10.337,59	10.192,75	10.179,87
Tiempo total de la producción (h)	122,22	135,39	139,25	172,67	261,13

Tabla 47: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	9.901,05	9.821,57	9.651,06	9.497,53	9.434,31
Tiempo total de la producción (h)	88,59	103,56	107,64	134,89	183,01

Tabla 48: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 1 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	9.295,56	9.158,59	9.036,25	8.787,37	8.706,09
Tiempo total de la producción (h)	93,38	111,11	118,60	104,52	141,21

Tabla 49: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 1 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Depósito “prepulmón” de 0,5 m³

Volumen depósito acumulador (m ³)	2,5	2	1,5	1	0,5
Coste total (€)	8.831,01	8.504,81	8.358,86	8.096,34	7.964,06
Tiempo total de la producción (h)	116,74	102,91	108,40	105,91	107,04

Tabla 50: Coste-Tiempo según volumetría del depósito acumulador y depósito “prepulmón” de 0,5 m³ del electrolizador McPhy para el cuarto método

Los tiempos de producción son meramente informativos, no hay que tomárselos al pie de la letra debido a que la aplicación de Haskel está diseñada para poner las exigencias que necesita tu instalación y así poder ofrecerte el modelo que más se puede ajustar a tus necesidades, de todas formas, ofrece valores lo suficientemente buenos como para tenerlos en cuenta a la hora de elaborar este estudio.

Conclusiones

Como ya sucedía con el caso del electrolizador Enapter, producir contra un depósito “prepulmón” para luego verter la producción al depósito pulmón dispara exageradamente los tiempos de producción, no teniendo en cuenta los muchos arranques y paradas generados, con los picos de consumo eléctrico que eso conlleva y, además, el

desgaste de piezas asociado tanto del electrolizador, como del compresor de hidrógeno, como del compresor de aire comprimido. Se descarta este método a la vista de los resultados obtenidos.

De los cuatro métodos propuesto, finalmente, el segundo método de producción contra depósito acumulador previo al compresor es el más viable para llevar a cabo, eligiendo un depósito acumulador 1 m³ ofrece un tiempo de producción total de 9,47 horas, el menor de todos los calculados, con un coste entre adquisición de equipos y producción de 6.861,84 €.

Referencias

- [1] IRENA International Renewable Energy Agency. (2020). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal.
- [2] Abadía Albás, L. y Casero Cabezón, P. (2021. 4 de mayo). Actividad 1: Comparativa sobre tecnología de electrolizadores.
- [3] Albisut Ahechu, A. (2022). Diseño y evaluación de electrolizadores basado en membrana de intercambio aniónico. [Trabajo Final de Master. Universidad Pública de Navarra]
- [4] García Rodríguez, A. (2020). Estudio tecno-económico sobre la ampliación de la capacidad de recarga de la hidrogenera de Fundación Hidrógeno Aragón. [Trabajo Fin de Máster. Universidad de Zaragoza]
- [5] Enapter AG (2024). Enapter Handbook. En *Enapter AG*. Recuperado de <https://handbook.enapter.com/electrolyser/el21/el21.html>
- [6] McPhy (2020). Operation Manual Piel by McPhy – H and MILA – Series
- [7] Aplicación Haskel Gas booster. Descargado de <https://www.haskel-es.com/haskel/software.html>
- [8] HyJack Hydrogen Tech (2022). Compressed Storage. En *HyJack*. Recuperado de <https://hyjack.tech/components/storage>
- Moran, M. J., Saphiro, H. N. (2012). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Editorial Reverté.
- García Rodríguez, J. A., Calvo Bernad, E. (2013). Teoría de máquinas e instalaciones de fluidos. Prensas de la Universidad de Zaragoza.

Anexos

Tabla presiones finales de descarga de depósito prepulmón a depósito pulmón con presión inicial de depósito pulmón de 24 bar

V prebuffer (m3)	2,5	2	1,5	1	0,5
Pf1	28,2307692	27,6666667	27	26,2	25,2222222
Pf2	30,8343195	30,1111111	29,1818182	27,96	26,308642
Pf3	32,4365043	31,7407407	30,768595	29,368	27,2743484
Pf4	33,4224642	32,8271605	31,9226146	30,4944	28,1327542
Pf5	34,0292087	33,5514403	32,7619015	31,39552	28,8957815
Pf6	34,40259	34,0342936	33,372292	32,116416	29,574028
Pf7	34,6323631	34,3561957	33,8162124	32,6931328	30,1769138
Pf8	34,7737619	34,5707971	34,1390635	33,1545062	30,7128122
Pf9	34,8607765	34,7138648	34,3738644	33,523605	31,1891664
Pf10	34,914324	34,8092432	34,5446286	33,818884	31,6125924
Pf11	34,9472763	34,8728288	34,6688208	34,0551072	31,988971
Pf12	34,9675547	34,9152192	34,7591424	34,2440858	32,3235298
Pf13	34,9800336	34,9434795	34,8248309	34,3952686	32,6209154
Pf14	34,987713	34,9623196	34,8726043	34,5162149	32,8852581
Pf15	34,9924388	34,9748798	34,9073486	34,6129719	33,1202294
Pf16	34,9953469	34,9832532	34,9326171	34,6903775	33,3290928
Pf17	34,9971366	34,9888354	34,9509943	34,752302	33,5147492
Pf18	34,9982379	34,992557	34,9643595	34,8018416	33,679777
Pf19	34,9989156	34,995038	34,9740796	34,8414733	33,8264685
Pf20	34,9993327	34,996692	34,9811488	34,8731786	33,9568609
Pf21	34,9995893	34,9977947	34,98629	34,8985429	34,0727652
Pf22	34,9997473	34,9985298	34,9900291	34,9188343	34,1757913
Pf23	34,9998445	34,9990198	34,9927485	34,9350675	34,26737
Pf24	34,9999043	34,9993466	34,9947261	34,948054	34,3487734
Pf25	34,9999411	34,9995644	34,9961645	34,9584432	34,4211319
Pf26	34,9999638	34,9997096	34,9972105	34,9667545	34,4854506
Pf27	34,9999777	34,9998064	34,9979713	34,9734036	34,5426227
Pf28	34,9999863	34,9998709	34,9985246	34,9787229	34,5934424
Pf29	34,9999916	34,999914	34,998927	34,9829783	34,6386155
Pf30	34,9999948	34,9999426	34,9992196	34,9863827	34,6787693
Pf31	34,9999968	34,9999618	34,9994324	34,9891061	34,7144616
Pf32	34,999998	34,9999745	34,9995872	34,9912849	34,7461881
Pf33	34,9999988	34,999983	34,9996998	34,9930279	34,7743894
Pf34	34,9999993	34,9999887	34,9997817	34,9944223	34,7994573
Pf35	34,9999995	34,9999924	34,9998412	34,9955379	34,8217398
Pf36	34,9999997	34,999995	34,9998845	34,9964303	34,8415465

Pf37	34,9999998	34,9999966	34,999916	34,9971442	34,8591524
Pf38	34,9999999	34,9999978	34,9999389	34,9977154	34,8748022
Pf39	34,9999999	34,9999985	34,9999556	34,9981723	34,888713
Pf40	35	34,999999	34,9999677	34,9985378	34,9010783
Pf41		34,9999993	34,9999765	34,9988303	34,9120696
Pf42		34,9999996	34,9999829	34,9990642	34,9218396
Pf43		34,9999997	34,9999876	34,9992514	34,9305241
Pf44		34,9999998	34,999991	34,9994011	34,9382436
Pf45		34,9999999	34,9999934	34,9995209	34,9451055
Pf46		34,9999999	34,9999952	34,9996167	34,9512049
Pf47		34,9999999	34,9999965	34,9996934	34,9566265
Pf48		35	34,9999975	34,9997547	34,9614458
Pf49			34,9999982	34,9998038	34,9657296
Pf50			34,9999987	34,999843	34,9695374
Pf51			34,999999	34,9998744	34,9729222
Pf52			34,9999993	34,9998995	34,9759308
Pf53			34,9999995	34,9999196	34,9786052
Pf54			34,9999996	34,9999357	34,9809824
Pf55			34,9999997	34,9999486	34,9830954
Pf56			34,9999998	34,9999588	34,9849737
Pf57			34,9999999	34,9999671	34,9866433
Pf58			34,9999999	34,9999737	34,9881274
Pf59			34,9999999	34,9999789	34,9894466
Pf60			34,9999999	34,9999831	34,9906192
Pf61			35	34,9999865	34,9916615
Pf62				34,9999892	34,992588
Pf63				34,9999914	34,9934115
Pf64				34,9999931	34,9941436
Pf65				34,9999945	34,9947943
Pf66				34,9999956	34,9953727
Pf67				34,9999965	34,9958869
Pf68				34,9999972	34,9963439
Pf69				34,9999977	34,9967501
Pf70				34,9999982	34,9971112
Pf71				34,9999986	34,9974322
Pf72				34,9999988	34,9977175
Pf73				34,9999991	34,9979711
Pf74				34,9999993	34,9981965
Pf75				34,9999994	34,9983969
Pf76				34,9999995	34,998575
Pf77				34,9999996	34,9987334
Pf78				34,9999997	34,9988741
Pf79				34,9999998	34,9989992
Pf80				34,9999998	34,9991104
Pf81				34,9999998	34,9992093

Pf82				34,9999999	34,9992971
Pf83				34,9999999	34,9993752
Pf84				34,9999999	34,9994446
Pf85				34,9999999	34,9995063
Pf86				34,9999999	34,9995612
Pf87				35	34,9996099
Pf88					34,9996533
Pf89					34,9996918
Pf90					34,9997261
Pf91					34,9997565
Pf92					34,9997835
Pf93					34,9998076
Pf94					34,999829
Pf95					34,999848
Pf96					34,9998649
Pf97					34,9998799
Pf98					34,9998932
Pf99					34,9999051
Pf100					34,9999156
Pf101					34,999925
Pf102					34,9999333
Pf103					34,9999408
Pf104					34,9999473
Pf105					34,9999532
Pf106					34,9999584
Pf107					34,999963
Pf108					34,9999671
Pf109					34,9999708
Pf110					34,999974
Pf111					34,9999769
Pf112					34,9999795
Pf113					34,9999818
Pf114					34,9999838
Pf115					34,9999856
Pf116					34,9999872
Pf117					34,9999886
Pf118					34,9999899
Pf119					34,999991
Pf120					34,999992
Pf121					34,9999929
Pf122					34,9999937
Pf123					34,9999944
Pf124					34,999995
Pf125					34,9999956
Pf126					34,9999961

Pf127					34,9999965
Pf128					34,9999969
Pf129					34,9999972
Pf130					34,9999975
Pf131					34,9999978
Pf132					34,9999981
Pf133					34,9999983
Pf134					34,9999985
Pf135					34,9999986
Pf136					34,9999988
Pf137					34,9999989
Pf138					34,999999
Pf139					34,9999991
Pf140					34,9999992
Pf141					34,9999993
Pf142					34,9999994
Pf143					34,9999995
Pf144					34,9999995
Pf145					34,9999996
Pf146					34,9999996
Pf147					34,9999997
Pf148					34,9999997
Pf149					34,9999997
Pf150					34,9999998
Pf151					34,9999998
Pf152					34,9999998
Pf153					34,9999998
Pf154					34,9999999
Pf155					34,9999999
Pf156					34,9999999
Pf157					34,9999999
Pf158					34,9999999
Pf159					34,9999999
Pf160					34,9999999
Pf161					34,9999999
Pf162					34,9999999
Pf163					34,9999999
Pf164					35

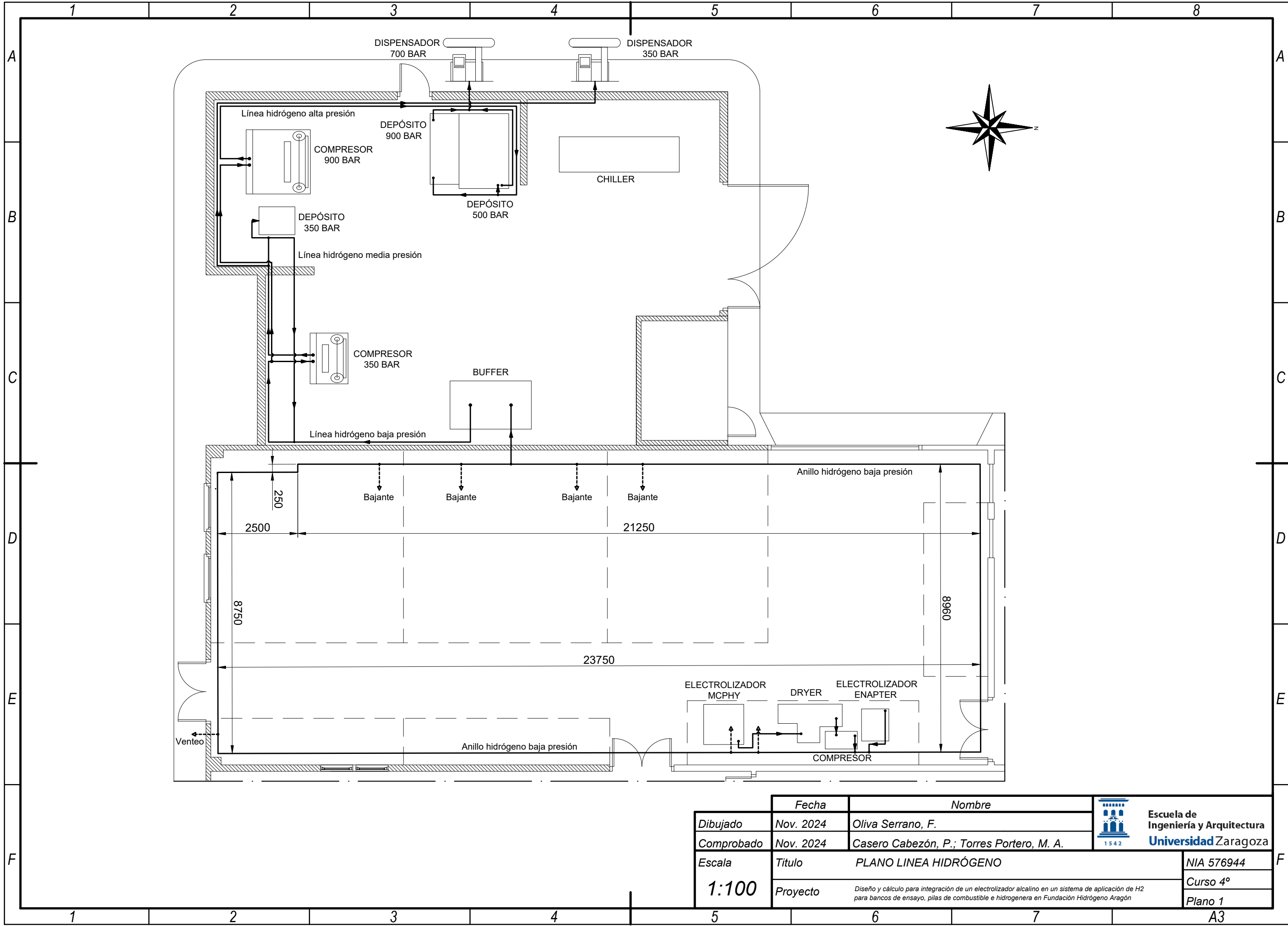
Tabla presiones finales de descarga de depósito prepulmón a depósito pulmón con presión inicial de depósito pulmón de 26,36 bar


V prebuffer (m3)	2,5	2	1,5	1	0,5
Pf1	29,6830769	29,24	28,7163636	28,088	27,32
Pf2	31,7280473	31,16	30,4300826	29,4704	28,1733333
Pf3	32,9864907	32,44	31,6764237	30,57632	28,9318519
Pf4	33,7609173	33,2933333	32,5828536	31,461056	29,6060905
Pf5	34,2374876	33,8622222	33,2420754	32,1688448	30,2054138
Pf6	34,5307616	34,2414815	33,7215094	32,7350758	30,7381456
Pf7	34,7112379	34,494321	34,0701886	33,1880607	31,211685
Pf8	34,8223002	34,6628807	34,3237735	33,5504485	31,6326089
Pf9	34,8906463	34,7752538	34,5081989	33,8403588	32,0067634
Pf10	34,9327054	34,8501692	34,6423265	34,0722871	32,3393453
Pf11	34,958588	34,9001128	34,7398738	34,2578297	32,6349736
Pf12	34,9745157	34,9334085	34,8108173	34,4062637	32,8977543
Pf13	34,9843173	34,9556057	34,8624126	34,525011	33,1313372
Pf14	34,9903491	34,9704038	34,8999364	34,6200088	33,3389664
Pf15	34,994061	34,9802692	34,9272265	34,696007	33,5235257
Pf16	34,9963452	34,9868461	34,9470738	34,7568056	33,6875784
Pf17	34,9977509	34,9912308	34,9615082	34,8054445	33,833403
Pf18	34,9986159	34,9941538	34,972006	34,8443556	33,9630249
Pf19	34,9991483	34,9961026	34,9796407	34,8754845	34,0782443
Pf20	34,9994759	34,9974017	34,9851932	34,9003876	34,1806616
Pf21	34,9996775	34,9982678	34,9892315	34,9203101	34,2716992
Pf22	34,9998015	34,9988452	34,9921683	34,9362481	34,3526215
Pf23	34,9998779	34,9992301	34,9943042	34,9489984	34,4245525
Pf24	34,9999248	34,9994868	34,9958576	34,9591988	34,4884911
Pf25	34,9999537	34,9996578	34,9969874	34,967359	34,5453254
Pf26	34,9999715	34,9997719	34,997809	34,9738872	34,5958448
Pf27	34,9999825	34,9998479	34,9984065	34,9791098	34,6407509
Pf28	34,9999892	34,9998986	34,9988411	34,9832878	34,6806675
Pf29	34,9999934	34,9999324	34,9991572	34,9866302	34,7161489
Pf30	34,9999959	34,9999549	34,999387	34,9893042	34,7476879
Pf31	34,9999975	34,99997	34,9995542	34,9914434	34,7757226
Pf32	34,9999985	34,99998	34,9996758	34,9931547	34,8006423
Pf33	34,999999	34,9999866	34,9997642	34,9945237	34,8227932
Pf34	34,9999994	34,9999911	34,9998285	34,995619	34,8424828
Pf35	34,9999996	34,9999941	34,9998753	34,9964952	34,8599847
Pf36	34,9999998	34,999996	34,9999093	34,9971962	34,875542
Pf37	34,9999999	34,9999974	34,999934	34,9977569	34,8893706
Pf38	34,9999999	34,9999982	34,999952	34,9982055	34,9016628
Pf39	34,9999999	34,9999988	34,9999651	34,9985644	34,9125891
Pf40	35	34,9999992	34,9999746	34,9988515	34,9223015

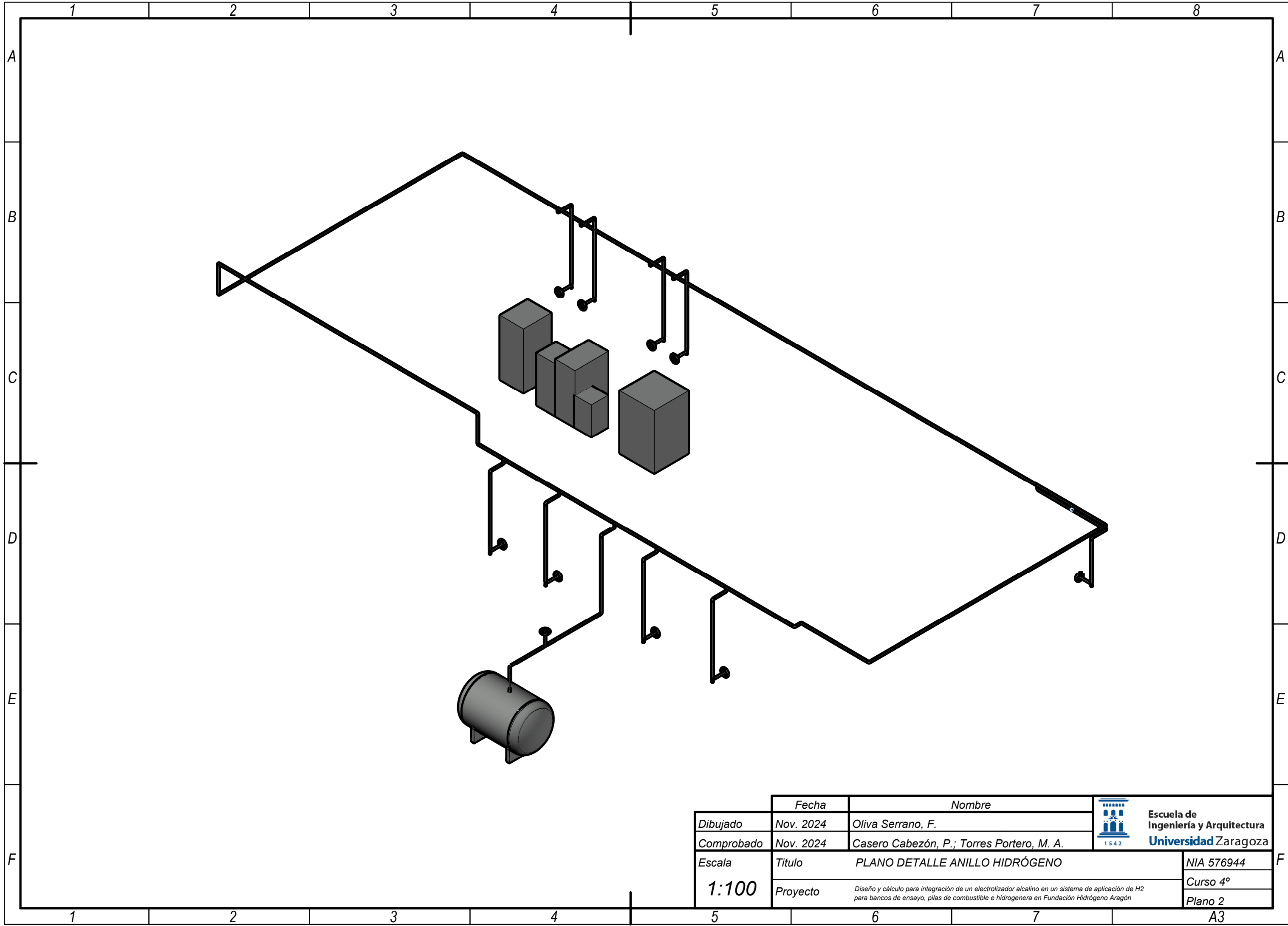
Pf41		34,9999995	34,9999815	34,9990812	34,9309346
Pf42		34,9999997	34,9999866	34,999265	34,9386086
Pf43		34,9999998	34,9999902	34,999412	34,9454298
Pf44		34,9999998	34,9999929	34,9995296	34,9514932
Pf45		34,9999999	34,9999948	34,9996237	34,9568828
Pf46		34,9999999	34,9999962	34,9996989	34,9616736
Pf47		35	34,9999973	34,9997592	34,9659321
Pf48			34,999998	34,9998073	34,9697174
Pf49			34,9999986	34,9998459	34,9730822
Pf50			34,9999989	34,9998767	34,976073
Pf51			34,9999992	34,9999013	34,9787316
Pf52			34,9999994	34,9999211	34,9810947
Pf53			34,9999996	34,9999369	34,9831953
Pf54			34,9999997	34,9999495	34,9850625
Pf55			34,9999998	34,9999596	34,9867222
Pf56			34,9999998	34,9999677	34,9881975
Pf57			34,9999999	34,9999741	34,9895089
Pf58			34,9999999	34,9999793	34,9906746
Pf59			34,9999999	34,9999834	34,9917108
Pf60			35	34,9999868	34,9926318
Pf61				34,9999894	34,9934505
Pf62				34,9999915	34,9941782
Pf63				34,9999932	34,9948251
Pf64				34,9999946	34,9954001
Pf65				34,9999957	34,9959112
Pf66				34,9999965	34,9963655
Pf67				34,9999972	34,9967693
Pf68				34,9999978	34,9971283
Pf69				34,9999982	34,9974474
Pf70				34,9999986	34,997731
Pf71				34,9999989	34,9979831
Pf72				34,9999991	34,9982072
Pf73				34,9999993	34,9984064
Pf74				34,9999994	34,9985835
Pf75				34,9999995	34,9987409
Pf76				34,9999996	34,9988808
Pf77				34,9999997	34,9990051
Pf78				34,9999998	34,9991157
Pf79				34,9999998	34,9992139
Pf80				34,9999998	34,9993013
Pf81				34,9999999	34,9993789
Pf82				34,9999999	34,9994479
Pf83				34,9999999	34,9995093
Pf84				34,9999999	34,9995638
Pf85				34,9999999	34,9996123


Pf86				35	34,9996553
Pf87					34,9996936
Pf88					34,9997277
Pf89					34,9997579
Pf90					34,9997848
Pf91					34,9998087
Pf92					34,99983
Pf93					34,9998489
Pf94					34,9998657
Pf95					34,9998806
Pf96					34,9998939
Pf97					34,9999057
Pf98					34,9999161
Pf99					34,9999255
Pf100					34,9999337
Pf101					34,9999411
Pf102					34,9999476
Pf103					34,9999535
Pf104					34,9999586
Pf105					34,9999632
Pf106					34,9999673
Pf107					34,9999709
Pf108					34,9999742
Pf109					34,999977
Pf110					34,9999796
Pf111					34,9999819
Pf112					34,9999839
Pf113					34,9999857
Pf114					34,9999873
Pf115					34,9999887
Pf116					34,9999899
Pf117					34,9999911
Pf118					34,999992
Pf119					34,9999929
Pf120					34,9999937
Pf121					34,9999944
Pf122					34,999995
Pf123					34,9999956
Pf124					34,9999961
Pf125					34,9999965
Pf126					34,9999969
Pf127					34,9999972
Pf128					34,9999976
Pf129					34,9999978
Pf130					34,9999981

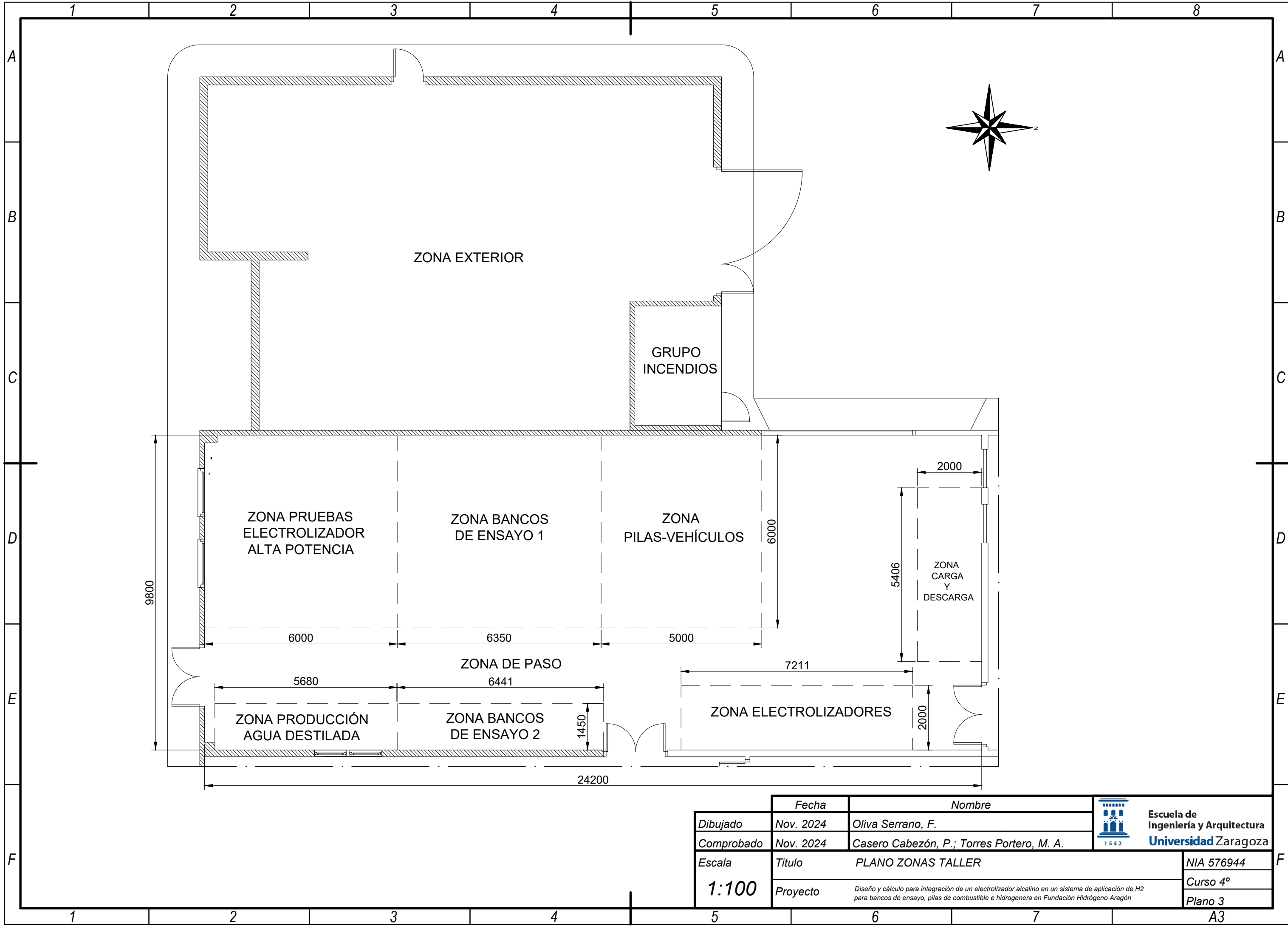
Pf131					34,9999983
Pf132					34,9999985
Pf133					34,9999986
Pf134					34,9999988
Pf135					34,9999989
Pf136					34,999999
Pf137					34,9999992
Pf138					34,9999992
Pf139					34,9999993
Pf140					34,9999994
Pf141					34,9999995
Pf142					34,9999995
Pf143					34,9999996
Pf144					34,9999996
Pf145					34,9999997
Pf146					34,9999997
Pf147					34,9999997
Pf148					34,9999998
Pf149					34,9999998
Pf150					34,9999998
Pf151					34,9999998
Pf152					34,9999999
Pf153					34,9999999
Pf154					34,9999999
Pf155					34,9999999
Pf156					34,9999999
Pf157					34,9999999
Pf158					34,9999999
Pf159					34,9999999
Pf160					34,9999999
Pf161					34,9999999
Pf162					35




	Fecha	Nombre	 Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza 1542
Dibujado	Nov. 2024	Oliva Serrano, F.	
Comprobado	Nov. 2024	Casero Cabezón, P.; Torres Portero, M. A.	
Escala	1:100	Proyecto	
Título			PLANO LINEA HIDRÓGENO
Diseño y cálculo para integración de un electrolizador alcalino en un sistema de aplicación de H2 para bancos de ensayo, pilas de combustible e hidrogenera en Fundación Hidrógeno Aragón			NIA 576944
			Curso 4º
			Plano 1



	Fecha	Nombre	 <div>Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza</div>
Dibujado	Nov. 2024	Oliva Serrano, F.	
Comprobado	Nov. 2024	Casero Cabezón, P.; Torres Portero, M. A.	
Escala	Título		NIA 576944
1:100	Proyecto		Curso 4º
	Diseño y cálculo para integración de un electrolizador alcalino en un sistema de aplicación de H2 para bancos de ensayo, pilas de combustible e hidrogena en Fundación Hidrógeno Aragón		Plano 2



	Fecha	Nombre	 Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza
Dibujado	Nov. 2024	Oliva Serrano, F.	
Comprobado	Nov. 2024	Casero Cabezón, P.; Torres Portero, M. A.	
Escala	1:100	Proyecto	
Título			PLANO ZONAS TALLER
Proyecto			Diseño y cálculo para integración de un electrolizador alcalino en un sistema de aplicación de H2 para bancos de ensayo, pilas de combustible e hidrogenera en Fundación Hidrógeno Aragón
			NIA 576944
			Curso 4º
			Plano 3