



Universidad del  
**Rosario**

Escuela de Ingeniería,  
Ciencia y Tecnología

# **PREFACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE AMONÍACO ALIMENTADO POR UNA PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Presentado para obtener el título de

## **MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

Jhoan Camilo Velasco Peña

Nicolás Esteban González Lara

Dirección:

Andrea Lache Muñoz

María Fernanda Gómez

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías renovables

**Octubre 2023**

## DEDICATORIA

A Dios porque nunca me ha desamparado,  
a mis dos madres por hacer esto posible,  
a mi padre y mi esposa por su paciencia y su apoyo,  
y a mi gatica que ha pasado interminables noches  
acompañándome en el desarrollo de mis trabajos.

Y a mi hermano que me enseña el valor de la vida.

Con mucho amor, todos me han dado las fuerzas para seguir.

Por más oscuro que parezca el túnel, y por más largo que este sea  
Siempre hay luz al final del mismo. Never give up.

Jhoan Camilo Velasco Peña.

## GLOSARIO

**Absorción:** la absorción es el proceso en el cual una sustancia penetra en otra sustancia y se distribuye homogéneamente en su interior. En este proceso, la sustancia que absorbe se llama absorbente y la sustancia que es absorbida se llama absorbato. La absorción puede ser un proceso físico o químico, dependiendo de la naturaleza de las sustancias involucradas.

**Adsorción:** la adsorción es el proceso mediante el cual las moléculas de una sustancia se adhieren a la superficie de otra sustancia, sin que haya una reacción química entre ellas. En este proceso, la sustancia que adsorbe se llama adsorbente y la sustancia que es adsorbida se llama adsorbato.

**Capex:** (*capital expenditure*), en español gasto en capital, es la inversión en capital o inmovilizado fijo que realiza una compañía ya sea para adquirir, mantener o mejorar su activo no corriente.

**GEI:** gases de efecto invernadero, son compuestos que, aunque están presentes en la atmósfera en concentraciones muy pequeñas (gases traza), aumentan significativamente la temperatura de la baja atmósfera. Entre ellos el dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos.

**Haber-Bosch:** es un proceso que se realiza para fabricar amoníaco a partir de hidrógeno y nitrógeno. El nitrógeno puede obtenerse del aire y el hidrógeno de la electrólisis del agua.

**Hidrógeno verde:** hidrógeno producido mediante el uso de energías renovables, como la energía solar o eólica, para llevar a cabo el proceso de electrólisis del agua.

**LCOA:** el significado de LCOA viene del inglés “*Levelized cost of Ammonia*” Es una métrica utilizada para evaluar el costo promedio de producción de amoníaco a lo largo de su vida útil,

teniendo en cuenta los costos de capital, operativos y de mantenimiento, así como otros factores como el consumo de energía y recursos.

**LCOE:** el significado de LCOE viene del inglés “Levelized cost of Energy”, se define como el precio al que se debe vender la electricidad generada para que el sistema alcance el punto de equilibrio al final de su vida útil.

**LCOH:** el coste nivelado del hidrógeno (LCOH por sus siglas en inglés) es una variable que nos indica cuánto cuesta producir 1 kg de hidrógeno verde teniendo en cuenta los costes estimados de la inversión requerida como el coste de la explotación de los activos involucrados en su producción.

**Opex:** es el acrónimo de *operating expenses*, que se traduce como gastos operativos. Se refiere a todos los gastos que una empresa realiza para llevar a cabo sus funciones principales: pagar la renta, la nómina, adquirir materia prima, entre otras.

**PR:** *power ratio*, coeficiente de rendimiento, resultado de dividir la potencia real generada por los paneles solares de una planta fotovoltaica entre la potencia nominal.

## RESUMEN

El amoníaco ha sido un producto básico esencial a escala global, con el 85% de toda la producción, utilizado en la elaboración de fertilizantes, como la urea y el nitrato de amonio. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), en 2020 se produjeron anualmente aproximadamente 183.000 toneladas de amoníaco, y casi todo se generó a partir de combustibles fósiles, como el gas natural (72%), el carbón (22%), la nafta y el fuel pesado (6%). Generando emisiones de hasta 0,5 gigatoneladas de dióxido de carbono, equivalente alrededor del 15-20% de las emisiones totales del sector químico y al 1% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

En 2021, Colombia importó 67.556 toneladas métricas de amoníaco y exportó 14.512 toneladas métricas, según datos de *The observatory of economic complexity*. En este contexto, el presente estudio presenta una prefactibilidad para la producción de amoníaco a partir de hidrógeno verde producido por electrólisis del agua, empleando energía eléctrica de un sistema solar fotovoltaico. El estudio estaría delimitado a una instalación en el altiplano cundiboyacense

En el desarrollo del estudio teórico, inicialmente se delimitó un área disponible que estaría ubicada en zona rural del municipio de Duitama (Boyacá) para la implementación de una instalación solar fotovoltaica que genere la energía eléctrica necesaria para producir amoníaco. Teniendo seleccionados los equipos para la generación de energía eléctrica, se procedió a seleccionar los equipos para la producción de hidrógeno, luego se dimensionó el sistema de separación de nitrógeno del aire y posteriormente se dimensionó el sistema para la producción de amoníaco a partir del hidrógeno y el nitrógeno, proceso conocido como “Haber-Bosch”

Finalmente, después de evaluar las cantidades de hidrógeno y amoníaco, se estimaron costos de referencia de todos los equipos y se procedió a hacer un análisis financiero que incluyó el cálculo del LCOE, LCOH y LCOA, incluyendo estudios de proyecciones de ingresos por

cantidad de amoníaco producido anualmente, considerando degradaciones anuales en el rendimiento de la planta.

Completado el estudio se pudo establecer la viabilidad técnica de la producción de amoníaco a partir de hidrógeno verde. Con relación a la viabilidad económica, los precios actuales de las diferentes tecnologías hacen que el CAPEX y OPEX de este tipo de alternativas no sean competitivos con los costos actuales de producción de amoníaco, puesto que como se estableció, el retorno de la inversión es de 51 años.

## ABSTRACT

Ammonia has been an essential commodity on a global scale, accounting for 85% of all production, used in the production of fertilizers, such as urea and ammonium nitrate. According to the International Renewable Energy Agency (IRENA), approximately 183,000 tons of ammonia were produced annually in 2020, and almost all of it was generated from fossil fuels, such as natural gas (72%), coal (22%), naphtha and heavy fuel oil (6%). Generating emissions of up to 0.5 gigatons of carbon dioxide, equivalent to around 15-20% of total chemical sector emissions and 1% of global greenhouse gas emissions.

In 2021, Colombia imported 67,556 metric tons of ammonia and exported 14,512 metric tons, according to data from the observatory of economic complexity. In this context, the present study presents a prefeasibility study to produce ammonia from green hydrogen produced by water electrolysis, using electrical energy from a solar photovoltaic system. The study would be limited to an installation in the Cundinamarca-Boyacá highlands.

In the development of the theoretical study, initially an available area was delimited that would be in a rural area of the municipality of Duitama (Boyacá) for the implementation of a solar photovoltaic installation to generate the necessary electrical energy to produce ammonia. Having selected the equipment for the generation of electric energy, the equipment for the production of hydrogen was selected, then the system for the separation of nitrogen from the air was dimensioned and later the system for the production of ammonia from hydrogen and nitrogen, a process known as "Haber-Bosch", was dimensioned.

Once the study was completed, it was possible to establish the technical feasibility of ammonia production from green hydrogen. Regarding the economic feasibility, the current prices of the different technologies make the CAPEX and OPEX of this type of alternative not competitive with the current costs of ammonia production, since, as was established, the return on investment is 51 years.

## TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos .....	4
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	5
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	8
4.1 Importancia y aplicaciones del amoníaco.....	8
4.2 Estado del Amoníaco verde en el mundo y en Colombia.....	10
4.3 Amoníaco verde en Colombia.....	14
4.3.1 Monómeros - Barranquilla, Colombia.....	14
4.3.2 Datos de fertilizantes en Colombia.....	14
4.3.3 Importaciones y exportaciones .....	15
4.3.4 Proyecciones en Colombia y en el mundo.....	16
4.4 Métodos de producción del amoníaco.....	18
4.4.1 Catalizadores para la síntesis de amoníaco.....	20
4.5 Hidrógeno como vector energético.....	21
4.5.1 Métodos de producción de hidrógeno.....	23
4.5.4 Etapas del proceso de síntesis Haber-Bosch.....	27
4.6 Métodos de producción de nitrógeno a partir de aire .....	28
4.6.1 Adsorción por oscilación de presión.....	28
4.6.2 Destilación criogénica.....	28
4.6.3 Membranas.....	29
4.7 Fuentes de generación renovable .....	29
4.7.1 Energía solar .....	30
4.7.2 Componentes del sistema fotovoltaico .....	32
4.7.3 Recurso solar en Colombia.....	34
4.8 Viabilidad económica del proyecto .....	36
Capítulo 5 METODOLOGÍA .....	37
5.1 Definición del área y ubicación del proyecto .....	37
5.2 Dimensionamiento de la planta solar fotovoltaica.....	38
5.3 Producción de hidrógeno, nitrógeno y amoníaco.....	38
5.3.1 Selección del electrolizador.....	39
5.3.2 Cálculo de la producción de hidrógeno.....	39
5.3.3 Cálculo de la capacidad de producción de amoníaco y catalizador.....	39
5.3.4 Selección del método y capacidad de producción de nitrógeno .....	40
5.4 Balance de energía y masa.....	40
5.4.1 Balance de energía .....	40
5.5 Cálculo de los valores de LCOE, LCOH y LCOA.....	41
5.6 Viabilidad financiera del proyecto.....	43
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
6.1 Definición del área y ubicación del proyecto .....	46

6.2 Dimensionamiento de planta solar fotovoltaica.....	47
6.3 Producción de hidrógeno, nitrógeno y amoníaco. ....	49
6.3.1 Selección del electrolizador. ....	49
6.3.2 Cálculo de la producción de hidrógeno. ....	50
6.3.3 Selección del catalizador para el proceso Haber-Bosch .....	54
6.3.4 Cálculo de la capacidad de producción de amoníaco .....	55
6.3.5 Selección del método y capacidad de producción de nitrógeno. ....	58
6.3.6 Beneficios de los sistemas PSA .....	59
6.4 Balance de energía y masa.....	60
6.4.1 Balance de masa y energía general de los procesos.....	60
6.4.1 Balance de energía de la planta solar fotovoltaica.....	64
6.6 Cálculo del LCOH, LCOE y LCOA.....	68
6.7 Viabilidad económica de la planta de producción de amoníaco verde en Duitama .....	72
Capítulo 7 CONCLUSIONES .....	76
REFERENCIAS.....	78
Anexos .....	78

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Proyectos relevantes a nivel mundial.....	11
Tabla 2. Etapas de los diferentes métodos de producción del amoníaco.....	20
Tabla 3. Descripción tipos de catalizadores para el proceso Haber-Bosch.....	21
Tabla 4. Comparación diferentes métodos de producción de hidrógeno.....	23
Tabla 5. Comparación tipos de electrolizadores para obtención de hidrógeno. ....	25
Tabla 6. Comparación de electrolizadores para la obtención de hidrógeno .....	49
Tabla 7. Datos promedio de consumo de agua para el proceso de electrolisis. ....	54
Tabla 8. Comparación de atributos para catalizadores para Haber-Bosch. ....	55
Tabla 9. Producción anual de Amoníaco. ....	57
Tabla 10. Producción anual de Nitrógeno.....	60
Tabla 11. Cantidades de equipos principales planta amoníaco verde.....	68
Tabla 12. Parámetros para calcular LCOE. ....	69
Tabla 13. Parámetros para calcular LCOH. ....	70
Tabla 14. Parámetros para calcular LCOA. ....	72
Tabla 15. Consideraciones para el flujo de caja.....	74
Tabla 16. Flujo de caja de la planta de producción de amoníaco verde Duitama.....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje del mercado del amoníaco según su uso.....	8
Figura 2. Producción de fertilizantes en Colombia.....	15
Figura 3. Demanda de fertilizantes nitrogenados, amoníaco y $H_2$ en Colombia 2020-2050.....	17
Figura 4. Tasa de crecimiento proyectada por región.....	18
Figura 5. Clasificación del hidrógeno según su fuente de obtención de energía.....	22
Figura 6. Generación total de electricidad en el mundo y capacidad instalada de las fuentes de generación de electricidad en el escenario de 1,5°C en 2018, 2030 y 2050.....	30
Figura 7. Potencial eléctrico fotovoltaico de Colombia .....	35
Figura 8. Vista aérea del polígono para la planta de amoníaco verde.. .....	46
Figura 9. Vista aérea del polígono para la planta de amoníaco verde.. .....	47
Figura 10. Layout planta solar fotovoltaica de 3.2 MWac... .....	48
Figura 11. Reacción general de producción de amoníaco.. .....	56
Figura 12. Esquema general de la planta.. .....	61
Figura 13. Balance de energía y masa general de los procesos.. .....	65
Figura 14. Balance de energía de la instalación fotovoltaica .....	66
Figura 15. Esquema simplificado de todo el proceso .....	67
Figura 16. Layout simplificado de todo el proceso.....	67
Figura 17. Porcentajes componentes LCOH.....	71
Figura 18. Proyecciones de LCOH gris y azul a partir de gas natural y carbón.....	71
Figura 19. LCOH verde con factor de capacidad renovable moda en las distintas regiones.....	71
Figura 20. Flujo de caja de planta de amoníaco verde.....	73

## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN

La síntesis del amoníaco es un proceso químico que consiste en la combinación de hidrógeno y nitrógeno para formar amoníaco  $NH_3$ , un compuesto químico que se utiliza como materia prima para la producción de fertilizantes, explosivos, telas sintéticas, equipos de refrigeración, entre otros. La conversión del nitrógeno atmosférico  $N_2$  en especies reactivas ha contribuido a las industrias agrícola y energética, sin embargo, ha afectado el medio ambiente.

El descubrimiento del proceso Haber-Bosch para la síntesis de amoníaco en el siglo XX permitió la producción de a gran escala y contribuyó al aumento de la productividad de alimentos a nivel mundial. La elaboración de grandes cantidades de amoníaco (aproximadamente 180 toneladas al año, con una previsión de aumento del 2,3% hasta 2024), ha revolucionado la industria agrícola hasta la fecha [1].

A pesar de las numerosas ventajas industriales del amoníaco, el 96% de su producción se realiza mediante el proceso de Haber-Bosch convencional, que utiliza combustibles fósiles como materia prima y energía, especialmente a través del reformado de gas natural y la gasificación de carbón, impulsada por un bajo costo, la abundancia de este recurso y la falta de preocupaciones ambientales durante el último siglo [2]. De la producción mundial de amoníaco, alrededor del 80% se utiliza para la elaboración de fertilizantes [3] y su fabricación y uso contribuyen con el 1% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [4].

Dentro de los fertilizantes, la urea representa el 55% de todo el amoníaco producido a nivel mundial, mientras que el nitrato de amonio representa el 15%, el otro 30% entre sulfato de amonio, fosfato de amonio, fosfato de di amonio y fosfato monoamónico [5]. Se han propuesto enfoques alternativos, como la producción de amoníaco a partir de fuentes de energía renovable, como la fotovoltaica y la eólica. Este enfoque, conocido como

"amoníaco verde", es una estrategia prometedora para descarbonizar la industria química y agrícola, reduciendo las emisiones de  $CO_2$  y promoviendo el uso de energías limpias. Al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y aprovechar fuentes de energía más limpias, se puede contribuir a la mitigación del cambio climático y la reducción de emisión de GEI.

En Colombia, a pesar de los esfuerzos para reducir las emisiones de GEI, los diferentes sectores económicos son responsables del 87% de las emisiones en el país. El sector de energía (transporte, centrales térmicas, fabricación de combustibles sólidos y refinación de petróleo, minería, petróleo y gas) con 44% y el sector de agricultura (ganadería, uso de fertilizantes, quema de biomasa uso de la tierra y fuentes agregadas) con 43% [6].

Debido a que el proceso más común para producir hidrógeno en el proceso de producción de amoníaco es el reformado de gas natural (SMR, por sus siglas en inglés), se conoce como hidrógeno "gris". Cada año, alrededor del 6% del gas natural y el 2% del carbón del mundo se utiliza para producir hidrógeno gris. Alrededor del 51% del hidrógeno puro producido a nivel mundial se utiliza en refinerías, por ejemplo, para eliminar impurezas como el azufre de los combustibles, y alrededor del 43% como insumo para la síntesis de amoníaco [7]. La demanda de hidrógeno puro ha aumentado considerablemente, llegando a alrededor de 70 millones de toneladas por año, lo que representa un crecimiento tres veces mayor desde la década de 1970 [8].

El hidrógeno verde es producido utilizando energía renovable para separar el hidrógeno del agua a través de la electrólisis, lo que lo convierte en una alternativa sin emisiones de GEI. La producción de hidrógeno verde está limitada por la cantidad de energía renovable disponible. Por ejemplo, si todo el hidrógeno producido globalmente se generara a través de energía renovable, como, la solar, se necesitarían 3.600 (TWh) al año, lo que es más que la capacidad total de generación de la UE [9].

Colombia cuenta con un recurso solar que hace que la integración de plantas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables sea viable y competitiva en términos de costos con otras fuentes de generación de energía convencional. Esto podría permitir la producción de hidrógeno verde para la síntesis del amoníaco, reduciendo las emisiones de GEI en este proceso y las importaciones de amoníaco en un mediano plazo y eventualmente volverse exportador de este.

## **Capítulo 2 OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Realizar la prefactibilidad de un sistema de producción de amoníaco a partir de hidrógeno alimentado con energía solar fotovoltaica.

### **Objetivos específicos**

**Objetivo 1.** Definir un sistema de producción de hidrógeno y amoníaco a partir de energía solar fotovoltaica.

**Objetivo 2.** Proponer los sistemas, incluyendo planta solar fotovoltaica, producción de hidrógeno, producción de nitrógeno y síntesis de amoníaco, en zona de Duitama, Boyacá.

**Objetivo 3.** Determinar la viabilidad económica del proyecto según el LCOH, LCOE y LCOA resultante.

### Capítulo 3

## PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En Colombia, en el año 2020, los sectores de la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca experimentaron un crecimiento del 2,6% en comparación con el año 2019, convirtiéndose en la actividad económica de mayor aumento. Durante ese mismo año, la superficie de cultivos agrícolas y forestales en el país alcanzó las 5.782.606 hectáreas. Los cultivos permanentes representaron el 60,1% de la superficie total sembrada, los cultivos transitorios el 30,5%, y los cultivos forestales el 9,3% [10].

En el año 2021, se registró un incremento del 12,21% de los precios de alimentos y bebidas no alcohólicas con respecto al año 2020. Entre los productos alimentarios que más contribuyeron al aumento de precios se encuentran la carne de res (24,7%), el pollo (23,77%), las frutas frescas (24,27%), las papas (54,32%), el huevo (13,35%), la carne de cerdo (16,8%), las hortalizas y legumbres (20,25%), la leche (4,79%), el pescado (6,20%), y las legumbres secas (12,2%) [11].

Dada la necesidad de Colombia de establecer una política de soberanía y seguridad alimentaria para enfrentar posibles desabastecimientos globales de alimentos y los desafíos de la inflación, resulta imperativo estudiar alternativas que permitan al país acercarse a la autosuficiencia alimentaria [12]. Los aumentos en los precios de los alimentos se han relacionado en gran medida con el incremento en los costos de los fertilizantes, que representan alrededor del 85% de la demanda total en la región, según un informe conjunto de la CEPAL, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Programa Mundial de Alimentos realizado en 2022. Según el Banco Mundial, los factores detrás de este aumento de precio incluyen: 1) los elevados precios internacionales del gas, el amoníaco y el azufre, 2) las restricciones a las exportaciones de fertilizantes por parte de China, Rusia y Egipto, y 3) una demanda persistente [13].

Por lo anterior resulta interesante incentivar la producción nacional de fertilizantes. Para lograrlo, se hace necesario considerar su producción directamente en las zonas del país con mayor desarrollo agrícola, como es el caso del altiplano cundiboyacense, específicamente Duitama-Boyacá, siendo un punto estratégico en la región por ser el puerto terrestre más importante del oriente colombiano y donde una de las principales actividades económicas es la agricultura. Así mismo, los altos niveles de radiación comparados con otros lugares de Boyacá y Cundinamarca resultan propicios para el aprovechamiento de energías renovables tales como la solar, de la cual se tiene un promedio anual de 4,5 horas de brillo solar pico, es decir que por día recibe en promedio  $4.500 \text{ W/m}^2$  según datos de Solargis [14] y contrastados con los datos del IDEAM de 4,518 horas de brillo solar [15].

A nivel global, las industrias que usan combustibles fósiles, el manejo indebido de residuos, el transporte, entre otros, producen GEI que se acumulan en la atmósfera, evitando que el calor salga, lo que se ha comprobado que en el mediano plazo puede tener repercusiones desfavorables relacionadas con el incremento de vectores transmisores de enfermedades, el desabastecimiento de alimentos, el aumento de fenómenos climáticos extremos y en consecuencia afectaría el nivel de vida de los seres humanos y la economía global. Colombia, siendo uno de los países más biodiversos del mundo, no se escapa de esta realidad y también vive el cambio climático presentando dos escenarios: el primero, un aumento de temperatura que produce un aumento desmesurado de lluvias generando inundaciones y el segundo, sequías y escasez de agua [16]. Colombia en relación al cambio climático y previa participación en la COP21 en el 2015 en París, formuló compromisos tales como: la reducción en un 51% de sus emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030 [17].

En el escenario anteriormente descrito se pueden reconocer las problemáticas principales que se quieren abordar con este trabajo: la seguridad alimentaria mediante un proceso productivo que permitiría la reducción de GEI, siguiendo la transición energética mediante la viabilidad técnica con la tecnología disponible actualmente. Donde surgen oportunidades asociadas a la implementación de energías renovables integradas a procesos

productivos, siendo el caso de una planta de producción de amoníaco, donde la energía eléctrica provenga de una planta solar fotovoltaica y que alimente el proceso de electrolización para obtener el hidrógeno necesario en el proceso de Haber-Bosch y así obtener amoníaco verde, pretendiendo que este insumo sea utilizado para la producción de fertilizantes, así como el mundo lo ha venido haciendo hasta la fecha.

## Capítulo 4

### MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

#### 4.1 Importancia y aplicaciones del amoníaco

El 8% de todo el amoníaco se utiliza para la elaboración de fertilizantes nitrogenados. La producción de esta sustancia representa alrededor del 45% del consumo mundial de hidrógeno, es decir, unos 33 millones de toneladas (Mt) en el 2020, y sólo la industria del refinado utiliza más hidrógeno en la actualidad, según la agencia internacional de energía IRENA y la asociación de energía de amoníaco AEA. También se usa en diversas industrias como se muestra en la figura 1.

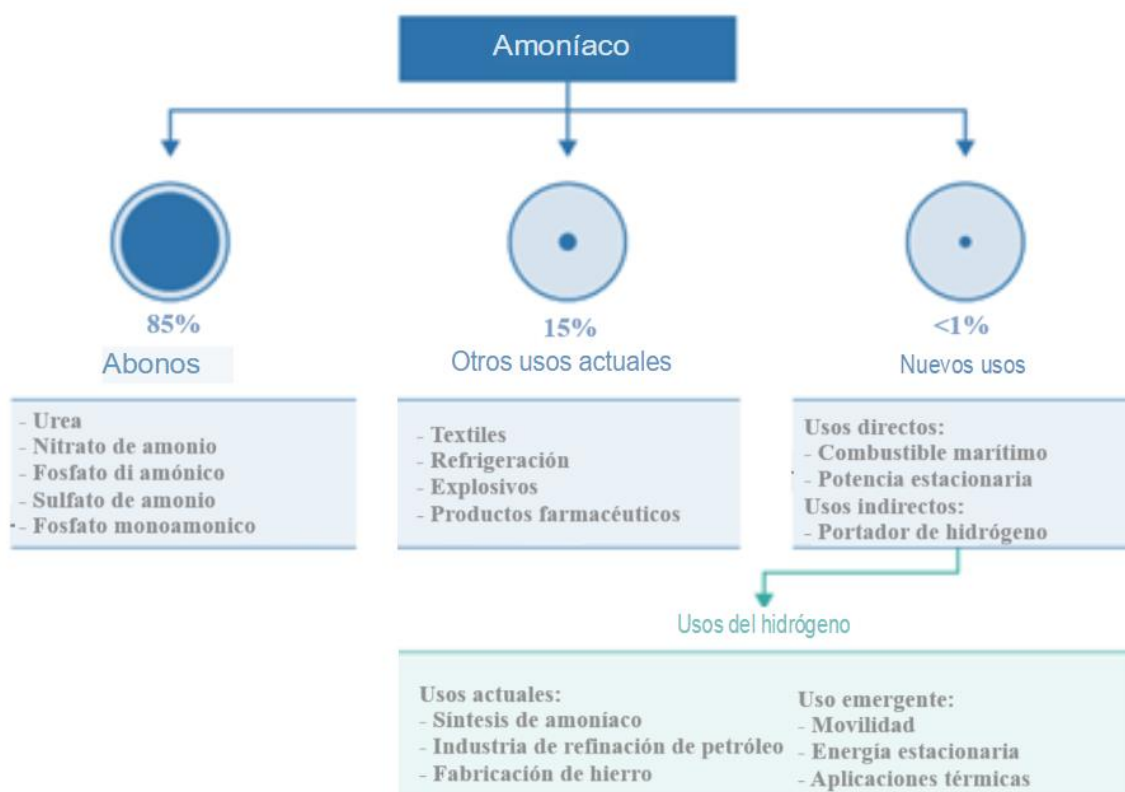


Figura 1. Porcentaje del mercado del amoníaco según su uso. Elaboración propia. Modificado de [18].

El amoníaco se utiliza como fertilizante debido a su alto contenido de nitrógeno, uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento saludable de las plantas. El nitrógeno desempeña un papel importante en la síntesis de proteínas y en otros procesos metabólicos de las plantas, lo que influye en su desarrollo vegetativo, producción de frutos y resistencia a enfermedades [19].

Uno de los compuestos de amoníaco más utilizados como fertilizante es la urea. La urea es un producto de reacción entre el amoníaco y el dióxido de carbono y contiene aproximadamente un 46% de nitrógeno en forma de urea no volátil. La urea es altamente soluble en agua y se puede aplicar directamente al suelo o diluir en agua para su aplicación foliar. Es uno de los fertilizantes nitrogenados más comunes debido a su eficiencia, facilidad de manejo y versatilidad en diferentes cultivos [20]. Según datos IEA, en 2020 se estimó que la producción mundial de urea alcanzó aproximadamente 185 millones de toneladas métricas [21].

Otro compuesto de amoníaco utilizado como fertilizante es el nitrato de amonio. El nitrato de amonio es una sal que contiene nitrógeno y es soluble en agua. Proporciona nitrógeno en forma de iones nitrato que las plantas pueden absorber directamente. Es especialmente beneficioso en cultivos que requieren un suministro rápido de nitrógeno, ya que el nitrato de amonio se disuelve rápidamente en el suelo y está disponible para las plantas de manera inmediata. Según la IFA, en 2019 se estimó que la producción mundial de nitrato de amonio alcanzó aproximadamente 20 millones de toneladas métricas.

Así mismo, los fosfatos amoniacales son otra forma de fertilizante que combina amoníaco con fosfato. Estos fertilizantes contienen tanto nitrógeno como fósforo, otro nutriente esencial para las plantas. La combinación de nitrógeno y fósforo en los fosfatos amoniacales proporciona una fuente de nutrientes equilibrada para promover un crecimiento óptimo de las plantas, especialmente en etapas tempranas de desarrollo.

El amoníaco también tiene aplicación en la industria textil, necesario para producción de tejidos sintéticos. En la industria farmacéutica, el amoníaco se utiliza en la síntesis de diversos compuestos. De igual forma se utiliza para ajustar el pH en la fabricación de medicamentos. En la minería actúa como agente lixivante para disolver los metales presentes en los diferentes minerales y formar complejos solubles en agua. Es común encontrar aguas ácidas generadas como subproducto de la oxidación de minerales sulfurosos expuestos a la atmósfera. Otros usos del amoníaco pueden ser refrigerantes, o se utiliza en productos de limpieza y desengrasantes debido a su capacidad para disolver grasa, aceite y suciedad. Además, se le puede dar uso como combustible marítimo y para transporte de hidrógeno [23].

#### **4.2 Estado del Amoníaco verde en el mundo y en Colombia.**

En un mundo cada vez más enfocado en la sostenibilidad, la innovación tecnológica y la lucha contra el cambio climático, los proyectos de producción de amoníaco verde desempeñan un papel fundamental en la configuración de nuestro futuro. Estos proyectos abordan una amplia gama de desafíos, desde la producción de energía sostenible para alimentar los demás procesos, hasta la gestión de recursos naturales y la promoción de la igualdad social.

Actualmente se están desarrollando algunos de los proyectos más significativos en todo el mundo, destacan por su cantidad de producción y/o tecnologías, se espera que estos proyectos sienten un precedente para los proyectos futuros, ver tabla 1. Los estudios mostrados en estos proyectos dan una noción de la viabilidad de proyectos de este tipo en otras regiones.

*Tabla 1. Proyectos relevantes a nivel mundial.*

Proyecto	Ubicación	Estado	Capacidad de Producción	Descripción	Tecnología Utilizada	Fuente de Energía Renovable	Fecha de Inicio
Yara Pilbara	Australia	En Operación	800.000 toneladas/año	Planta de amoníaco verde alimentada con energía renovable	Electrólisis de agua	Energía eólica	2021
Iberdrola Huelva	España	En Operación, en ampliación	200.000 toneladas/año	Proyecto de producción de amoníaco verde con energía renovable	Electrólisis de agua	Energía solar	2022
Monolith Materials	Estados Unidos	En Operación	12.000 toneladas/año	Planta de amoníaco verde y otros productos químicos	Electrólisis de metano	Energía renovable	2019
Green Hydrogen	Países Bajos	En Desarrollo	180.000 toneladas/año	Proyecto de producción de amoníaco verde	Electrólisis de agua	Energía eólica	En desarrollo
Ørsted Power-to-X	Dinamarca	En Desarrollo	1.000.000 toneladas/año	Proyecto de Power-to-X para producir amoníaco verde	Electrólisis de agua	Energía eólica	En desarrollo

*Fuente: elaboración propia, tomado de [24] [25] [33][34][35].*

- **Yara Pilbara, Australia.**

Este proyecto innovador se encuentra en operación en este momento en la zona oeste de Australia y tiene como objetivo reducir la dependencia del gas natural y promover la producción de energía sostenible. Los detalles clave del proyecto son los siguientes:

- a. Se instalará un electrolizador de 10 MW y 18 MW de energía solar fotovoltaica, en combinación con un sistema de almacenamiento de energía de batería de iones de litio de 8 MW/5 MWh.
  - b. La planta de hidrógeno verde está diseñada para cambiar la matriz energética de la planta de amoníaco vecina, previamente dependiente del gas natural, hacia una fuente de hidrógeno verde más sostenible.
  - c. Una vez completado, este proyecto se convertirá en uno de los mayores electrolizadores de Australia, con la capacidad de producir hasta 640 toneladas de hidrógeno verde anualmente. Actualmente, la planta de hidrógeno más grande operativa en Australia es la de 1,25 MW de Australian Gas Network en Tonsley Park, en el sur de Australia.
  - d. La inversión en este proyecto ha sido respaldada por el gobierno federal australiano, que anunció una inyección de 47,5 millones de dólares a través de la Agencia Australiana de Energía Renovable (ARENA) para financiar el despliegue de hidrógeno renovable. Además, el gobierno de Australia Occidental contribuyó al proyecto con una subvención de 2 millones de dólares provenientes del Fondo de Hidrógeno Renovable del estado.
  - e. Este proyecto representa un paso significativo en la dirección de la producción y utilización de hidrógeno verde como una fuente de energía más sostenible en Australia, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y al desarrollo de tecnologías energéticas avanzadas.
- **Iberdrola - Puertollano, España.**

Este proyecto ya se encuentra en operación, generando hidrógeno verde y se está constituyendo como una ampliación encargada de producir amoníaco verde, fue

inaugurado el 13 de mayo del año 2023, y proyecta ampliar su capacidad. Su construcción tardó 15 meses, la planta ocupa  $7.000 \text{ m}^2$  en Puertollano (Ciudad Real).

Algunos aspectos para destacar de este proyecto son:

- a) Tiene una instalación solar de 100 MW pico de potencia instalada con paneles solares bifaciales y utiliza inversores de tipo string.
- b) Contó con una inversión de 150 millones de euros incluida la gubernamental.
- c) Produce hasta 3.000 toneladas de  $H_2$  verde por año (360 kilos hora) evitando la emisión de 78.000 toneladas de  $CO_2$  anuales, incluyendo las que corresponden a los procesos industriales de Fertiberia.
- d) Almacena el excedente de energía para poder suministrar de noche o cuando no hay sol y que la producción de  $H_2$  verde no se detenga. Es decir, permite la gestión continua en el tiempo. Las baterías, de ión-litio y fabricadas por Ingeteam, tienen una capacidad de almacenamiento de 20 MWh, se ubican en contenedores metálicos refrigerados por agua.
- e) Tiene uno de los mayores sistemas electrolizadores del mundo, es de tipo PEM (membrana de intercambio de protones). Se compone de 16 stacks de 1,25 MW, en total 20 MW, siendo el electrolizador más grande de Europa para uso industrial instalado hasta el momento.
- f) Consta de 11 tanques para el almacenamiento del hidrogeno, cada uno acumula 6.000 kilos de  $H_2$  verde a 60 bares de presión en un volumen de  $133 \text{ m}^3$  (de ahí el grosor de sus paredes de acero: 4,5 cm.). Miden casi 24 m. de alto por 2,8 de diámetro y en vacío pesan 77 toneladas cada uno.

### **4.3 Amoníaco verde en Colombia.**

Aunque Colombia depende de la importación de Amoníaco en gran porcentaje, actualmente se está empezando a realizar proyectos para la producción de amoníaco verde, esto ayudará a reducir la dependencia que hoy en día se tiene frente a las importaciones y contribuirá a generar confianza para mayores inversiones en este ámbito.

#### **4.3.1 Monómeros - Barranquilla, Colombia.**

El proyecto más representativo en Colombia en el momento es la planta de amoníaco verde que se encuentra en construcción por Monómeros S.A. La inversión en la construcción de la planta de amoníaco verde aproximadamente será de 300 millones de dólares, estará alimentado por un parque eólico costa dentro de 350MW y la inversión del piloto del parque eólico será de 1 billón de dólares, está previsto, que tanto la planta de amoníaco como el parque eólico, entren en funcionamiento en el año 2026, convirtiéndose en el primer parque eólico marino de Colombia y la primera planta industrial de amoníaco verde [26].

#### **4.3.2 Datos de fertilizantes en Colombia.**

Según datos de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura el consumo nacional de fertilizantes nitrogenados en Colombia creció 1% anual de 2009 a 2019, representando 462.000 toneladas, que equivalen a 240.000 toneladas de amoníaco y 43.000 toneladas de hidrógeno. [27]. A continuación, se presentan en la figura 2, los rangos de producción de fertilizantes en Colombia por regiones en 2019.

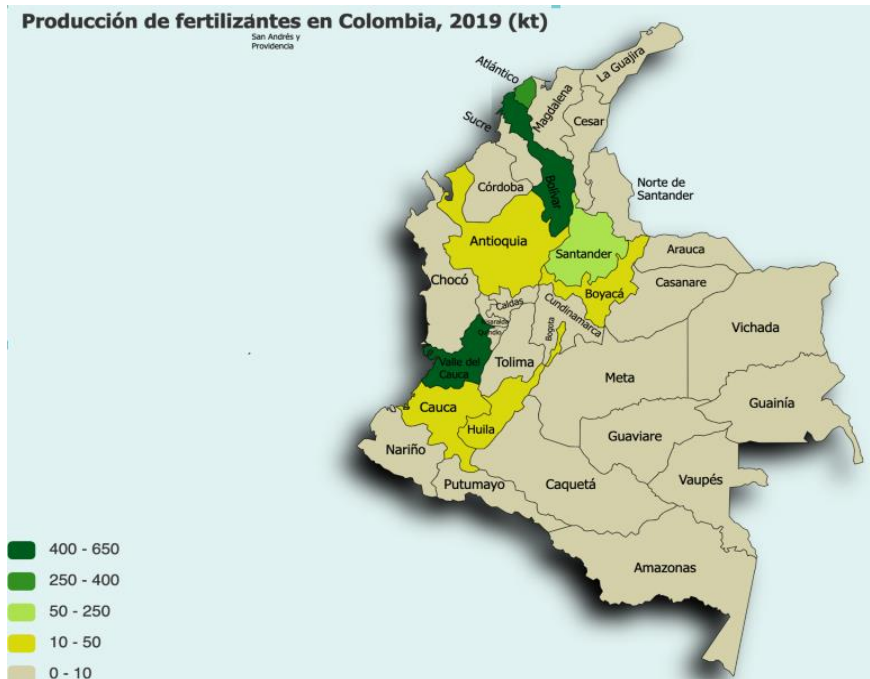


Figura 2. Producción de fertilizantes en Colombia. [27]

Boyacá con una producción anual de 10.000 a 50.000 toneladas. Requiere una producción mayor de fertilizantes para suplir la demanda de la zona, pues este es un centro agrícola estratégico que abastece el centro del país. Según datos del ministerio de agricultura, la producción de tubérculos se presenta en 82 de los 123 municipios de Boyacá, el 40% de sus habitantes viven en zonas rurales y es el departamento líder en la producción de cebolla larga, abasteciendo el 70% del consumo nacional, siendo el segundo cultivador de papa del país, con un 27% del área sembrada. Para elevar las exportaciones agropecuarias impulsadas, es importante que Boyacá tenga más producción a mejores precios, por lo que un punto a tener en cuenta es la producción de fertilizantes de manera local.

#### 4.3.3 Importaciones y exportaciones

El valor de las importaciones a Colombia de fertilizantes (incluyendo el amoníaco) de enero a abril del año 2022 representó US\$630 millones, que, en comparación con el precio en el mismo mes del año 2021, supone un aumento del 197%, cuyo valor fue de

US\$263 millones. Si se habla de cantidad de toneladas, el país importó en el mismo periodo de tiempo (ene-abril de 2022) un total de 783.000 toneladas de fertilizantes, y creció en un 10%, frente a las 750.910 toneladas del año anterior. El volumen de las importaciones de fertilizantes compuestos (NPK), aquellos que contienen cierto nitrógeno (N), fósforo (P), y potasio (K), presentaron un incremento del 77% para los cuatro primeros meses del 2022, frente al mismo periodo del 2021. [28].

Las importaciones de fertilizantes de Colombia son en su mayoría en urea, fosfato diamónico (DAP), fosfato monoamónico (MAP) y cloruro de potasio (KCL). Para el año 2021 el país importó US\$533,6 millones, principalmente fertilizantes, donde el 40% del total de las importaciones de fertilizantes importados por Colombia provienen de Rusia, según el departamento nacional de planeación. El conflicto entre Rusia y Ucrania generó un impacto indirecto en el costo de los insumos, al haber una disminución de la oferta, y esto repercutió en el año 2022 en el ciclo de alza generalizada de precios de los alimentos.

En el año 2020, Colombia exportó (USD \$382.000) en amoníaco, convirtiéndolo en el exportador número 57 de amoníaco en el mundo. En el mismo año, el amoníaco fue el producto número 636 más exportado en Colombia. El principal destino de exportaciones de Colombia es: Ecuador (USD \$189.000), Perú (USD \$143.000), y República Dominicana (USD \$496.000) [29].

#### 4.3.4 Proyecciones en Colombia y en el mundo

Para el año 2050 se espera que la demanda de fertilizantes alcance 533.000 toneladas en 2030 y 669.000 toneladas en el año 2050, tomando una tasa de crecimiento anual de 1,2%, lo que representaría 48.000 y 61.000 toneladas de hidrógeno respectivamente. A continuación, en la figura 3, se presenta la proyección de la demanda de fertilizantes nitrogenados, amoníaco y  $H_2$  en Colombia para el periodo 2020-2050.

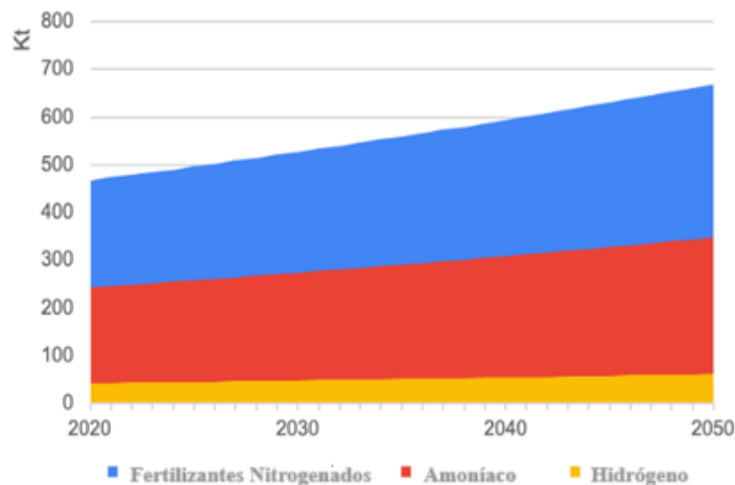


Figura 3: Demanda de fertilizantes nitrogenados, amoníaco y  $H_2$  en Colombia 2020-2050. Elaboración propia. Modificado de [30]

El informe publicado por *Research And Markets* en el año 2021 proyecta que el mercado global de amoníaco crecerá a una tasa compuesta anual del 4,5% entre los años 2021 y 2026. Estas referencias también destacan la creciente demanda de amoníaco en Asia Pacífico, particularmente en países como China, (El cual representa aproximadamente el 7% de la superficie agrícola total a nivel mundial, alimentando así al 22% de la población mundial. [31]. La figura 4 muestra la tasa de crecimiento hasta el año 2027 según regiones y en la tabla 1 los proyectos relevantes de producción de amoníaco en el mundo.



Figura 4. Tasa de crecimiento proyectada por región. Elaboración propia. Modificado de [32]

#### 4.4 Métodos de producción del amoníaco.

Existen varios métodos y procesos utilizados para la síntesis de amoníaco, pero los más comunes son el proceso Haber-Bosch, el reformado de vapor y la oxidación parcial. Estos procesos se diferencian en los principios y las condiciones en las que se llevan a cabo, pero comparten el objetivo común de convertir el nitrógeno y el hidrógeno en amoníaco utilizable.

- Haber-Bosch: según *Chemistry of the Elements de A. Earnshaw*, el proceso *Haber-Bosch* es el método más comúnmente utilizado para la producción industrial de amoníaco. En este proceso, se utiliza nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) e hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) como materias primas. El nitrógeno se extrae del aire mediante procesos de separación, mientras que el hidrógeno se produce a partir de hidrocarburos de origen fósil, como gas natural o petróleo,

mediante reformado de vapor [31]. Estas dos corrientes de gases se combinan en un reactor a alta presión (alrededor de 150 - 300 atm) y temperatura (aproximadamente 350-550 °C), con la presencia de un catalizador. La reacción de síntesis de amoníaco se lleva a cabo, produciendo amoníaco líquido, que se separa y purifica posteriormente [36]

- Reformado de vapor: método alternativo para la producción de amoníaco que utiliza gas natural o gas licuado de petróleo (GLP) como materia prima. En este proceso, los hidrocarburos presentes en el gas se descomponen térmicamente en presencia de vapor de agua a alta temperatura (800 - 900 °C) y presión moderada, en un reformador primario y secundario. La mezcla resultante de hidrógeno y monóxido de carbono se convierte en amoníaco a través de la síntesis de amoníaco en un reactor similar al proceso *Haber-Bosch* [37].
- Proceso de oxidación parcial: En el proceso de oxidación parcial, el gas natural o el GLP se someten a una reacción de oxidación en presencia de oxígeno o aire. Esta reacción produce una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno conocida como gas de síntesis. El gas de síntesis luego se somete a la reacción de síntesis de amoníaco en un reactor similar al proceso *Haber-Bosch*, donde se produce el amoníaco. El proceso de oxidación parcial se utiliza en algunas plantas de producción de amoníaco, aunque su uso es menos común en comparación con los otros dos procesos mencionados.

En la tabla 2, se muestra el resumen de las etapas en los métodos de producción de amoníaco descritos anteriormente.

*Tabla 2. Etapas de los diferentes métodos de producción del amoníaco.*

Proceso	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
Haber-Bosch	Extracción de nitrógeno del aire	Compresión y enfriamiento del aire	Adsorción de dióxido de carbono ( $CO_2$ )	Producción de hidrógeno	Reacción de síntesis de amoníaco en reactor catalítico
Reformado de vapor	Descomposición de hidrocarburos	Remoción de azufre y otros contaminantes	Reformado primario con vapor de agua	Reformado secundario para obtener hidrógeno	Reacción de síntesis de amoníaco en reactor catalítico
Oxidación parcial	Oxidación de gas natural o GLP	Remoción de impurezas y compuestos de azufre	Calentamiento y mezcla con aire o vapor de agua	Producción de gas de síntesis mediante reacción	Reacción de síntesis de amoníaco en reactor catalítico

*Fuente: elaboración propia, tomado de [38].*

#### 4.4.1 Catalizadores para la síntesis de amoníaco.

Los catalizadores se pueden utilizar para acelerar reacciones reduciendo la energía de activación y proporcionando una vía alternativa. El catalizador no afecta la posición de equilibrio, pero sí afecta la velocidad de reacción. El uso de un catalizador también permite el uso de temperaturas más bajas para garantizar una eficiencia razonable. Si no se utiliza un catalizador, la reacción se llevará a cabo a una temperatura más alta; Esto conducirá a mayores costos y menor eficiencia.

Aunque los catalizadores a base de hierro se utilizan comúnmente para la producción de amoníaco, recientemente se han desarrollado otros catalizadores que logran efectos similares. La tabla 3 muestra los catalizadores más utilizados en la industria del amoníaco:



*Tabla 3. Descripción tipos de catalizadores para el proceso Haber-Bosch.*

Categoría	Descripción básica
Catalizadores basados en hierro (Fe)	Una vez que se alcanzan altas temperaturas, un catalizador de hierro proporciona una superficie ideal y los electrones libres necesarios para la ruptura de estos enlaces.
Catalizadores basados en rutenio (Ru)	<p>El rutenio es un sustituto viable de un catalizador de hierro. La utilización de rutenio reduce significativamente las altas temperaturas y presiones requeridas para la eficiencia del proceso Haber-Bosch.</p> <p>Sin embargo, el uso de rutenio tiene el inconveniente de que los costos y el suministro son inciertos, ya que es un producto poco común.</p>
Catalizador Ba-Ca ( $NH_2$ ) a base de rutenio	<p>Otro catalizador es la amida de calcio con una pequeña cantidad de bario añadido Ba-Ca(<math>NH_2</math>). La amida de calcio aumenta la actividad del catalizador a base de Rutenio y la capa de partículas finas nanométricas de bario.</p> <p>forma una estructura núcleo-capa Ru-Ba para prevenir el envenenamiento por hidrógeno. Este catalizador tiene 100 veces mayor actividad que el catalizador de rutenio a bajas temperaturas inferiores a 300 °C, y obtiene una seis veces la tasa de síntesis más alta que el catalizador a base de Fe (a 340 °C). El catalizador de amida de calcio requiere mucho menos energía que los catalizadores a base de rutenio y Fe, lo que hace posible la producción in situ, Este tipo de catalizador es más complejo y costoso que los basados en rutenio.</p>

*Fuente: elaboración propia, tomado de [39].*

#### **4.5 Hidrógeno como vector energético.**

El hidrógeno, siendo el elemento químico más abundante en el planeta y presente en aproximadamente el 75% de la materia, no se encuentra en forma pura, sino que está combinado con otros elementos químicos. La producción y separación del hidrógeno es crucial para determinar su calidad como vector energético con baja o nula generación de  $CO_2$ . En la actualidad, el hidrógeno se obtiene a partir de diversas fuentes y se clasifica en diferentes categorías según el método utilizado en su producción. En la figura 5 se muestra el proceso, la fuente de energía y las emisiones de cada proceso.

	HIDRÓGENO GRIS	HIDRÓGENO AZUL	HIDRÓGENO VERDE
Proceso	Reformado o gasificación	Reformado o gasificación con captura de carbono	Electrólisis
Fuente de Energía	Combustibles Fósiles 	Combustibles Fósiles 	Electricidad renovable 
Emisiones estimadas del proceso de producción (a)	Reformado: 9 - 11 <sup>b</sup> Gasificación: 18 - 20	0.4-4.5 <sup>c</sup>	0

Nota: a) CO<sub>2</sub>-eq/kg = dióxido de carbono equivalente por kilogramo; b) Para el hidrógeno gris, se suponen 2 kg de CO<sub>2</sub>-eq/kg por la fuga de metano del proceso de reformado del metano al vapor. c) Las emisiones para el hidrógeno azul suponen un rango de 98% y 68% de tasa de captura de carbono y 0,2% y 1,5% de fuga de metano.

Figura 5. Clasificación del hidrógeno según su fuente de obtención de energía. Elaboración propia, modificado de [40]

En este contexto, el hidrógeno verde desempeña un papel fundamental en la transición energética puesto que permite gestionar energías renovables cuya disponibilidad es impredecible, como la solar y la eólica, cuya principal desventaja es justamente su gestionabilidad en respuesta a la variación de la demanda. El hidrógeno puede transportarse, almacenarse y utilizarse directamente o también como componente de nuevos vectores energéticos, como el amoníaco ( $NH_3$ ) [36]. El amoníaco verde se denomina así porque se produce a partir de hidrógeno verde y tiene aplicaciones no solo en la producción de fertilizantes, sino también en nuevos usos potenciales debido a su capacidad para almacenar y transportar hidrógeno verde, como combustible en el transporte marítimo y otros campos.

#### 4.5.1 Métodos de producción de hidrógeno.

Existen varios métodos de producción de hidrógeno, que se clasifican en función de las materias primas utilizadas y los procesos involucrados. A continuación, en la tabla 4 se presentan algunos de los métodos más comunes:

*Tabla 4. Comparación diferentes métodos de producción de hidrógeno.*

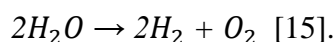
<b>Método de producción</b>	<b>Materias primas</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Emisiones de carbono</b>	<b>Costo</b>
Reformado de vapor	Gas natural, GLP	Alta	Altas	Moderado
Electrólisis del agua	Agua y electricidad	Variable	Bajas	Alto
Gasificación de biomasa	Biomasa	Variable	Bajas	Variable
Hidrólisis de hidruros	Hidruros metálicos	Variable	Bajas	Bajo

*Fuente: elaboración propia, tomado de [41].*

Para este proyecto solo se tendrá en cuenta la electrólisis de agua puesto que es el método adecuado para aprovechar la energía solar fotovoltaica.

#### 4.5.2 Generación de hidrógeno por electrólisis.

Para la producción de hidrógeno es necesario un electrolizador, encargado de realizar el proceso de electrólisis al agua. La electrólisis es un proceso químico en el cual se utiliza electricidad para descomponer un compuesto en sus elementos constituyentes mediante una reacción de oxidación-reducción. específicamente, en la electrólisis del agua, se utiliza electricidad para separar el agua ( $H_2O$ ) en sus componentes básicos, hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ), a través de la reacción:



Los elementos principales que componen un sistema de electrólisis son los siguientes:

- Fuente de alimentación eléctrica: proporciona la energía eléctrica necesaria para llevar a cabo la electrólisis. Puede ser una fuente de corriente continua (DC) o corriente alterna (AC), dependiendo del tipo de electrolizador utilizado.
- Electrolizador: dispositivo donde tiene lugar la electrólisis. Consiste en una celda electrolítica compuesta por electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos en una solución acuosa, generalmente agua con algún tipo de electrolito para aumentar la conductividad eléctrica. El electrolizador es responsable de la separación de los elementos en el compuesto mediante la aplicación de una corriente eléctrica.
- Electrodos: corresponden a las partes del electrolizador donde ocurren las reacciones de oxidación y reducción. El ánodo es el electrodo positivo, donde tiene lugar la oxidación y se generan los iones positivos. El cátodo es el electrodo negativo, donde tiene lugar la reducción y se generan los iones negativos. Los electrodos están hechos de materiales conductores como platino, grafito u otros materiales adecuados.
- Electrolito: es una solución acuosa o un medio conductor utilizado en el electrolizador para facilitar el transporte de iones. El electrolito puede ser una sustancia inorgánica, como ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), hidróxido de potasio (KOH) o carbonato de sodio ( $Na_2CO_3$ ), o una sustancia orgánica.

Se presenta a continuación en la tabla 5, una comparativa entre los diferentes tipos de electrolizadores existentes para la obtención de hidrógeno. Se muestra el índice de madurez tecnológica de cada uno de los tipos de electrolizador (El índice de Madurez

Tecnológica o *Technology Readiness Level* (TRL) es una medida para describir el estado de desarrollo o madurez de una tecnología adoptado por la comisión europea, el cual va de 1 a 9 [42].

*Tabla 5. Comparación tipos de electrolizadores para obtención de hidrógeno.*

Tipo de Electrolizador	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Eficiencia Energética	Pureza del Hidrógeno	Costo	Sensibilidad a la Contaminación	Ventajas	Desventajas	Nivel de Madurez Tecnológica
Electrólisis Alcalina	60-90	ene-30	Baja	Moderada	Bajo	Baja	- Simplicidad y bajo costo	- Baja eficiencia energética	9
Electrólisis de Membrana de Intercambio de Protones (PEM)	50-80	ene-30	Alta	Alta	Alto	Alta	- Alta eficiencia energética	- Costo relativamente alto	9
Electrólisis de Membrana de Óxido Sólido (SOEC)	700-900	ene-30	Alta	Alta	Alto	Baja	- Alta eficiencia energética	- Costo relativamente alto	6
Electrólisis de Carbonato Fundido (MCE)	650-850	ene-30	Alta	Alta	Alto	Baja	- Alta eficiencia energética	- Costo relativamente alto	5

*Fuente: elaboración propia, tomado de [43].*

El agua que se utiliza en la producción de hidrógeno debe tener ciertas características para asegurar una operación eficiente y segura. Estas características incluyen:

- Pureza: el agua utilizada debe ser lo más pura posible para evitar contaminaciones y reducir la formación de depósitos o incrustaciones en los equipos. Se prefieren aguas desmineralizadas o desionizadas.
- Baja concentración de impurezas: es importante minimizar la presencia de impurezas en el agua, como iones metálicos, sales, compuestos orgánicos, gases disueltos y partículas suspendidas. Estas impurezas pueden afectar la eficiencia de los procesos y causar daños en los equipos.

- Bajo contenido de oxígeno: el oxígeno presente en el agua puede interferir con las reacciones químicas utilizadas en la producción de hidrógeno, especialmente en los procesos de electrólisis. Por lo tanto, se busca reducir el contenido de oxígeno disuelto en el agua.

#### 4.5.3 Métodos de producción de nitrógeno

Destilación criogénica: este método se basa en la diferencia de puntos de ebullición de los componentes del aire. El aire se enfría y se comprime para que se licúe. Luego, se realiza una separación de las diferentes componentes mediante una serie de columnas de destilación. El nitrógeno tiene un punto de ebullición más bajo que el oxígeno, por lo que se recoge el nitrógeno gaseoso en la parte superior de la columna de destilación mientras que el oxígeno se separa en la parte inferior. La destilación criogénica es un método eficiente y se utiliza a gran escala para la producción de nitrógeno industrial [44].

Membranas de permeación: en este método, se utilizan membranas selectivas para separar el nitrógeno del aire. Las membranas tienen poros de tamaño molecular que permiten el paso selectivo del nitrógeno mientras retienen otros componentes del aire, como el oxígeno. Al aplicar presión al aire, el nitrógeno se difunde a través de la membrana más rápido que el oxígeno, lo que permite su separación. Las membranas de permeación son utilizadas en aplicaciones de menor escala y son especialmente adecuadas cuando se requieren caudales de nitrógeno relativamente bajos [44].

Adsorción por oscilación de presión (PSA, por sus siglas en inglés): en este método, el nitrógeno se separa del aire utilizando lechos de tamices moleculares. Los tamices moleculares son materiales porosos con una alta capacidad de adsorción selectiva de moléculas de oxígeno. Durante el ciclo de PSA, el aire se comprime y se pasa a través del lecho de tamices moleculares, donde el oxígeno es adsorbido por los tamices, dejando pasar el nitrógeno. Luego, se reduce la presión y se regenera el lecho de tamices, liberando el oxígeno adsorbido y preparando el sistema para el próximo ciclo. La adsorción por

oscilación de presión es un método eficiente y flexible, ampliamente utilizado para la producción de nitrógeno en aplicaciones industriales [44].

#### 4.5.4 Etapas del proceso de síntesis Haber-Bosch.

Se describen a continuación de manera general, las etapas del proceso mencionado.

##### 1. Etapa 1. Alistamiento de los gases: Compresión.

El hidrógeno y el nitrógeno se bombean y se comprimen por separado, a través de tuberías. Estos pasan de estar a temperatura ambiente y presión atmosférica a 100-450 bares.

##### 2. Etapa 2. Reacción de síntesis del amoníaco.

La mezcla de hidrógeno y nitrógeno se comprime dentro del compresor, a una presión de 100-450 bares y una temperatura de 350 - 500 °C. Y los gases se bombean a un reactor que contiene un catalizador de hierro.

##### 3. Etapa 3. Separación del amoníaco del $H_2$ y $N_2$ .

Los gases se enfrían en el tanque de enfriamiento, y el amoníaco se licua y se separa. El nitrógeno y el hidrógeno que no han reaccionado se reciclan, vuelven al reactor, para que no se desperdicien.

##### 4. Etapa 4. Purificación del Amoníaco, y almacenamiento:

Se lleva a cabo un proceso de purificación para eliminar impurezas y obtener amoníaco de alta pureza. Este proceso generalmente implica el uso de

técnicas de absorción o adsorción para eliminar impurezas como agua, metano, dióxido de carbono y otros compuestos no deseados [45].

#### **4.6 Métodos de producción de nitrógeno a partir de aire**

El aire atmosférico es una materia prima esencial en todos los procesos comerciales de producción de nitrógeno. Es gratuito y está disponible en su forma natural, pero requiere energía para descomponer el aire en sus componentes (nitrógeno, oxígeno, argón y otros oligoelementos) y producir nitrógeno. Existen varios procesos por los cuales se puede separar el nitrógeno del aire, se mencionan a continuación los existentes.

##### 4.6.1 Adsorción por oscilación de presión.

La adsorción por cambio de presión es una tecnología utilizada para separar especies de gases de una mezcla de varios gases bajo presión, dependiendo de la afinidad por un material adsorbente y las características moleculares de las especies. Esta tecnología difiere significativamente de las técnicas de separación de gases de destilación criogénica. Se utilizan materiales adsorbentes específicos, como carbón activado o tamices moleculares, como trampa, adsorbiendo las especies de gas objetivo a alta presión. Operando a temperaturas cercanas a la ambiental, el proceso cambia a baja presión, desorbiendo el material adsorbido.

##### 4.6.2 Destilación criogénica

En un proceso típico de separación criogénica de nitrógeno, el aire se comprime, se enfría para eliminar el exceso de vapor de agua y se filtra para eliminar el dióxido de carbono y otros contaminantes que se congelan en el proceso [46].

El aire comprimido suministrado se enfría en el intercambiador de calor mediante un intercambio de calor en contracorriente entre los gases de escape fríos

y ricos en oxígeno y el nitrógeno generado tras el proceso. Los contaminantes que quedan en el aire se congelan en la superficie del intercambiador de calor, por lo que en ciertos intervalos se invierte el flujo a través del intercambiador de calor para eliminar los contaminantes infectados [46].

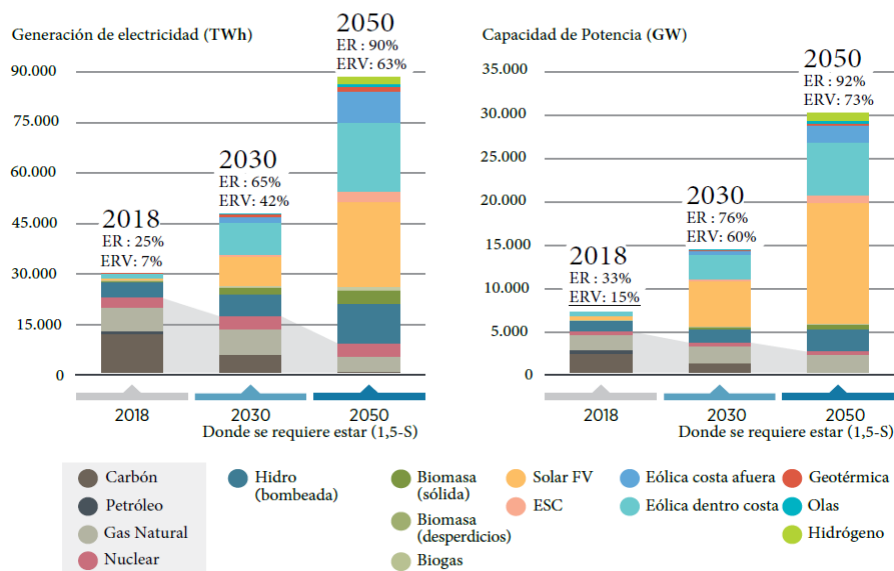
#### 4.6.3 Membranas

En este proceso, el aire se comprime y pasa a través de una serie de filtros para eliminar el exceso de vapor de agua, así como cualquier aceite residual del compresor, que puede perjudicar la vida útil de la membrana. Posterior a ello, el aire se calienta, hasta la temperatura óptima de proceso para el polímero dado (normalmente 40 – 60 °C) y se alimenta axialmente hacia el centro de miles de fibras huecas empaquetadas en una configuración tubo y carcasa. El nitrógeno se concentra durante su paso por las fibras y se recoge como nitrógeno producto [46].

### **4.7 Fuentes de generación renovable**

Para cumplir con las metas de descarbonización para el año 2050, el sector eléctrico depende de la aceleración y despliegue de generación renovable: eólica (costa afuera y adentro), solar fotovoltaica (FV), energía solar concentrada (CSP), hidroeléctrica, biomasa, energía geotérmica y mareomotriz. Siendo la solar y eólica las que lideran la transformación, de las cuales se proyecta que serán responsables del 42% de la generación total de electricidad para el año 2030, un poco más del 10% actual, ver figura 6.

La capacidad instalada de generación de energía renovable deberá ampliarse a 10.770 GW en el año 2030 y alrededor de 27.800 GW en 2050, siendo 4 y 10 veces más de capacidad instalada en los años 2030 y 2050 respectivamente, con respecto al período 2021, según datos de IRENA. Como se observa, la energía solar y eólica se proyecta que estarán a la cabeza, la solar fotovoltaica con una capacidad mayor a 5.200 GW y la eólica con más de 300 GW en 2030.



Nota: 1,5-S = Escenario de 1,5°C; ESC = energía solar concentrada; GW = gigavatios; FV = fotovoltaica; ER = energía renovable; TWh/año = teravatios hora al año; ERV = energía renovable variable.

Figura 6: Generación total de electricidad en el mundo y capacidad instalada de las fuentes de generación de electricidad en el escenario de 1,5°C en 2018, 2030 y 2050. Modificado de [47]

#### 4.7.1 Energía solar

La energía solar puede ser aprovechada de diferentes formas para generar electricidad o calor. A continuación, se describen brevemente las principales formas de aprovechamiento de esta fuente de energía:

- **Energía solar fotovoltaica:** utiliza paneles solares para convertir la luz solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Los paneles solares capturan la radiación solar y generan corriente continua (DC), que luego se convierte en corriente alterna (AC) mediante un inversor para su uso en hogares, edificios o sistemas de energía eléctrica. [48]
- **Energía solar térmica:** aprovecha el calor del sol para calentar agua o fluidos, que luego se utilizan para calefacción, agua caliente sanitaria o

procesos industriales. Los sistemas solares térmicos utilizan colectores solares para absorber la radiación solar y transferir el calor al fluido. [49]

- Energía solar concentrada: utiliza espejos o lentes para concentrar la radiación solar en un punto focal, generando altas temperaturas. Este calor se puede utilizar para generar vapor y accionar una turbina, produciendo electricidad en un proceso similar al de las centrales térmicas convencionales [50].
- Energía solar pasiva: se refiere al diseño y construcción de edificios de manera que se aproveche la luz solar y el calor natural para iluminación, climatización y reducción de la demanda de energía. Incluye elementos como la orientación, la ubicación de ventanas y el uso de materiales que absorban y liberen calor [51].

En cuanto a los parámetros relevantes para evaluar la viabilidad de una instalación solar en una determinada zona, se consideran los siguientes:

- Radiación solar: se refiere a la cantidad de energía solar que llega a una superficie en un determinado período de tiempo. Se mide en kilovatios-hora por metro cuadrado (kWh/m<sup>2</sup>) o en radiación solar global (GHI, por sus siglas en inglés). Este dato es fundamental para evaluar la cantidad de energía solar disponible en una región determinada.
- Factor de capacidad: es la relación entre la energía real generada por un sistema solar y la energía que podría haber generado a plena capacidad durante un período de tiempo específico. Representa la eficiencia y el rendimiento del sistema solar.
- Inclinación y orientación: la inclinación y orientación de los paneles solares influyen en la cantidad de radiación solar que pueden capturar. Una orientación

hacia el sur y una inclinación óptima permiten un mayor aprovechamiento del recurso solar.

#### 4.7.2 Componentes del sistema fotovoltaico

De igual manera, se deben tener en cuenta los equipos que componen un sistema de producción de energía solar fotovoltaico, estos trabajan juntos para convertir la energía solar en electricidad utilizable. A continuación, se describen algunos de los principales componentes de un sistema fotovoltaico:

##### 4.5.2.1 Generador fotovoltaico

Conjunto de módulos solares que transforman la energía solar en energía eléctrica. Cada módulo está formado por varias celdas solares iguales conectadas eléctricamente entre sí, en serio y/o paralelo, donde la corriente y la tensión suministradas por el panel se incrementan hasta ajustarse al valor deseado, alcanzando actualmente potencias de hasta 650W y tensiones de circuito abierto de que oscilan entre 47 V y 49 V, y corrientes de cortocircuito que oscilan entre 17,6 A y 18,6 A en caso de módulos tipo P y tensión de circuito abierto que oscilan entre 51,3 V y 53,31 V y corriente de cortocircuito que oscilan entre 13,8 A y 14.5 A para módulos tipo N [52].

##### 4.5.2.2 Inversor

Es el equipo encargado de transformar la energía recibida del generador fotovoltaico en forma de corriente continua en una onda oscilante a frecuencias usadas (50-60) Hz. Dependiendo la aplicación, el nivel de tensión y potencia requerida, bondades del terreno y confiabilidad eléctrica, existen dos tipos de tecnologías más usadas y comercializadas hoy en día, la primera son los inversores *string* o tipo cadena, con potencias actuales de hasta 350kVA a 30°C e inversores centralizados de hasta 8,8MVAR a 45°C [53].

Cada uno con sus ventajas sobre el otro, comúnmente en el mercado se encuentran inversores *string* con más cantidad de MPPT (seguidores de máxima potencia) lo cual permite tener un mejor aprovechamiento del recurso solar, mayor versatilidad en su instalación y propicio para polígonos menos uniformes y con topografía más irregular, o los inversores centralizados que comúnmente son más económicos, garantizando una menor inversión inicial que permiten acaparar arreglos fotovoltaicos de mayor potencia.

#### 4.5.2.3 Estructura soporte de módulos

Es la encargada de sujetar los módulos solares, existen dos tipos que actualmente son más usadas por la industria, siempre dependiendo el tipo de proyecto, en el caso de gran escala las más usadas son las estructuras fijas, que se diseñan con una inclinación y cantidad de módulos que dependerá de la disposición del terreno y con inclinación orientada hacia el movimiento relativo del sol con respecto al lugar de la instalación o los seguidores de un eje, orientados norte-sur para seguir el sol a lo largo del día y del año.

En el caso de las estructuras fijas y seguidoras son elementos metálicos con niveles anticorrosivos propios que requieren los lugares de la instalación dependiendo el nivel de polución del aire o acidez del suelo:, las estructuras fijas siempre son más económicas, pero no tienen una optimización en el recurso solar, teniendo en cuenta que, es la radiación directa o que llega en forma perpendicular a los módulos solares es la que más energía solar entrega al generador, y por otro lado las estructuras seguidoras que en su gran mayoría cuentan con algoritmos inteligentes para encontrar la inclinación que optimice la generación, dependiendo el clima instantáneo que se presente en cada locación, sujeta a sombreados parciales y así aprovechar al máximo la radiación difusa y directa que puede captar cada arreglo fotovoltaico instalado en cada estructura.

#### 4.5.2.4 Cableados de interconexión

Son los encargados de conectar los distintos arreglos fotovoltaicos para proyectos mayores a 1MWac y aplicaciones de generación, se encuentran tres tipos de cableados:

- Cableado solar, usualmente de (4, 6 y 10)  $mm^2$ , que interconectan los módulos solares y llegan a las combiner box, que no son más que acumuladores de potencia o a los inversores tipo *string*.
- Cableados de baja tensión, que son los que conectan las cajas combinadoras con los inversores centralizados o los inversores tipo string con el centro de media tensión, usualmente en calibres desde (125-400)  $mm^2$ . Finalmente, el cableado de media tensión (MT), que va desde la salida del transformador MT hasta el punto de conexión o subestación asociada a cada planta generadora, usualmente en niveles de (33-34,5) kV, dependiendo la región y estándar asociado, y donde los calibres pueden variar entre (70-630)  $mm^2$ , dependiendo de las distancias y niveles máximos de pérdidas de potencia con que se diseñe.

#### 4.7.3 Recurso solar en Colombia.

En el caso de Colombia, el país se encuentra en una ubicación geográfica privilegiada, cercana al Ecuador, lo que le otorga un alto potencial solar. La radiación solar en Colombia varía según las regiones, con mayor intensidad en la zona norte y en la región Andina [54].

La evaluación del potencial solar en Colombia requiere de un período amplio, en general del orden de los años de toma de datos. Además, se suma la necesidad de realizar una toma de datos suficientemente detallada, para que los valores obtenidos sean representativos y reflejen particularidades de los microclimas.

Existen varias aplicaciones y empresas que ofrecen bases de datos de radiación solar, en la industria usualmente, se paga por los datos meteorológicos en el punto específico donde se desarrollará el proyecto y se decide por aquellas que cuenten con los datos más precisos, y periodos largos de datos para un mejor modelado de energía, que sean ampliamente validados y que generen una mayor eficiencia y productividad en la evaluación de la energía solar. En la figura 7 se muestra el resumen del potencial eléctrico solar fotovoltaico estimado, representando el promedio total diario/anual de la producción de una planta solar fotovoltaica (FV) de 1kW-pico.

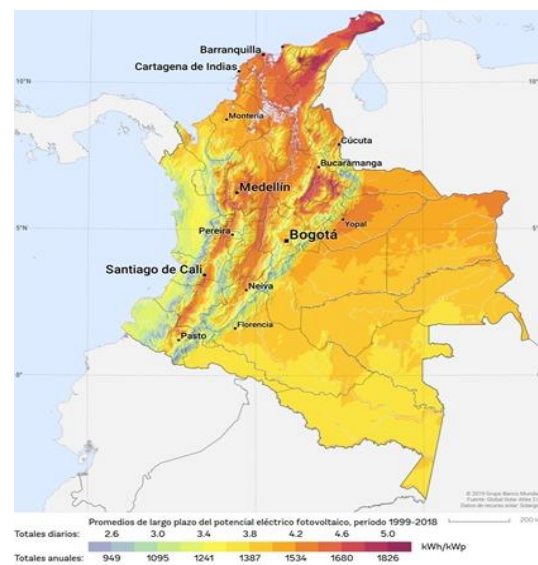


Figura 7: Potencial eléctrico fotovoltaico de Colombia. [13]

La configuración de la instalación FV considerada es de estructura independiente sobre el suelo con módulos de silicio cristalino montados en posición fija con una inclinación óptima de  $0^{\circ}$  a  $16^{\circ}$  orientados hacia el ecuador. Se consideran inversores de altas eficiencias, superiores a 98,9%, cumpliendo con estándares europeos, con pérdidas debidas al polvo y suciedad de 3,5%, con efecto acumulado de pérdidas asociadas a sombreado entre filas, desajuste, cableados, transformador, etc., de 7,5% y con disponibilidad de la planta de 100%. La base de datos de recurso solar subyacente está calculada a partir de datos atmosféricos y satelitales con una granularidad de 15 y 30 minutos, y una resolución espacial de 100 millones de datos tomados de Solargis.

#### **4.8 Viabilidad económica del proyecto**

El concepto de viabilidad se utiliza en el ámbito de la evaluación de proyectos para expresar diversos contenidos. En textos de autores especializados en ingeniería o "ingeniería económica", se entiende por rentabilidad la capacidad del Proyecto para alcanzar buenos resultados financieros, es decir, un margen de beneficio aceptable. Por tanto, se utiliza como sinónimo de beneficio. Una situación similar ocurre con las publicaciones cuyos autores representan disciplinas como la gestión o la economía.

Viabilidad expresa lo viable, concepto que proviene de *vie*, vida, indica que puede vivir, desarrollarse, se refiere a "...un asunto que, por sus circunstancias, tiene probabilidades de poderse llevar a cabo". Se asemeja al concepto de posibilidad, pues lo posible indica "lo que puede ser o suceder, o que puede realizarse".

La producción de amoníaco en Colombia puede ser viable económicamente si se consideran ciertos factores. Primero, la disponibilidad de materias primas es esencial para la producción rentable de amoníaco. De acuerdo con el ministerio de minas y energía, con respecto a las reservas probadas de gas, se situaron al cierre del año 2022, en 2,82 terapés cúbicos (Tpc), con una diferencia de -0,35 con respecto al año 2021. La producción de gas comercializado fue 0,39 terapés cúbicos lo que nos lleva a una relación Reservas Probadas/Producción (R/P) de 7,2 años; por lo que se evidencia la necesidad de contar con otras formas de obtención de amoníaco, como es el caso de su producción empleando hidrógeno, proveniente de energías renovables.

En cuanto a los costos asociados con la producción, deben considerarse varios factores, como la inversión inicial en la planta de producción (CAPEX), los costos de mantenimiento y los costos de los insumos (OPEX), lo cual resulta en el costo nivelado del amoníaco (LCOA) [55].

## **Capítulo 5**

### **METODOLOGÍA**

El alcance de este proyecto consistió en modelar un sistema de producción de amoníaco verde alimentado mediante energía solar fotovoltaica. Se llevaron a cabo indagaciones relacionadas con los procesos de producción de hidrógeno, amoníaco y nitrógeno, aunque se abordaron de manera general, se enfatiza en la generación de energía solar y producción de hidrógeno verde, pues son los vectores energéticos principales de este proyecto.

Así mismo, la viabilidad de esta alternativa en el contexto colombiano, tienen un impacto significativo en la seguridad alimentaria del país y las emisiones de gases de efecto invernadero, todo esto, a partir de la producción de energía eléctrica a partir de energía solar.

A continuación, se describe la metodología que se usó para obtener los resultados en cada uno de los procesos según los objetivos propuestos.

#### **5.1 Definición del área y ubicación del proyecto**

La metodología utilizada para definir el área disponible y la ubicación de la planta de producción de amoníaco y la instalación solar fotovoltaica en el proyecto se limitó a una superficie de 4,63 hectáreas y se abordó en función de los siguientes aspectos:

1. Identificación de predios disponibles: en esta etapa inicial, se llevó a cabo una identificación de predios disponibles en la zona rural de Duitama, Colombia, que cumpliera con los requisitos necesarios para albergar la planta de producción de amoníaco y la instalación solar fotovoltaica. Una vez identificadas las opciones de predios disponibles, se procedió a la selección del área adecuada para el proyecto. Este proceso tuvo en cuenta factores como el tamaño del terreno, la accesibilidad, la topografía, la disponibilidad de

recursos naturales (como la radiación solar), la proximidad a infraestructuras existentes y a recursos hídricos. Así mismo se tuvo en cuenta la radiación solar en la zona.

2. Ubicación de la planta y la instalación solar: con un área de 4,63 hectáreas definida, se estimó la ubicación geográfica general de la planta de producción de amoníaco y la instalación solar fotovoltaica dentro de ese espacio. Teniendo en cuenta la ubicación de los paneles solares y otras infraestructuras necesarias para el proyecto.

### **5.2 Dimensionamiento de la planta solar fotovoltaica.**

El dimensionamiento de la planta solar fotovoltaica se llevó a cabo considerando una fracción del área disponible, teniendo en cuenta las demás etapas de producción de amoníaco, como la separación del aire para obtener nitrógeno del aire, la electrólisis del agua y el proceso de Haber-Bosch. Además, se utilizó la base de datos de Solargis proporcionada por el software PVSyst para determinar la capacidad máxima disponible de energía que puede entregar la planta solar fotovoltaica en el área seleccionada con el módulo Jinko solar de 610Wp, anexo 1 y con el inversor SG350HX, ver anexo 2 y con la estación de media tensión MVS3200HV-MV, ver anexo 3. Esto se logró mediante simulaciones en el software PVSyst, como se detalla en el anexo 4.

### **5.3 Producción de hidrógeno, nitrógeno y amoníaco.**

La selección del método de producción de hidrógeno se realizó teniendo en cuenta que, se requiere producir el hidrógeno, aprovechando la energía solar fotovoltaica. Por lo tanto, se optó por el método de electrólisis de agua, ya que es el más adecuado para aprovechar la energía eléctrica del parque solar. Luego, se procedió a seleccionar el electrolizador, considerando varios factores funcionales. Así mismo el método de adecuado para la obtención de nitrógeno y síntesis de amoníaco, los cuales se abordan de manera general.

### 5.3.1 Selección del electrolizador.

En la selección del electrolizador se consideraron los factores principales que son determinantes en este tipo de proyectos.

- Tecnología del Electrolizador: se evaluó la tecnología más adecuada a los requisitos del proceso de obtención de hidrógeno.
- Capacidad de Producción de Hidrógeno: se consideró la capacidad de producción de hidrógeno necesaria para satisfacer la demanda establecida.
- Eficiencia del Electrolizador: se buscó alta eficiencia energética y la minimización de pérdidas durante la electrólisis.
- Flexibilidad en la Operación: se valoró la capacidad del electrolizador seleccionado para adaptarse a variaciones en la demanda y cambios en las condiciones de operación.
- Escala de Producción: se evaluó si el electrolizador tenía la capacidad de satisfacer los volúmenes de producción requeridos.

### 5.3.2 Cálculo de la producción de hidrógeno.

Se realizó el cálculo de la producción anual de hidrógeno teniendo en cuenta varios factores determinantes como las horas de brillo solar en el sitio y por lo tanto la energía disponible, la capacidad del electrolizador, el promedio de funcionamiento de la planta y la eficiencia del proceso.

### 5.3.3 Cálculo de la capacidad de producción de amoníaco y catalizador

El cálculo de la producción diaria de amoníaco se realizó considerando la cantidad de hidrógeno que se proyectó y el porcentaje de composición por masa del amoníaco.

Si bien el método de producción de amoníaco adecuado para alimentarse con energía solar fotovoltaica es el Haber-Bosch, sumado a que el hidrógeno se obtiene

mediante electrolisis del agua. Se selecciono el catalizador adecuado, utilizando una descomposición funcional para desarrollar criterios que son aplicados de forma cuantitativa en una matriz para calificar y seleccionar el mejor catalizador.

#### 5.3.4 Selección del método y capacidad de producción de nitrógeno

Se tuvo en cuenta los requerimientos del proyecto para seleccionar el método de fabricación adecuado, además de la cantidad estimada de nitrógeno que se debe producir, dado que el aire es gratuito, se usará como materia prima.

Se propuso un esquema general del proceso para la fabricación de amoníaco, teniendo en cuenta los elementos y resultados obtenidos en los ítems anteriores, con el fin de tener una visión clara y secuencial de las diferentes etapas y operaciones involucradas en la producción de amoníaco a partir de hidrógeno y nitrógeno.

### **5.4 Balance de energía y masa.**

El balance de energía y el balance de masa son herramientas fundamentales en la ingeniería, la física y otras disciplinas para comprender y analizar sistemas físicos y procesos. Estos balances contribuyen a la selección y estimación de costos de equipos.

#### 5.4.1 Balance de energía

El balance de energía se realizó para comprender y cuantificar cómo la energía se transfiere, en cada proceso. Se basa en el principio de conservación de la energía, que establece que la energía total en un sistema aislado se mantiene constante (a menos que haya interacciones externas).

Para la instalación solar:

$$\text{Potencia del parque} = \text{Salidas a los procesos} + \text{pérdidas del sistema}$$

### 5.4.2 Balance de masa

El balance de masa se realiza para comprender y cuantificar cómo los materiales o sustancias se mueven o se acumulan en un sistema físico. Se basa en el principio de conservación de la masa, que establece que la masa total en un sistema cerrado se mantiene constante. El balance se realiza de la siguiente manera.

Para la producción de hidrógeno:

$$\text{Entrada de } H_2O = (H_2O * \mu \text{ conv. a } H_2) + (H_2O * \mu \text{ conv. } O_2) + (H_2O * (1 - \mu))$$

$\downarrow$   $\downarrow$   $\downarrow$   
*H<sub>2</sub> Producido*      *O<sub>2</sub> Derivado*      *Pérdidas*

Para la producción de nitrógeno:

$$\text{Produccion de } N_2 = \frac{\text{Produccion de } H_2}{0,178} * 0.822$$

$$\text{Aire a captar} = (\text{Aire C.} * 0,78) + (\text{Aire C.} * 0,21) + (\text{Aire C.} * 0,01)$$

$\downarrow$   $\downarrow$   $\downarrow$   
*N<sub>2</sub> Producido*      *O<sub>2</sub> Derivado*      *Pérdidas*

Para la producción de amoníaco:

$$\text{Entr. } N_2 + H_2 = ((N_2 * 0,822 + H_2 * 0,178) * \mu) + (N_2 * (1 - \mu)) + (H_2 * (1 - \mu))$$

$\downarrow$   $\downarrow$   $\downarrow$   
*NH<sub>3</sub> Producido*      *N<sub>2</sub> sin reaccionar*      *H<sub>2</sub> sin reaccionar*

### 5.5 Cálculo de los valores de LCOE, LCOH y LCOA.

El LCOE se determinó considerando el CAPEX y OPEX relacionados a la producción de electricidad en la planta solar fotovoltaica, resultados del informe de producción de energía de la simulación en PVSyst. Esto incluirá los costos de inversión,

de desarrollo de la ingeniería y de construcción, así como los costos asociados a la operación y mantenimiento, como un porcentaje del CAPEX y la anualización de estos costos y de la producción energética con una tasa de descuento o de oportunidad [56].

$$LCOE \left( \frac{USD}{MWh} \right) = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t} * I_{inv}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Donde:

- CAPEX es el costo de inversión inicial.
- OPEX es el costo operativo anual como un porcentaje del CAPEX.
- t es el período de tiempo del análisis
- r es la tasa de descuento
- $I_{inv}$ : Indisponibilidad inversores. Datos de fabricante.

El LCOH se calculó considerando el CAPEX y OPEX asociados a la producción de hidrógeno, como el costo de inversión inicial, en donde se refleja el costo del electrolizador, los costos de ingeniería y construcción, también los costos de operación y mantenimiento, como un porcentaje del CAPEX y que se relaciona con la producción de  $kg H_2$  y la anualización con una tasa de descuento o de oportunidad [57]. A continuación, la formulación para este cálculo.

$$LCOH \left( \frac{USD}{kg H_2} \right) = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{kg H_{2t}}{(1+r)^t}}$$

Donde:

- CAPEX es el costo de inversión inicial.
- OPEX es el costo operativo anual como un porcentaje del CAPEX.
- t es el período de tiempo del análisis

- $r$  es la tasa de descuento

El LCOA se calculó teniendo en cuenta los costos totales de producción de amoníaco, incluyendo los de materia prima, energía, mano de obra, ingeniería y de inversión por los equipos. Así, como los valores de operación y mantenimiento, como porcentajes del CAPEX y la anualización de estos costos y los de producción de amoníaco con una tasa de oportunidad o descuento. Esto proporcionará una estimación del costo promedio de producción de una tonelada de amoníaco [58].

$$LCOA \left( \frac{USD}{t NH_3} \right) = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{NH_{3t}}{(1+r)^t}}$$

Donde:

- CAPEX es el costo de inversión inicial.
- OPEX es el costo operativo anual como un porcentaje del CAPEX.
- $t$  es el período de tiempo del análisis
- $r$  es la tasa de descuento

## 5.6 Viabilidad financiera del proyecto.

Para determinar la viabilidad financiera del proyecto se determinó la inversión inicial requerida, y se compararon los valores del LCOH (Costo nivelado del hidrógeno), LCOE (Costo nivelado de la energía) y LCOA (Costo nivelado del amoníaco) con los actuales del mercado. Finalmente, se estimó el período de recuperación de la inversión inicial, de acuerdo con el flujo de caja del proyecto en la vida de éste, basándose en el precio promedio de venta de amoníaco en la región LATAM durante los años 2019 y 2023. Es importante destacar que se optó por utilizar los años anteriormente mencionados para mantener una aproximación conservadora, evitando proyecciones basadas en los precios

elevados durante la pandemia por Covid-19 y la guerra entre Ucrania y Rusia. A continuación, se muestra la formulación de flujo de caja:

$$FCN = \text{Ingreos totales} - \text{Gastos totales}$$

$$FCN = (A_t * P - OPEX) * (1 - I_R) * \text{Indisponibilidad} * \text{Degradación}$$

Donde:

- $A_t$  es la cantidad total de producción anual de amoníaco en toneladas métricas
- $P$  es el precio de venta promedio entre año 2019 y 2023 en la región LATAM (estos años para evitar las contingencias por Covid y la guerra entre Ucrania y Rusia)
- OPEX es el costo operativo anual, % del CAPEX de la planta de amoníaco verde
- $I_R$  es el impuesto de renta en Colombia, de acuerdo con leyes locales.
- *Indisponibilidad* es el tiempo en que no opera la planta en el año
- Degradación de la planta de amoníaco verde

También se analiza el valor presente neto para determinar si invertir en este proyecto es viable o no, trayendo los flujos de caja futuros que se esperan obtener el transcurso de los 30 años de vida útil del proyecto. De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

Donde:

- $CF_t$ : flujos de caja en el período t
- n: es el último período en el que se esperan flujos de efectivo
- r: es la tasa de descuento o de interés

Finalmente se calculó la tasa interna de retorno TIR, como medida final financiera para evaluar la rentabilidad de este proyecto, siendo la tasa de descuento que hace que el valor presente de los flujos de efectivo futuros sea igual al costo total de inversión, la formulación es la siguiente:

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1 + TIR)^t}$$

Donde:

- $CF_t$ : flujo de caja neto en el período t
- n: es el último período en el que se esperan flujos de efectivo
- $TIR$ : es la tasa interna de retorno

## Capítulo 6

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 6.1 Definición del área y ubicación del proyecto

El área para el proyecto se seleccionó a partir de predios actualmente disponibles en la zona rural de Duitama, Boyacá, como se muestra en la figura 8. El polígono de color cian abarca un área de 4,63 hectáreas (figura 9) y se utilizó como base para la ubicación proyectada de la planta de producción de amoníaco verde.

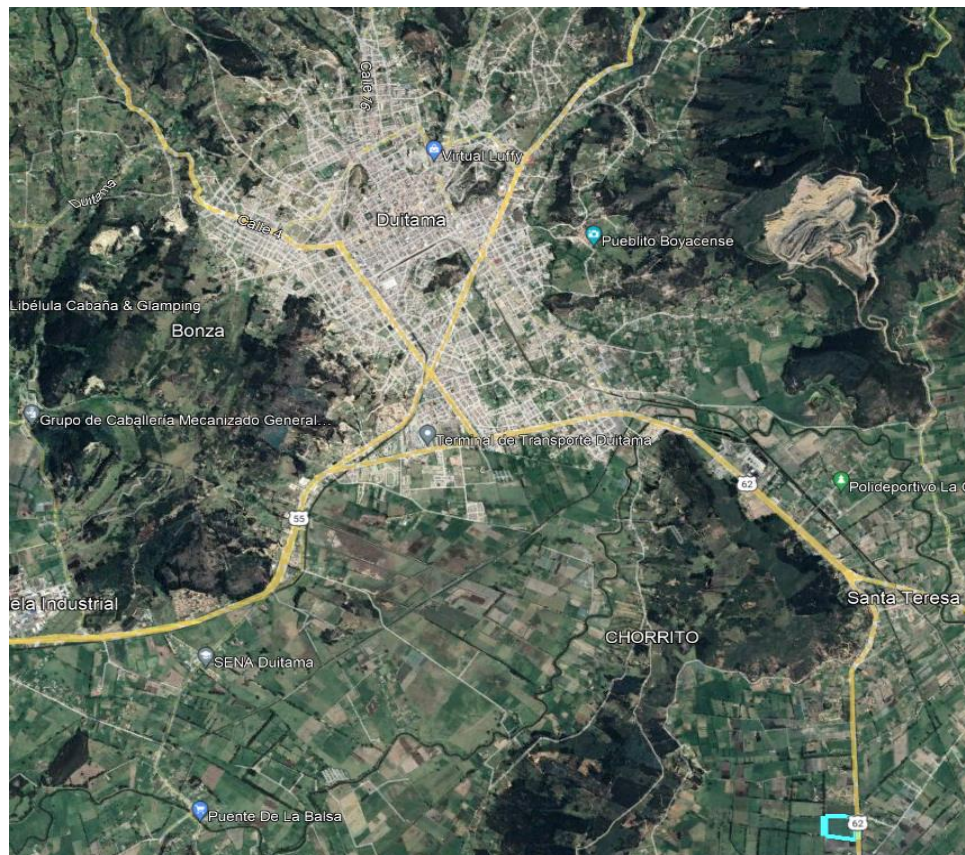


Figura 8: Vista aérea del polígono para la planta de amoníaco verde. Imagen de Google earth [59].

Dado que desde el inicio se buscaba realizar la prefactibilidad de la planta de producción de amoníaco verde en Duitama, Boyacá, se exploró la zona rural, específicamente en la vereda El Chorrito. Esta ubicación se encuentra sobre la vía que

conecta Duitama con Sogamoso y, a su vez, se comunica con la ciudad de Bogotá, lo que se consideró estratégico en términos de accesibilidad.

El área disponible, es de 4,63 hectáreas con un perímetro de 863,39 metros, como se muestra en la figura 9, está compuesta por cuatro predios diferentes. Uno de estos predios se utiliza actualmente para el cultivo de cebolla larga, una plantación típica en la región de Boyacá, mientras que los otros predios no tenían ninguna actividad económica.



Figura 9: Vista aérea del polígono para la planta de amoníaco verde. Imagen de Google earth [60].

## 6.2 Dimensionamiento de planta solar fotovoltaica

El tamaño de la planta está definido por el área disponible de 4,63 hectáreas en el área rural de Duitama, Boyacá. Para dimensionar el tamaño de la planta se tomaron en consideración las pérdidas internas de la instalación, correspondientes a las pérdidas de energía en los cableados solar, de baja tensión y de media tensión, estas pérdidas se han

asumido de 4%, es decir una eficiencia del 96% para cableados, además, la planta estará conectada a la red y por regulación colombiana CREG148 el factor de potencia mínimo requerido es de 0,97 [58], la eficiencia en los transformadores por estándar IEC60076 es de 99%, la eficiencia de los inversores por estándar europeo es de 98,8%. La eficiencia total de la planta resulta de multiplicar todas las eficiencias de los equipos asociados, resultando 90,3 % y un performance ratio (PR) de 89,97%, de acuerdo con la simulación en PVsyst, ver anexo 4, un valor típico de estas plantas.

La planta estaría compuesta de 7.125 módulos de 610 Wp ocupando el 90% del área total del proyecto de Jinko solar JKM610N-78HL4-BDV, ver anexo1, diez inversores string SG350HX, ver anexo 2, y una estación de media tensión de 3,2 MWac, ver anexo 3, a su vez, los módulos estarán instalados sobre estructuras fijas con una inclinación de  $10^{\circ}$  hacia el sur, esto porque Colombia se encuentra en el hemisferio norte, en la figura 10 se observa la distribución de la planta fotovoltaica.



Figura 10: Layout planta solar fotovoltaica de 3.2 MWac. Elaboración propia.

La potencia nominal total de la planta a temperatura de 30°C, con factor de potencia de 1 y con pérdidas internas del 4% para los cableados solar, baja tensión y media tensión, como ya se mencionó y el mínimo factor de potencia requerido en el punto de conexión por regulación colombiana, la potencia nominal de los inversores es de 3,520MWac.

### 6.3 Producción de hidrógeno, nitrógeno y amoníaco.

El método adecuado para la obtención de hidrógeno en este proyecto es la electrólisis del agua, puesto que se puede aprovechar la energía solar y convertirla en una forma de almacenamiento de energía química, es decir, en hidrógeno [61].

Para la síntesis de amoníaco, se utiliza el proceso Haber-Bosch. Es importante destacar que este proceso representa solo aproximadamente el 6% de la demanda de electricidad en una planta típica de amoníaco verde (esto teniendo en cuenta una eficiencia energética de 50 - 60%), los electrolizadores consumen aproximadamente el 92% de la energía requerida. Sin embargo, los electrolizadores actuales ofrecen flexibilidad, lo que significa que el suministro de electricidad podría reducirse en más del 90% y permitir que el proceso Haber-Bosch continúe funcionando [62].

#### 6.3.1 Selección del electrolizador.

Para la elección del tipo PEM (*proton-exchange membrane*) de electrolizador, en la tabla 6 se mencionan los criterios tenidos en cuenta.

Tabla 6: Comparación de electrolizadores para la obtención de hidrógeno.

Tipo de Electrolizador	Temperatura de Operación	Presión de Operación	Eficiencia Energética	Pureza del Hidrógeno	Comercialización
PEM (Proton-exchange membrane)	(50-80 °C)	(1-30 bar)	60%-90%	99,99%	Establecido y en crecimiento
Alcalino	(60-90 °C)	(1-30 bar)	50%-80%	99,5%-99,9%	Establecido

Tipo de Electroizador	Temperatura de Operación	Presión de Operación	Eficiencia Energética	Pureza del Hidrógeno	Comercialización
SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell)	(800-1.000)°C	(10-30)	80%-99%	99,99%	En desarrollo
HTE (High-Temperature Electrolysis)	(800-1.000)°C	(10-30) bar	>90%	99,99%	En desarrollo
Fotoelectroquímico	Variable	Variable	Variable	Variable	En investigación

*Fuente: elaboración propia, tomado de [43].*

En verde se ha señalado el mejor o mejores condiciones según la propiedad descrita, y en rojo las peores condiciones. El electroizador PEM ofrece algunas ventajas importantes, como su capacidad para operar a temperaturas relativamente bajas (50 – 90) °C y a baja o media presión (1 – 30) bar. Esto resulta en una menor demanda de energía y en una mayor eficiencia energética en comparación con otros tipos de electroizadores. Además, el electroizador PEM puede producir hidrógeno de alta pureza, lo cual es esencial para la producción de amoníaco de calidad. Este tipo de electroizador produce hidrógeno de alta calidad, finalmente son tipos de electroizadores que comercialmente están tomando mucha fuerza, por lo cual sus costos son competitivos para este tipo de proyectos [63].

Se seleccionaron 3 módulos electroizadores. Su modularidad lo hace adecuado para proyectos que requieren de 1 a 5 MW de capacidad de electrólisis. La capacidad es la adecuada según los cálculos realizados en la sección 6.3.2. Se muestra las fichas técnicas del electroizador como anexo 5.

### 6.3.2 Cálculo de la producción de hidrógeno.

Para realizar el cálculo diario promedio de producción de hidrógeno se debe tener en cuenta que, según el fabricante, el electroizador produce 1.350 kg de hidrógeno al día, tomando como referencia 8,5 horas de funcionamiento a carga nominal.

No obstante, se tienen menos horas de brillo solar diarias promedio en la zona, de acuerdo con datos del Ideam en la zona [15], limitando la producción de energía y directamente de hidrógeno, se realizó el cálculo relativo de la producción de hidrógeno, la eficiencia del equipo ya fue tomada en cuenta por el fabricante al suministrar los datos del electrolizador. A continuación, se realiza una estimación diaria de producción de hidrógeno mensual y así se pudo estimar la producción anual de hidrógeno. Los cálculos se realizan de la siguiente manera:

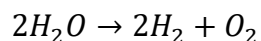
$$\frac{\text{Energía disponible al año} \left( \frac{kWh}{\text{año}} \right)}{\text{Consumo de energía } H_2 \left( \frac{kWh}{kg} \right)} = \text{Prod. de } H_2 \text{ al año} \left( \frac{kg}{\text{año}} \right).$$

$$\frac{6.785.240,03 \left( \frac{kWh}{\text{año}} \right)}{53 \left( \frac{kWh}{kg} \right)} = 128.025,23 \left( \frac{kg}{\text{año}} \right).$$

Teniendo en cuenta el consumo de energía del electrolizador mostrado en la ficha técnica del electrolizador (anexo 5) y la energía disponible anual, se obtuvo un estimado anual de producción resultante de 128,03 toneladas aproximadas anuales de hidrógeno verde. Así mismo se toma como 1 kg/m<sup>3</sup> la densidad del agua, presión atmosférica estándar y temperatura de 20°C a la entrada del proceso. Los cálculos se realizaron teniendo en cuenta los consumos estándar proporcionados en la ficha técnica del electrolizador, y ya se consideraron las pérdidas y eficiencias del sistema. Además, se anticipa una producción derivada de oxígeno de 756.869 m<sup>3</sup>/año tomando la densidad del oxígeno como 1,429 kg/m<sup>3</sup>, el cual se podría reusar con fines de mejorar la viabilidad económica del proyecto.

### 6.3.3 Cálculo de cantidad de agua requerida

El cálculo teórico de agua requerida, parte de la reacción química que forma el hidrógeno y oxígeno a partir de H<sub>2</sub>O. La ecuación balanceada es:



Esto significa que se necesitan 2 moléculas de agua ( $H_2O$ ) para formar 2 moléculas de hidrógeno ( $H_2$ ) y 1 molécula de oxígeno ( $O_2$ ). La masa molar del hidrógeno ( $H_2$ ) es aproximadamente 2 gramos/mol y la del agua ( $H_2O$ ) es aproximadamente 18 gramos/mol. Es decir, teóricamente se requiere 18 kg de agua para producir 2 kg de hidrógeno. Por lo tanto, la relación de masas entre el agua y el hidrógeno es de  $18/2 = 9$ .

En un escenario ideal con eficiencia del 100%, se requiere:

$$128.025 \text{ kg de } H_2 \times 9 \frac{\text{kg de } H_2O}{\text{kg de } H_2} = 1.152.225 \text{ kg } H_2O$$

Luego, se calculó la cantidad de moles de hidrógeno. La masa molar del hidrógeno ( $H_2$ ) es aproximadamente 2 g/mol, por lo que se tiene 64.012.500 moles de hidrógeno.

$$\text{Moles de } H_2(\text{mol}) = \frac{\text{Masa de } H_2(\text{g})}{\text{Masa molar de } H_2(\frac{\text{g}}{\text{mol}})}$$

$$64.012.500 (\text{mol}) = \frac{128.025.000 (\text{g})}{2(\frac{\text{g}}{\text{mol}})}$$

Según la ecuación química, 2 moles de hidrógeno producen 2 moles de agua. Por lo tanto, se pueden producir 64.000.000 moles de agua.

$$\text{Moles de } H_2(\text{mol}) * 1 \frac{\text{moles de } H_2O(\text{mol})}{\text{moles de } H_2(\text{mol})} = \text{Moles de } H_2O(\text{mol})$$

Finalmente, se convirtió los moles de agua a gramos. La masa molar del agua ( $H_2O$ ) es aproximadamente 18 g/mol, por lo que puedes producir 1.152.225,000 gramos o 1.152 toneladas de agua.

$$\text{Moles de } H_2O(\text{mol}) * 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = \text{Masa de } H_2O(\text{g})$$

$$64.012.500 \text{ mol} * 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1.152.025.000(\text{g})$$

Obteniendo igualmente 1.152 toneladas de agua.

Sin embargo, es claro que se tienen pérdidas en el proceso, el fabricante menciona la cantidad de agua requerida por hora para un stack, a continuación, se muestra en la tabla 7, la cantidad de agua necesaria para producir el hidrógeno anteriormente mencionado según el fabricante del electrolizador, teniendo en cuenta las horas de brillo solar resultantes del dimensionamiento de la planta solar y el consumo de agua por los 3 stacks, se muestra la ficha técnica del electrolizador en el anexo 5.

Los cálculos de la tabla 7 se realizaron como se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Horas de brillo solar promedio (HBS)} \left( \frac{\text{h}}{\text{día}} \right) * \text{cantidad de agua requ. (m}^3/\text{h)} \\ = \text{Cantidad de agua promedio (m}^3/\text{día)}. \end{aligned}$$

$$\text{Cantidad de agua prom.} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) * 30 \text{ días(mes)} = \text{Cantidad agua prom (m}^3)$$

*Tabla 7: Datos promedio de consumo de agua para el proceso de electrolisis.*

Mes	HBS (h/día)	Máxima cantidad de agua	Máxima cantidad de agua utilizada por el electrolizador (3 stacks) en promedio
-----	-------------	-------------------------	--

		utilizada por stack (m <sup>3</sup> /h)	por hora (m <sup>3</sup> /h)	por día (m <sup>3</sup> /día)	por mes (m <sup>3</sup> /mes)
Enero	6,4	0,26	0,78	4,99	149,76
Febrero	5,7	0,26	0,78	4,45	133,38
Marzo	4,5	0,26	0,78	3,51	105,3
Abril	3,7	0,26	0,78	2,89	86,58
Mayo	4,0	0,26	0,78	3,12	93,6
Junio	4,1	0,26	0,78	3,20	95,94
Julio	4,2	0,26	0,78	3,28	98,28
Agosto	3,8	0,26	0,78	2,96	88,92
Septiembre	3,7	0,26	0,78	2,89	86,58
Octubre	3,9	0,26	0,78	3,04	91,26
Noviembre	4,5	0,26	0,78	3,51	105,3
Diciembre	5,8	0,26	0,78	4,52	135,72
Total agua utilizada anualmente					1.270,62

*Fuente: elaboración propia*

Para la generación de la cantidad estimada previamente en la tabla 7, se requieren 1.270,62 m<sup>3</sup>/año de agua al año, sin embargo, se debe tener en cuenta que no toda el agua está en condiciones para la electrolisis, la cifra anteriormente mencionada debe ser agua lista para la electrolisis, el agua debe cumplir un estándar mínimo dado según la normativa EU Directive 2020/2184-EU lo cual puede incrementar significativamente el consumo de agua sin tratar en la práctica (típicamente del 40% al 60%).

#### 6.3.4 Selección del catalizador para el proceso Haber-Bosch

A continuación, se muestra la matriz de selección del catalizador para la síntesis de amoníaco teniendo en cuenta distintos atributos. Los diferentes atributos se describen por orden de importancia y se evalúan. Se utilizan en una matriz de evaluación para comparar cuantitativamente y seleccionar el mejor catalizador utilizado para este proyecto de diseño. A cada criterio se le asigna un valor numérico ponderado entre 1 y 5 que se aplica en una tabla a cada una de las vías o catalizadores para seleccionar la opción con mayor puntuación.

La evaluación se basa en 4 criterios: costo del catalizador, aporte de energía, eficiencia y seguridad. El costo del catalizador afecta en gran medida las ganancias de las plantas y se le asigna un 40% del peso. El aporte de energía es la forma en que el catalizador reduce la temperatura o presión necesaria en la reacción y la eficiencia es la forma en que el catalizador acorta el tiempo de reacción. Ciertos catalizadores pueden ser peligrosos o requerir condiciones de reacción severas, lo que significa mayores inversiones en la capacitación adecuada de los operadores de la planta. Estos tres criterios tienen una ponderación del 20% cada uno. En la tabla 8 se exhiben los valores asignados a cada tipo de catalizador, donde el de hierro ha sido el recomendado.

Tabla 8: Comparación de atributos para catalizadores para Haber-Bosch.

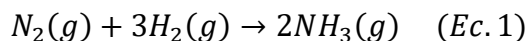
Criterios	Peso	Hierro	Rutenio
Costo	40%	5	e4
Energía	20%	2	3
Eficiencia	20%	4	4
Seguridad	20%	2	2
<b>Total</b>	100%	3,6	3,4

Fuente: elaboración propia.

El catalizador de hierro obtuvo la puntuación más alta en la matriz de evaluación y es un campo bien investigado y orientado a la producción dedicada a mediana y gran escala de amoníaco, por lo cual se seleccionó este.

### 6.3.5 Cálculo de la capacidad de producción de amoníaco

Se realizó el cálculo teniendo en cuenta la masa molar de los componentes mostrado a continuación, además del porcentaje de composición por masa del amoníaco, ver figura 11, la reacción se calcula a partir de la ecuación 1:



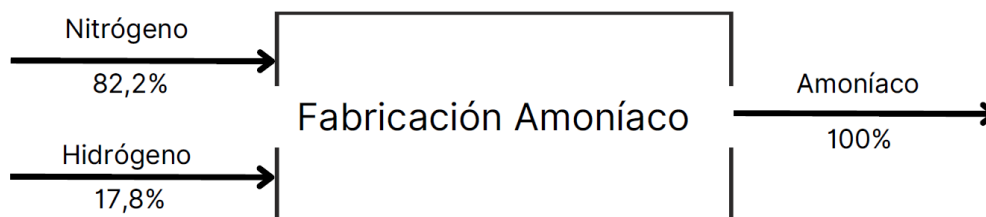


Figura 11: Reacción general de producción de amoníaco. Elaboración propia.

Así mismo se realiza el cálculo de masa molar de los componentes: masa molar del amoníaco es 17,031 g/mol. Un mol de amoníaco contiene aproximadamente 17,031 g de materia. La masa molar de los compuestos químicos se calculó sumando la masa atómica de los átomos que lo componen. En este caso, los átomos de nitrógeno (14,007 g) e hidrógeno (1,008 g). Por lo tanto, la masa molar del amoníaco se obtiene sumando la masa atómica de los átomos que lo componen:  $14,007 + (3 \times 1,008) = 17,031$  g/mol.

A continuación, se observa en la tabla 9, la producción de amoníaco resultado de la estimación del promedio diario mensual, se realiza el cálculo total de producción mensual neta como producto de la producción total ideal y la eficiencia de la conversión, siendo esta del 97%, según ficha técnica, teniendo en cuenta que la materia prima que no reacciona al pasar por la síntesis vuelve a usarse en el proceso. Tomando estos valores, se estimó una producción aproximada de 697,74 toneladas métricas de amoníaco verde por año.

Tabla 9: Producción anual de Amoníaco.

mes	Producción de hidrogeno promedio diaria (kg/d)	Producción de amoníaco promedio diaria (kg/d)	Producción de amoníaco ideal al mes (kg/mes)	Producción de amoníaco neta al mes (kg/mes)
Enero	497,96	2797,52	83925,63	81.407,87
Febrero	442,69	2487,03	74610,80	72.372,47
Marzo	367,44	2064,29	61928,65	60.070,79
Abril	289,93	1628,81	48864,24	47.398,31
Mayo	335,68	1885,85	56575,35	54.878,09
Junio	317,99	1786,46	53593,77	51.985,96
Julio	328,12	1843,39	55301,75	53.642,70

Agosto	293,05	1646,36	49390,71	47.908,99
Septiembre	287,59	1615,66	48469,83	47.015,73
Octubre	300,07	1685,80	50573,96	49.056,74
Noviembre	353,85	1987,90	59636,86	57.847,75
Diciembre	453,61	2548,36	76450,83	74.157,30
Total producción amoníaco al año (kg/año)			719.322,37	697.742,70

*Fuente: elaboración propia.*

Se realiza a continuación una muestra de cálculo para el primer mes:

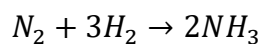
Utilizando la ecuación, se obtiene la cantidad de moles de Hidrógeno:

$$\text{Moles de } H_2 = \frac{\text{Masa molar } H_2}{\text{Masa total de } H_2}$$

$$\text{Moles de } H_2 = \frac{489,09}{\frac{2g}{mol}} * \frac{1.000}{1kg}$$

$$\text{Moles de } H_2 \approx 244,545 \text{ moles}$$

Utilizando la ecuación balanceada del amoníaco (Ec. 1):



Se obtiene la cantidad de moles de  $NH_3$  a partir de la ecuación 3.

$$\text{Moles de } NH_3 = \frac{244,545}{3} * \frac{2}{1}$$

$$\text{Moles de } NH_3 \approx 163.030 \text{ moles}$$

Finalmente, se calcula la masa total del amoníaco en un día utilizando la ecuación 4 y se multiplica por la eficiencia del proceso.

$$\text{Masa total ideal de } NH_3 = \text{Moles de } NH_3 * \text{Masa Molar de } NH_3$$

$$\text{Masa total ideal de } NH_3 = \text{Moles de } NH_3 * 17,03 \text{ g/mol.}$$

$$\text{Masa total ideal de } NH_3 = 163.03 * 17,03 \text{ g/mol}$$

$$\text{Masa total ideal de } NH_3 \approx \frac{2.792.704g}{1.000g/kg}$$

$$\text{Masa total ideal de } NH_3 \approx 2.797,52 \text{ kg}$$

Masa total ideal de  $NH_3$  \*  $\mu \approx$  Masa total neta de  $NH_3$

$$2.797,52 \text{ kg} * 97\% \approx 2.709 \text{ kg}$$

Masa total neta diaria de  $NH_3 \approx 2.709 \text{ kg}$

Estos cálculos se pueden verificar usando el porcentaje de composición por masa mostrado anteriormente:

$$\text{Masa total neta diaria de } NH_3 = \frac{\text{Prod. } H_2 \text{ al día}}{0,178}$$

$$\text{Masa total ideal de } NH_3 = \frac{497,96}{0,178}$$

Masa total ideal de  $NH_3 \approx 2.797,53 \text{ kg}$ .

Masa total teórica de  $NH_3$  \*  $\mu \approx$  Masa total neta de  $NH_3$

$$2.797,53 \text{ kg} * 97\% \approx 2.709 \text{ kg}$$

Masa total neta diaria de  $NH_3 \approx 2.709 \text{ kg}$

Por último, se estima la cantidad a producir al mes, considerando 30 días en promedio, esta cifra debe coincidir con la correspondiente en la tabla 9.

Producción neta diaria de  $NH_3$  \* 30 = Producción neta mensual de  $NH_3$   $\left(\frac{kg}{mes}\right)$

$$2.709 \text{ kg} * 30 = 81.407 \left(\frac{kg}{mes}\right)$$

Producción neta mensual de  $NH_3$   $\left(\frac{kg}{mes}\right) = 81.407 \left(\frac{kg}{mes}\right)$

### 6.3.6 Selección del método y capacidad de producción de nitrógeno.

La selección entre las tecnologías depende de la pureza requerida del gas y de las necesidades específicas del proyecto. Mientras que la destilación criogénica es un proceso energéticamente intensivo debido a las bajas temperaturas requeridas, la adsorción por oscilación de presión y membranas son energéticamente muy eficientes. Por esto la

destilación criogénica queda descartada, la tecnología de membrana es ideal para aplicaciones de baja pureza (95% - 99%), mientras que la tecnología PSA puede producir nitrógeno de mayor pureza (97% - 99,9995%). Ambas tecnologías ofrecen soluciones rentables y confiables para la generación de nitrógeno en diversas industrias, pero se opta por la tecnología PSA debido al requerimiento de mayor pureza para garantizar una producción eficiente y confiable de amoníaco. Idealmente, el nitrógeno utilizado en el proceso debe ser extremadamente puro y estar libre de impurezas que puedan interferir con la reacción química o dañar los catalizadores utilizados [64].

### 6.3.7 Producción de Nitrógeno.

Algunos beneficios clave de los sistemas PSA para la generación de nitrógeno incluyen:

- Altos niveles de pureza del nitrógeno de hasta el 99,9995 %
- Sistema de generación de nitrógeno altamente confiable
- Bajos niveles de mantenimiento gracias a la alimentación de aire comprimido limpio y seco
- Altamente consistente, produce una gran cantidad de gas nitrógeno [64].

Se tuvo en cuenta el porcentaje de composición por masa del amoníaco, y así se estimó la cantidad de nitrógeno requerido en promedio para cada mes, se muestran en la tabla 10 los resultados. Con base a estos datos, se estimó una producción anual de 549 toneladas métricas de nitrógeno.

Se seleccionó para tal fin el NS-60-88 de Generon que funciona con aire comprimido, pasando a través de un lecho de tamiz molecular de carbono (CMS). Luego el tamiz adsorbe preferentemente oxígeno y humedad sobre el nitrógeno, permitiendo que el nitrógeno pase como producto gaseoso a presión. Mientras una de las torres está en fase de adsorción, la otra torre se regenera mediante despresurización, momento en el que el tamiz libera los gases adsorbidos a la atmósfera y luego se repite el ciclo. Puede producir

alrededor de 613 kg/h a 90 psi según el fabricante (ver anexo 6), a continuación, se muestra la producción anual de Nitrógeno en la tabla 10. Los niveles de producción de nitrógeno se calcularon según la sección 6.3.5.

*Tabla 10: Producción anual de Nitrógeno.*

mes	Producción de hidrógeno al día (kg/d)	Producción de Nitrógeno al día (kg/d)	Producción de Nitrógeno mensual con pureza del 99.99% (kg/d)
Enero	483,02	2.230,58	66.917,27
Febrero	429,41	1.977,38	55.366,63
Marzo	336,42	1.549,18	46.475,42
Abril	281,23	1.295,05	38.851,44
Mayo	303,91	1.399,50	41.984,99
Junio	308,45	1.420,40	42.612,04
Julio	318,28	1.384,51	41.535,33
Agosto	284,26	1.308,98	39.269,48
Septiembre	278,96	1.244,04	37.321,11
Octubre	291,07	1.340,34	40.210,07
Noviembre	343,23	1.580,53	47.416,00
Diciembre	440,00	1.701,67	51.050,12
Total producción nitrógeno al año (kg/año)			549.009,89

*Fuente: elaboración propia.*

Si se multiplica la suma de producción de los días y se multiplica por 30 días operativos promedios de cada mes, se tiene una producción anual de 549 t/año.

## **6.4 Balance de energía y masa.**

### **6.4.1 Balance de masa y energía general de los procesos.**

Se abordó el balance de masa y energía en 4 procesos definidos por bloques, así como se observa en la figura 12, siendo el primero la instalación solar fotovoltaica, el segundo la producción de hidrógeno a partir de electrólisis del agua, el tercero la producción de nitrógeno a partir del método de adsorción por oscilación de presión y el

cuarto la producción del amoníaco por medio del proceso Haber-Bosch. En la figura 13 se observan los balances de masa y energía para todas las etapas. Cabe resaltar que para el primer proceso solo se tiene balance de energía pues la radiación solar no tiene masa, así mismo el bloque punteado correspondiente al tratamiento del agua para la electrolisis no se tiene en cuenta en el alcance de este proyecto, pues de deben realizar estudios diferentes sobre la calidad del agua en la zona.

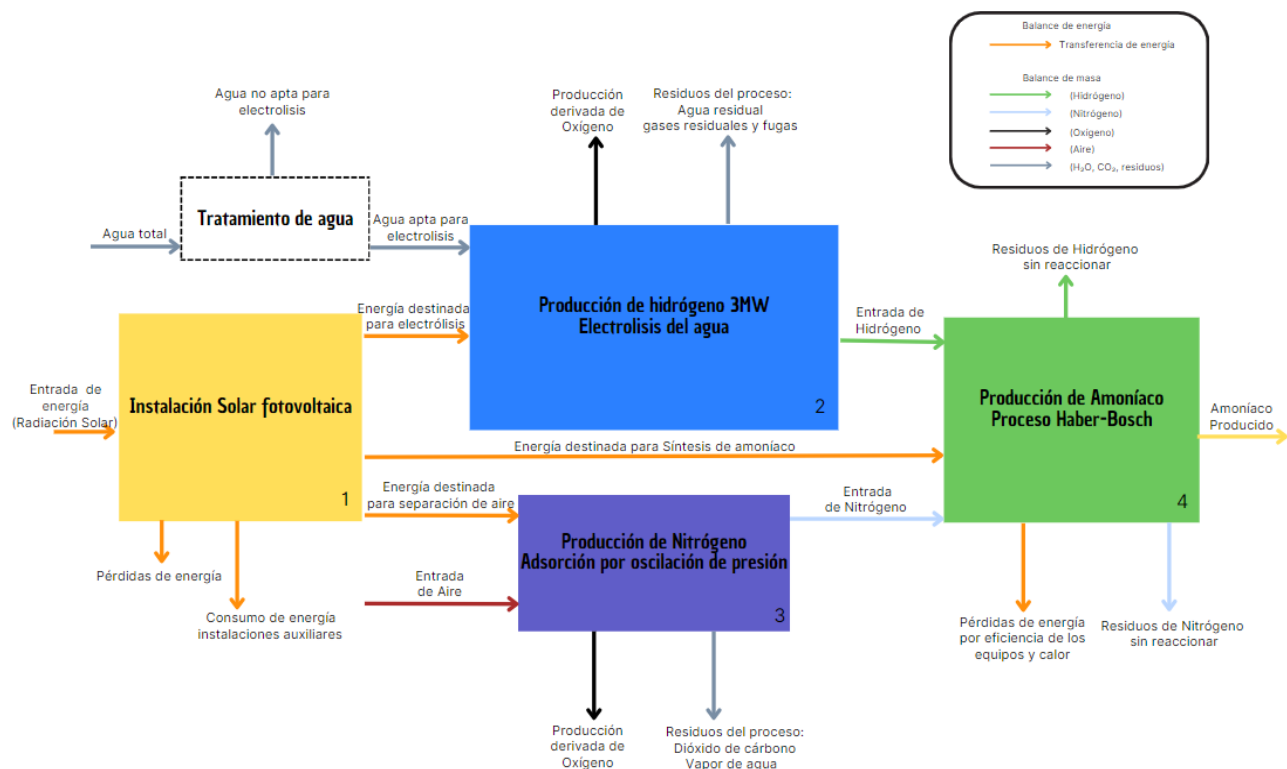


Figura 12: Esquema general de la planta. Elaboración propia.

En la figura 13 se observa el balance de masa y energía de todas las etapas del proceso general. A continuación, se describe cada uno de los procesos según el bloque que lo representa:

#### Instalación solar fotovoltaica (bloque 1)

En el primer proceso, se realizó el balance de energía para la instalación solar fotovoltaica y los demás equipos y maquinas eléctricas que serán encargados de proveer

energía eléctrica a los demás procesos, de acuerdo con la simulación en el software PVsyst del anexo 4.

La fuente primaria de energía que se induce al sistema es la radiación solar con un total de 33.802,48 MWh/año, y que entrega al final de la etapa fotovoltaica 7375,7 MWh/año, ver sección 4.5 del anexo 4, existiendo pérdidas de 25.849,25 MWh/año en cuanto a la conversión de radiación solar a energía eléctrica y 739.356 kWh/año en el proceso de transformación de energía eléctrica.

Como primicia se definió que sólo se usará la producción energética con base al promedio de HBS del IDEAM, calculando así los consumos de cada etapa con una energía en firme, los excedentes de la planta solar fotovoltaica no se tuvieron en cuenta para realizar un análisis de aprovechamiento de esta energía, este puede ser un proceso de optimización para futuros trabajos y que no abordamos en este proyecto por temas de practicidad del cálculo general.

Siendo así, la planta fotovoltaica energizará los distintos procesos propuestos en este trabajo; del total de la energía producida una cantidad de 6785,64 MWh/año de energía, se destinan a alimentar el proceso de producción de hidrógeno por medio de la electrólisis del agua ver anexo 5, 442,54 MWh/año para alimentar el proceso de síntesis de amoníaco (Haber-Bosch), ver anexo 6. 142,52 MWh/año para energizar el proceso de producción de nitrógeno por PSA y se destinan 5 MWh/año para alimentar las instalaciones auxiliares como pueden ser sedes administrativas o data center.

#### Producción de hidrógeno (bloque 2)

El segundo proceso correspondiente a la producción de hidrógeno, en el cual se tiene una eficiencia en la conversión de 90,6% y una eficiencia total de 75% según la ficha técnica de la fabricante mostrada en el anexo 5. En este proceso se tienen dos entradas al sistema, una entrada de energía la cual es producida por la instalación solar fotovoltaica

(6785,64 MWh/año) y la entrada de agua correspondiente a 1.270,6 m<sup>3</sup>/año (ver tabla 8). En el proceso se producen 128,04 toneladas de Hidrógeno según lo establecido en la sección 6.3.2 y la ficha técnica del electrolizador (anexo 5).

Al separarse el hidrógeno de las moléculas de agua, se tiene una producción derivada de oxígeno de 1.023,27 toneladas al año correspondiente al 88,8% del total del agua que reaccionó, y se tiene unas 119,29 toneladas de agua que no reaccionó, gases residuales y fugas (ver anexo 5).

#### Producción de Nitrógeno (bloque 3)

El tercer proceso, es la producción de nitrógeno en el cual se tienen dos entradas, una de energía y una de masa; la entrada de energía es de 130,06 MWh/año para el correcto funcionamiento de los equipos de separación de aire, energía producida por la instalación solar, así mismo como fuente de entrada de masa se usa el aire en este proceso y corresponde a 725,64 t/año de Aire, y se producen 549 t/año de Nitrógeno (ver tabla 11).

Este proceso cuenta una eficiencia del 96% en la conversión, del total del aire que entra al proceso, se separará entre nitrógeno y oxígeno, 147,64 t/año de oxígeno derivado se producen y solo 29 toneladas se convertirán en dióxido de carbono por impurezas en el aire, vapor de agua y otros gases presentes en el aire (según ficha técnica anexo 6).

#### Producción de amoníaco (bloque 4).

Finalmente, en el proceso de producción de amoníaco, se tiene como entrada de energía 442,54 MWh/años producidos por la instalación solar, En cuanto a la masa, las entradas serán el hidrógeno y nitrógeno producidos en etapas anteriores, el 97% de esta masa se convertirá en amoníaco, el 3% restante corresponde a hidrógeno y nitrógeno que no reaccionaron en el proceso y corresponden alrededor de 3,72 y 16,98 toneladas al año

respectivamente. En total se espera producir una cantidad de 697,74 toneladas al año de amoníaco.

El proceso suele tener eficiencias entre 50% y 60% (ver sección 4.5.4) teniendo en cuenta que se debe reciclar el nitrógeno e hidrógeno que no reaccionan en primera instancia, también se tienen pérdidas por resistencia eléctrica y calor debido a las altas temperaturas requeridas en el proceso. Estos compuestos que no reaccionan vuelven a la entrada del proceso de síntesis, por lo cual se espera que entre 177-221 MWh de energía se pierdan en reconversiones de los compuestos, compresión y descompresión de gases.

A continuación, se muestra el diagrama de balance de masa y energía, el cual permitirá visualizar lo anteriormente dicho:

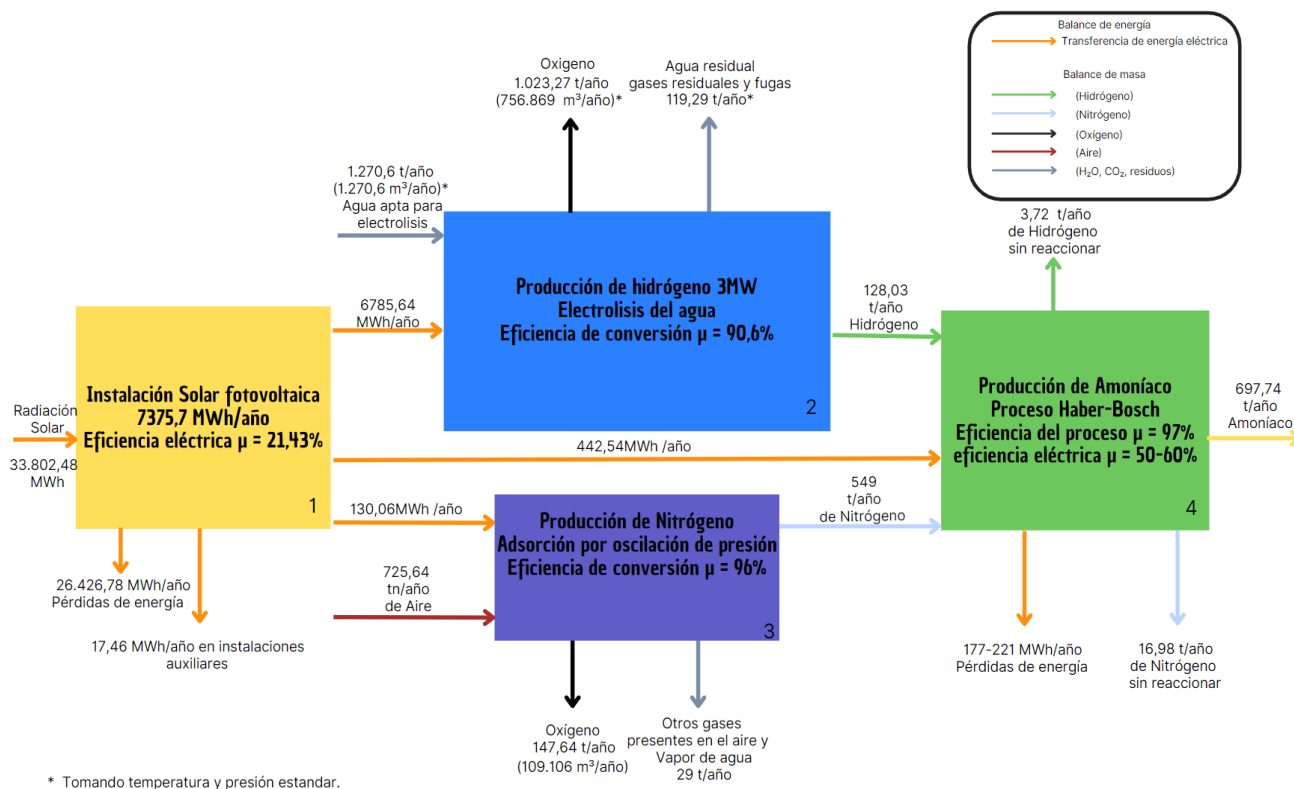


Figura 13: Balance de energía y masa general de los procesos. Elaboración propia.

#### 6.4.1 Balance de energía de la planta solar fotovoltaica.

La planta solar fotovoltaica está compuesta de tres etapas principales, la primera es el generador, encargado de convertir la radiación solar en energía eléctrica en corriente continua. La segunda etapa es la de inversión, encargada de poner a oscilar la corriente continua en valores comerciales, para este caso 60 Hz a 800 Vca. Y finalmente la etapa de transformación, encargada de transformar la tensión a valores requeridos y así alimentar los demás equipos de la planta de producción de amoníaco.

En la figura 14 se observa el balance de energía anual, donde, en la primera etapa se percibe un total 33.802,48 MWh proveniente de la radiación solar, sobre el área de 19.917  $m^2$  que ocupan los módulos solares, ver sección 4.2 del anexo 4, y el generador solar con su eficiencia de 21.82%, ver anexo 1, genera 7.532,376 MWh, a su vez, en su proceso cuenta con pérdidas de 582.680 MWh debidas a suciedad, degradación, calidad, mismatch y calentamiento en los cableados solares.

En la segunda etapa de conversión, la entrada total proveniente del generador fotovoltaico es de 7.532,376 MWh por año, en esta etapa existen pérdidas por calor en los cableados AC de 16.380 kWh y por eficiencia del equipo de 72.960 kWh, ver anexo 2. Finalmente, en la etapa tres, las pérdidas se dan en la etapa de transformación, que de acuerdo con anexo 3, las pérdidas en el transformador son de 69.065 kWh. Dando como resultado 7375,7 MWh, como se observa en la sección 4.5 del anexo 4.

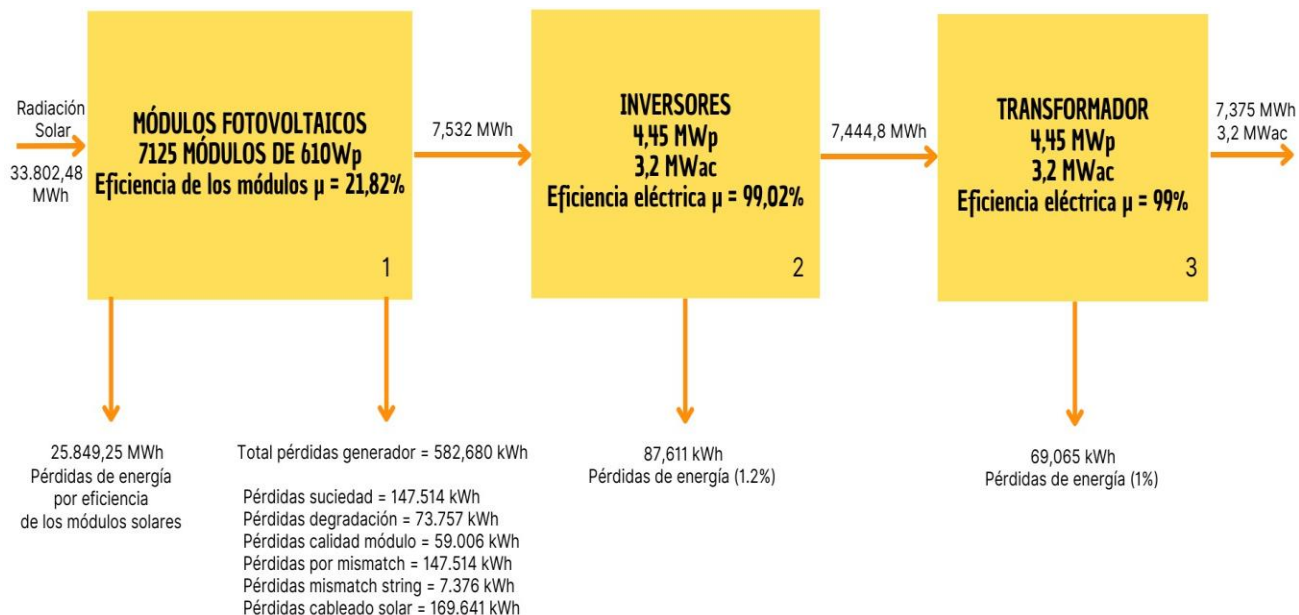


Figura 14: Balance de energía de la instalación fotovoltaica. Elaboración propia.

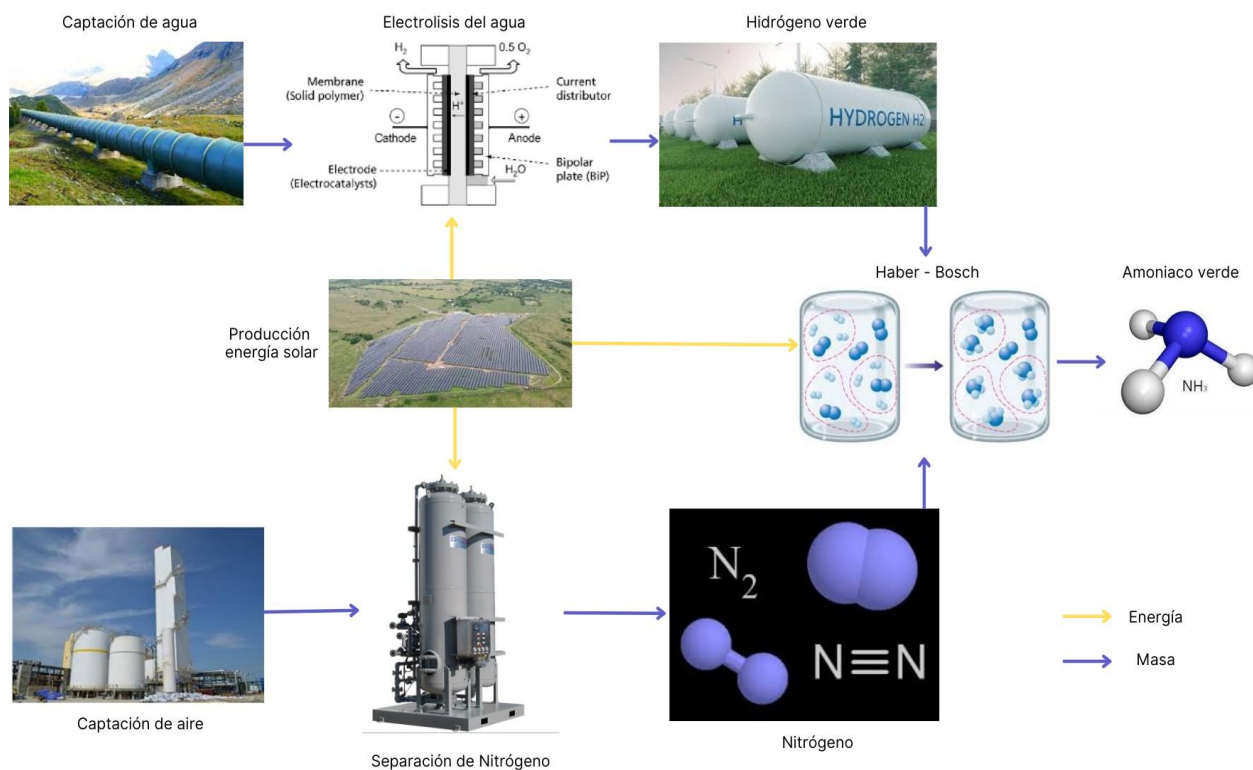


Figura 15: Esquema simplificado de todo el proceso. Fuente: Elaboración propia.

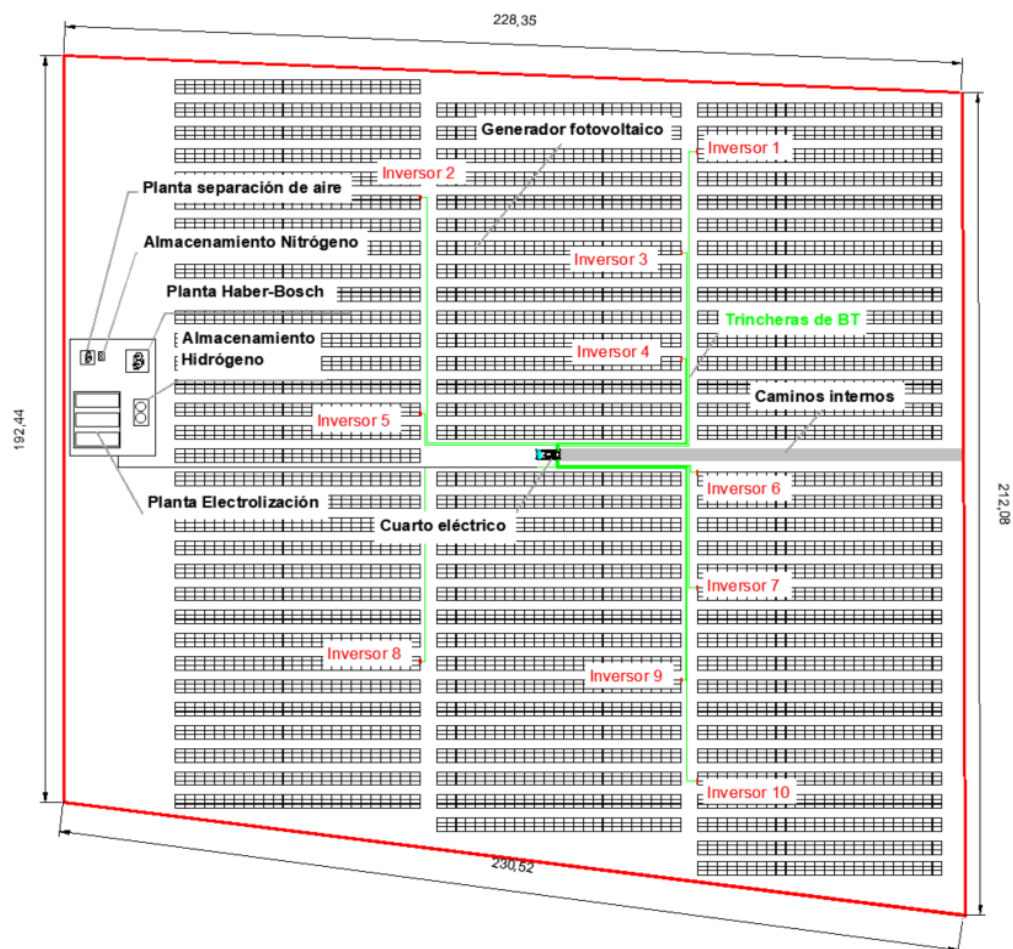


Figura 16: Layout simplificado de todo el proceso.

En la tabla 11 se muestran las cantidades de los equipos principales de la planta de amoníaco, los precios son de mercado y puestos en el lugar del proyecto. En el anexo 7 se presenta el desglose completo y detallado de todos los insumos y cantidades para la construcción de la planta de amoníaco verde en la ciudad de Duitama, Boyacá.

La disposición de equipos de la planta de amoníaco verde se observa en la figura 16, donde se ven los principales equipos dentro del polígono disponible. La planta solar fotovoltaica, la planta de producción de amoníaco proceso Haber-Bosch, separación del nitrógeno del aire y la planta de electrolización, así como los tanques de almacenamiento de nitrógeno y de hidrógeno. En la tabla 11 se pueden ver las cantidades de equipos principales de la planta, en el anexo 7 se observa el desglose completo.

*Tabla 11: Cantidades de equipos principales planta amoníaco verde.*

Item	Equipos principales	Unidad de referencia	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Pre-impuestos	Impuestos	Precio Final		
1	<b>Planta Fotovoltaica</b>									
1.1	Módulos FV	Cantidad de módulos	7.961	Módulos	160	\$/Módulos	1.273.709	\$ 0%	1.273.709	\$
1.2	Inversor tipo String	Inversores tipo String	10	Inversor String	7.500	\$/Inversor String	75.000	\$ 0%	75.000	\$
1.3	Estructuras fijas	Estructura 3H27	4.497.000	Potencia pico	0,070	\$/Potencia pico	314.790	\$ 0%	314.790	\$
1.4	Estaciones de media tensión	Potencia pico Nominal	3.200	kWp	40	\$/kWp	128.000	\$ 0%	128.000	\$
2	<b>Hidrógeno</b>									
2.1	Electrolizador	Cantidad de electrolizadores	3	Unidad modular	3	\$/Unidad modular	1.170.000	\$ 0%	1.170.000	\$
2.2	Stack	Cantidad de stacks	3	Stacks	3	\$/Stacks	400.000	\$ 0%	400.000	\$
2.3	Tanques de almacenamiento	Cantidad de tanques	1	Unidad tanques	1	\$/Unidad tanques	40.000	\$ 0%	40.000	\$
2.4	Instalaciones auxiliares hidrógeno	Global	1	Unidad	1	\$/Unidad	150.000	\$ 0%	150.000	\$
3	<b>Amoniaco y Nitrógeno</b>									
3.1	Reactor, intercambiador de calor y condensador	Cantidad de electrolizadores	1	Unidad	1	\$/Unidad	820.000	\$ 19%	975.800	\$
3.2	Instalaciones auxiliares amoníaco	Cantidad de stacks	1	Global	1	\$/Global	200.000	\$ 0%	200.000	\$
3.3	Unidad PSA	Cantidad de tanques	1	Unidad	1	\$/Unidad	50.000	\$ 19%	59.500	\$
3.4	Instalaciones auxiliares nitrógeno	Potencia pico Nominal	1	Global	1	\$/Global	150.000	\$ 19%	178.500	\$

*Fuente: Elaboración propia. anexo 7.*

## 6.6 Cálculo del LCOH, LCOE y LCOA.

De acuerdo con las consideraciones técnicas de la planta de producción de amoníaco verde en Duitama, se calcula el costo nivelado de la energía LCOE, costo nivelado del hidrógeno LCOH y costo nivelado del amoníaco LCOA, además, teniendo en cuenta los valores del anexo 7.

Según el Departamento Nacional de Planeación de Colombia para el año 2022 sugiere una tasa de descuento (es la tasa de interés que sirve para calcular el valor que tienen hoy una serie de ingresos que serán recibidos más adelante), para proyectos con vida útil entre 6 y 25 años es de 6,4%, sin embargo, se decide realizar el cálculo con 8% como medida conservadora [65]. El valor de CAPEX ha sido el obtenido del anexo 7, el valor de OPEX se considera 2% como un valor típico usado en plantas fotovoltaicas de este tamaño, y de acuerdo con [66], y los datos de producción de energía se tomaron a partir de simulación en PVSyst, ver anexo 4, con vida útil de la planta de 25 años. Adicional con una tasa de descuento de 8%.

El cálculo de LCOE se realizó a partir de la formulación presentada en la sección 5.4, y con los datos de la tabla 12, para una planta de 3,2 MWac en Duitama es de 34,39 USD/MWh o 0,0344 USD/kWh, ver datos anexo 8. Estando este valor por debajo de los rangos de las referencias comparadas de IEA [67] y EIA [68].

*Tabla 12: Parámetros para calcular LCOE.*

Parámetro	Valor	Unidades
Capacidad instalada	4346	kWp
CAPEX	530,37	USD/kW
OPEX	46.099	USD/kW
Construcción	1	Años
Vida útil	30	Años
Factor de descuento	8	%

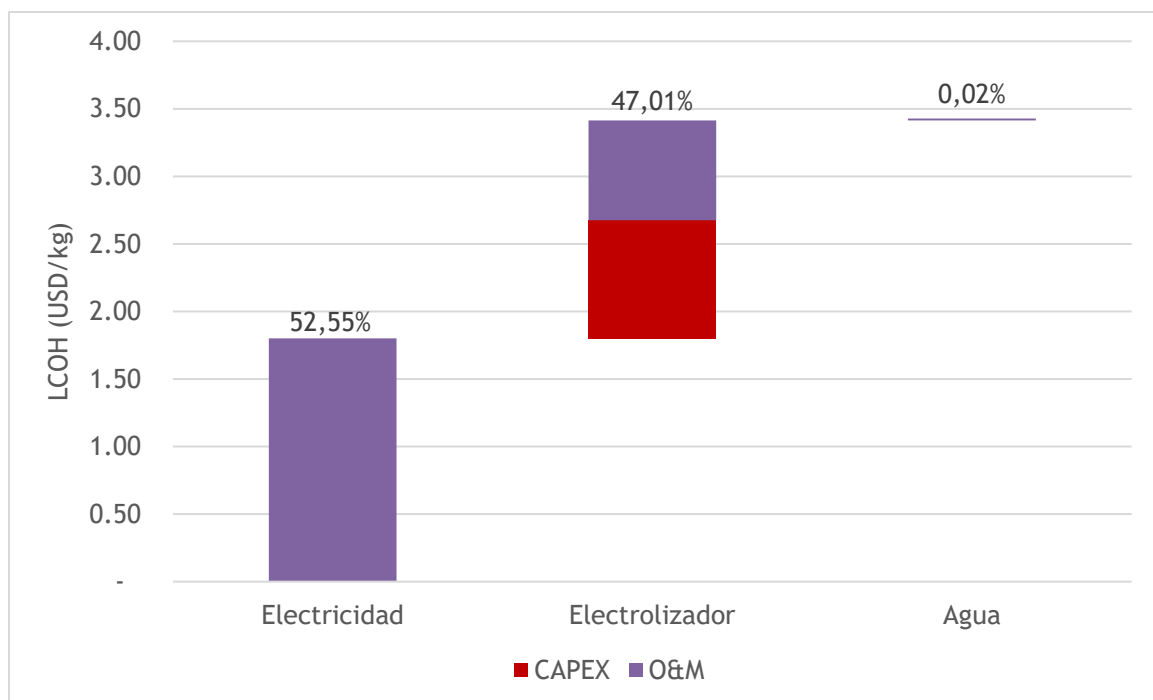
*Fuente: elaboración propia.*

El cálculo de LCOH se realizó a partir de la formulación presentada en la sección 5.4 y va ligado al valor del LCOE y a los valores de CAPEX mostrados como adjunto en el anexo 7, así mismo se consideró un OPEX de 4% del CAPEX total anual [69]. Se realizó teniendo en cuenta un factor de descuento de 8%, de acuerdo con el DNP [65], un factor de carga para el electrolizador de 90%, un costo de agua de 1 USD por metro cúbico, y un consumo de agua de 0,026 metros cúbicos por cada kilogramo de hidrógeno. Para el cálculo se toman los valores de las tablas 12 y 13, dando como resultado 3,43 USD/kg H<sub>2</sub>. Un valor dentro de los rangos del precio para el año 2023, comparado con lo proyectado en la hoja de ruta de hidrógeno en Colombia [70], Este valor **no** considera el transporte de hidrógeno, este costo puede hasta duplicar el valor del LCOH. En la figura 17 se puede evidenciar el porcentaje de cada variable al costo total del valor de LCOH.

*Tabla 13: Parámetros para calcular LCOH.*

Parámetro	Valor	Unidades
Capacidad instalada	3	MW
CAPEX	1000	USD/kW
OPEX	4%	USD/kW
Construcción	1	Años
Vida útil	30	Años
Factor de descuento	8	%

*Fuente: elaboración propia.*



*Figura 17: Porcentajes componentes LCOH. Elaboración propia.*

En la figura 18 se observan las proyecciones del LCOH gris y azul en Colombia desde el 2020 hasta el 2050 según el gobierno nacional. Además, en la figura 18 se pueden observar las proyecciones del LCOH verde en varias regiones de Colombia para los años 2020, 2030, 2040 y 2050.

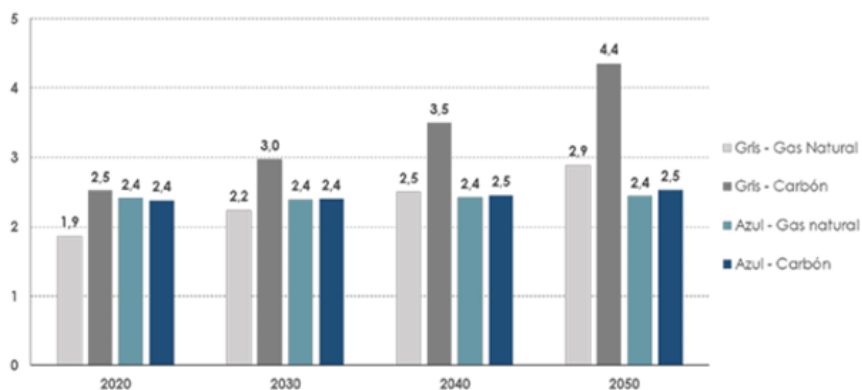


Figura 18: Proyecciones de LCOH gris y azul a partir de gas natural y carbón [69]

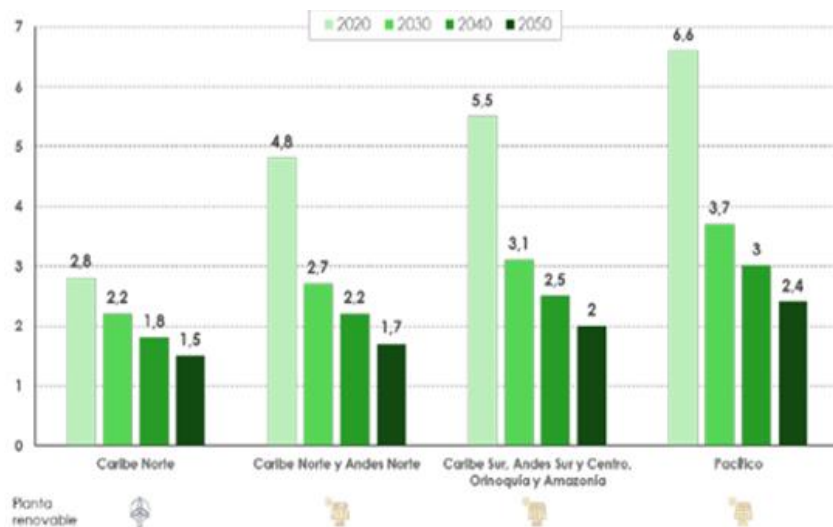


Figura 19: LCOH verde con factor de capacidad renovable moda en las distintas regiones [69]

El cálculo de LCOA se realizó a partir de la formulación presentada en la sección 5.4, y teniendo en cuenta que los valores de LCOE y LCOH calculados y los valores de las tablas 11, 12, 13 y 14, que están dentro de los rangos de proyecciones de IRENA [71], el resultado es de 11.067,13 USD/ t NH<sub>3</sub> para la planta de producción de 697,74 toneladas métricas de amoníaco al año. Este resultado está por encima de las proyecciones hasta el año 2050 que realizó IRENA [72], donde proyecta un precio entre 500 y 800 dólares por tonelada métrica para el rango entre los años 2020 y 2030. El costo total de la inversión es de \$8'721.597 USD, que incluyen el proceso de Haber-Bosch, el sistema de separación de

aire, y equipos auxiliares relacionados con la síntesis de amoníaco. El costo asociado a operación y mantenimiento son de \$86.236 USD, que representan un 1% de la inversión inicial.

*Tabla 14: Parámetros para calcular LCOA.*

Parámetro	Valor	Unidades
CAPEX	12500	USD/tM/año
OPEX	125	USD/tM/año
Construcción	1	Años
Vida útil	30	Años
Factor de descuento	8	%

*Fuente: elaboración propia.*

### **6.7 Viabilidad económica de la planta de producción de amoníaco verde en Duitama**

De acuerdo con los valores actuales de LCOE, LCOH y LCOA se realizó un flujo de caja, teniendo en cuenta los incentivos de la ley 1715 y ley 2099 para fuentes no convencionales de energía renovables y proyectos de hidrógeno respectivamente, desde el punto de vista de inversión. Tarifa general de impuesto de renta de 35% [72]. Degradación anual de la planta de 0.5% y una indisponibilidad de la planta del 2% por año como valor conservador, y precio de venta en la región LATAM por tonelada de amoníaco de 460USD/t NH<sub>3</sub> según datos promedio del año 2019 y lo que va corrido del 2023 [73].

Para realizar el flujo de caja se tomaron los costos de la tabla 15. El CAPEX es la inversión inicial de toda la planta de producción de amoníaco, compuesta de: separación del nitrógeno del aire, proceso Haber-Bosch, etapa de producción de hidrógeno y finalmente la etapa de producción de energía eléctrica con la planta solar fotovoltaica. En la tabla 16 se presenta el flujo de caja correspondiente a los primeros 30 años, siguiendo la formulación de *FCN*, que se muestra a continuación:

$$FCN = \text{Ingreos totales} - \text{Gastos totales}$$

$$FCN = (A_t * P - OPEX) * (1 - I_R) * Indisponibilidad * Degradación$$

Donde:

- $A_t$  es la cantidad total de producción anual de amoníaco en toneladas métricas
- $P$  es el precio de venta promedio entre año 2019 y 2023 en la región LATAM (estos años para evitar las contingencias por Covid y la guerra entre Ucrania y Rusia)
- OPEX es el costo operativo anual, 1% del CAPEX de la planta de amoníaco verde
- $I_R$  es el impuesto de renta en Colombia de 35%
- *Indisponibilidad* es el tiempo en que no opera la planta en el año
- Degradación de la planta de amoníaco verde

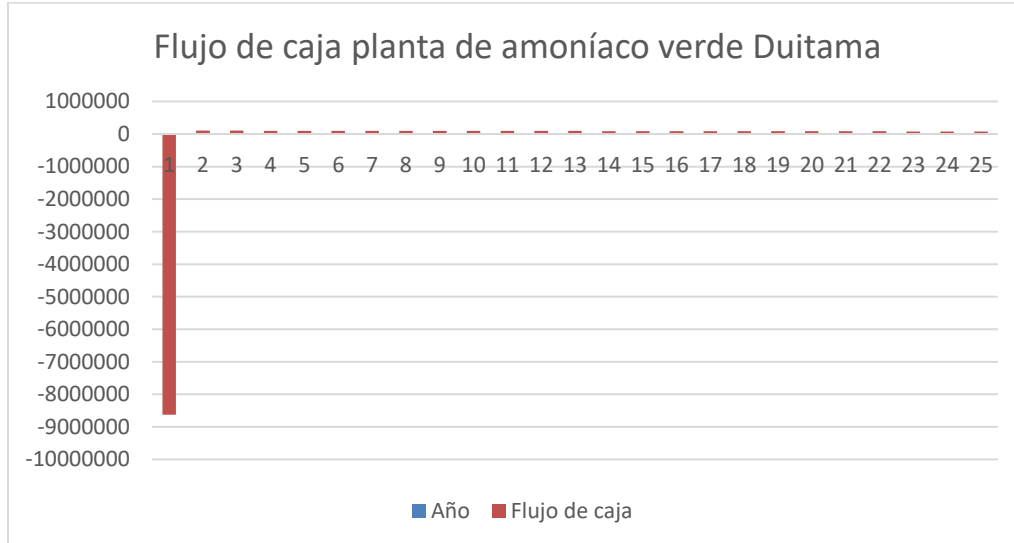


Figura 20: Flujo de caja de planta de amoníaco verde 30 años

Tabla 15: Consideraciones para el flujo de caja.

<b>Producción</b>	697.74	tNH <sub>3</sub>
<b>CAPEX [anexo 7]</b>	8.721.596,92	USD
<b>OPEX [1%CAPEX]</b>	87.215,97	USD
<b>Impuesto de renta [72]</b>	35	%
<b>Degradación anual</b>	1	%
<b>Indisponibilidad planta</b>	2	%
<b>Precio de venta [73]</b>	460	USD/tNH <sub>3</sub>

Fuente: anexo 7, [71], [72].

Tabla 16: Flujo de caja de la planta de producción de amoníaco verde Duitama.

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
\$ -	\$ 147,406.25	\$ 146,661.77	\$ 145,917.30	\$ 145,172.82	\$ 144,428.35	\$ 143,683.87	\$ 142,939.39
Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
\$ 142,194.92	\$ 141,450.44	\$ 140,705.97	\$ 139,961.49	\$ 139,217.01	\$ 138,472.54	\$ 137,728.06	\$ 136,983.59
Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23
\$ 137,728.06	\$ 136,983.59	\$ 136,239.11	\$ 135,494.63	\$ 134,750.16	\$ 134,005.68	\$ 133,261.21	\$ 132,516.73
Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30	
\$ 131,772.25	\$ 131,027.78	\$ 130,283.30	\$ 129,538.83	\$ 128,794.35	\$ 128,049.87	\$ 127,305.40	

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo que se puede observar del flujo de caja en la figura 20 y en la tabla 16, en donde se ha proyectado hasta el año 30, siendo la vida útil que desde un comienzo de este análisis se planteó. Los primeros flujos de caja positivos se comienzan a percibir hasta el año 53 de operación de la planta, siendo un período de retorno de la inversión muy alto, teniendo en cuenta que para producción de amoníaco verde a partir de biomasa y con costo de LCOA de 450 dólares por tonelada tiene un retorno de la inversión de 6 años [74] o de 7 años con otras fuentes de generación de energía eléctrica como solar

y eólica a gran escala [75]. Es importante destacar que en este análisis no se han tenido en cuenta los costos relacionados con el reemplazo de piezas ni la posibilidad de realizar ajustes parciales o totales en las instalaciones de la planta.

A partir de la metodología de cálculo de la sección 5.4, el resultado del valor presente neto de este proyecto en 30 años que se proyecta de la vida útil resultó -\$ 6.623.642,44 USD, donde el valor representa las pérdidas de invertir en este proyecto. La tasa interna de retorno resultó -5,44%, resultando que el flujo de caja de cada año proyectado no será suficiente para compensar la inversión inicial, resultando ser una inversión no viable o no recomendable en este momento para invertir.

## **Capítulo 7**

### **CONCLUSIONES**

El proceso de producción de hidrógeno y de generación fotovoltaica ofrecen una amplia gama de aplicaciones que van más allá de ser sólo combustible para vehículos o generar energía eléctrica, ya que puede ser utilizado como materia prima para procesos tales como, la producción de amoníaco, convirtiéndose en una solución tecnológicamente viable, la cual se encuentra en una curva de aprendizaje.

A partir del análisis llevado a cabo, se puede indicar, que, la generación de este proceso implica una inversión económica superior al beneficio resultado de la venta de este insumo en la región estudiada. Empero, el análisis se realizó con ningún beneficio tributario, por la venta de amoníaco verde, en la medida en que, a la fecha, Colombia no cuenta con legislación que incentive la inversión en este campo.

Tras el estudio del área seleccionada, cerca del 89% se destinó para la generación de energía solar fotovoltaica, el 3% para los procesos de electrolización, separación de nitrógeno del aire y de Haber-Bosch y el 8% restante para la adecuación de caminos, parqueaderos, zonas comunes, etc; de esto se concluyó, que esta forma de generación de energía eléctrica requiere grandes áreas. Por ello, para optimizar el tamaño total de la planta, se pueden estudiar la implementación de otras tecnologías con bajas emisiones de GEI como biomasa, eólica o hídrica.

Gracias a la selección de equipos para todos los procesos envueltos en la producción de amoníaco verde, se puede concluir que existen diferentes tecnologías para este tipo de proyectos y que cada fase se puede optimizar desde el punto de vista económico y estructural.

A lo desarrollado en la sección 6, se pudo establecer, que el costo nivelado del hidrógeno depende fuertemente del costo de la energía necesaria para su producción,

representando el 52,5% del total, de modo que, entre más abundante sea el recurso solar, la producción de amoníaco resulta cada vez más económica y llamativa financieramente.

Los indicadores financieros analizados, muestran, el retorno de la inversión de este proyecto en 53 años, TIR de -4,52% y VPN de - \$6.368.599,55. Aspectos que denotan la no viabilidad económica del proceso planteado en este momento, sin embargo, se rescata que existen diferentes formas para la producción de amoníaco con bajas emisiones de GEI. Por lo que la viabilidad tecnológica resulta un gran avance para esta propuesta a futuro.

La eficiencia de la conversión fotovoltaica, que es del 21,82%, representa una de las principales limitaciones en la eficiencia global, aun así, la eficiencia es estándar con respecto a las tecnologías comerciales disponibles. Aunque la electrólisis del agua tiene una eficiencia relativamente alta (75%), la cantidad de energía solar que se convierte en electricidad utilizable limita la cantidad total de hidrógeno que se puede producir.

El proceso de Haber-Bosch, aunque eficiente en sí mismo (97%), requiere altas temperaturas y presiones, lo que implica un consumo energético adicional. Aunque parte de esta energía se recupera a través de la recuperación de calor, todavía hay pérdidas energéticas significativas en esta etapa.

## REFERENCIAS

- [1] Opeyemi A., Sharif F., Bing N. (2023). Green ammonia production technologies: A review of practical progress. p. 1-2.
- [2] IRENA. (2022). Innovation outlook ammonia. p. 25-26.
- [3] IRENA. (2022). Innovation outlook ammonia. p 25.
- [4] IRENA. (2022). Innovation outlook ammonia. p. 21. p. 2
- [5] The Royal Society. (2021). The role of hydrogen and ammonia in meeting zero challenge.
- [6] IDEAM y PNUD. (2015). Inventario nacional de gases de efecto invernadero (GEI) Colombia. p. 24.
- [7] Organization for economic Co-operation and Development. (2023). OECD Statics Greenhouse gas emissions. Recuperado de: [stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=air-ghg](https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=air-ghg)
- [8] IEA. (2022). Global Hydrogen review. p. 7-8.
- [9] IAE. (2019). The future of hydrogen. p. 45
- [10] Ministerio de agricultura. (2021). Informe de rendición de cuentas. p. 10-11.
- [11] Ministerio de agricultura. (2021). Informe de rendición de cuentas. p. 14.

- [12] Gobierno nacional de Colombia. Plan de Desarrollo nacional (2022-2026). (2023). p. 123-163.
- [13] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (2020). Trends in global  $\text{CO}_2$  and total greenhouse gas emissions.
- [14] Solargis. Mapa de recurso solar. Recuperado de: <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/colombia>.
- [15] Atlas interactivo del IDEAM. Recuperado de: [www.atlas.ideam.gov.co](http://www.atlas.ideam.gov.co)
- [16] IPCC. Climate change. (2013). p.
- [17] Gobierno Nacional de Colombia. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia. p 6-7.
- [18] Mordor intelligence. Mercado de amoníaco: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronósticos (2023 - 2028), 2021.
- [19] Li Y., Ding X., Li C., & Ye X. (2020). Effects of Ammonium and Nitrate Nitrogen on Nitrogen Assimilation and Accumulation in Tomato Seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11, 494. doi: 10.3389/fpls.2020.00494
- [20] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). FAOSTAT Database.
- [21] IAE (2022) Ammonia technology roadmap. p. 15-16.

- [22] Ju X., Xing G, Chen X., Zhang S., Zhang L., Liu X., & Zhang Y. (2009). Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. Proceedings of the National Academy of Sciences.
- [23] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. (2019). Ammonia. Wiley-VCH.
- [24] Proyecto Yara en Australia. Recuperado de: <https://www.yara.com.au/about-yara/about-yara-australia/pilbara/>.
- [25] Proyecto de hidrógeno verde en Puertollano. Recuperado de: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/puertollano-planta-hidrogeno-verde>
- [26] Planta de producción de amoníaco verde en Barranquilla, Monómeros. Recuperado de: <https://h2lac.org/noticias/barranquilla-firma-alianza-con-empresa-para-producir-amoníaco-verde/>
- [27] Modern Chemical Technology and Emission Control M.B.Hocking, Ed. Springer Verlag (1984).
- [28]. Portafolio. (2022, mayo 5). A abril, importación de fertilizantes subió 197%. Recuperado de: [www.portafolio.com.co](http://www.portafolio.com.co)
- [29]. OEC World. (2020). Datos de importación de Colombia en 2020.
- [30] School of international and public affairs. (2019). p. 30.
- [31] EMR. (2022). Global ammonia market outlook. p. 31.
- [32] EMR. (2022). Global ammonia market outlook. p. 32.

[33] Russian gas chemical projects. Recuperado de:  
<https://www.reuters.com/business/energy/russian-gas-chemical-projects-face-delays-after-foreign-partners-exit-cbank-2022-12-13/>

[34] Greenfield nitrogen to build in region. Recuperado de:  
<https://www.feedstuffs.com/agribusiness-news/greenfield-nitrogen-to-build-regional-iowa-ammonia-plant>

[35] Fertilizers production to farmers. Recuperado de:  
<https://www.dailynewsegypt.com/2021/12/28/kima-2-plant-provides-55-of-its-fertilizers-production-to-farmers/>

[36] Earnshaw, A. (1997). Chemistry of the Elements. Oxford, Reino Unido: Elsevier.

[37] Modern Chemical Technology and Emission Control M.B.Hocking, Ed. Springer Verlag (1984).

[38] Elvira Spatolisano, Laura A. Pellegrini, Haber-Bosch process intensification: A first step towards small-scale distributed ammonia production, Chemical Engineering Research and Design, Volume 195, 2023.

[39] Nick Ash Ricardo Energy & Environment Tim Scarbrough Ricardo Energy & Environment ©, Sailing on Solar Could green ammonia decarbonise international shipping? 2019 Environmental Defense Fund Europe Ltd.

[40] IRENA. Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. (2022).

[41] Métodos amigables de producción de hidrógeno, como fuente de energía limpia, Diego Venegas, Manuel Meléndrez, Santiago Celi, César Ayabaca, 2016, La Plata, Argentina.

- [42] The world Bank, Solar resource data from Solargis.
- [43] Office of energy efficiency & renewable energy, hydrogen production: electrolysis, 2023.
- [44] IRENA. (2022). World energy transition outlook 2022. p. 61.
- [45] IRENA. (2022). World energy transition outlook 2022. p. 61.
- [46] IRENA. (2022). World energy transition outlook 2022. p. 61.
- [47] IRENA. (2022). World energy transition outlook 2022. p. 61.
- [48] Tiwari G. (2012). Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications. p 6-10.
- [49] Duffie J., & Beckman W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley. p. 2-3.
- [50] Garg H., & Prakash J. (2015). Renewable Energy Sources and Emerging Technologies. p. 3-8.
- [51] Garg H., & Prakash J. (2015). Renewable Energy Sources and Emerging Technologies. p. 9-11.
- [52]. Jinko solar, p-type/n-type solar module. 2023. Recuperado de: [www.jinkosolar.com](http://www.jinkosolar.com)
- [53] Sungrow power supply. Inversor string SG350HX e inversor central modular 1+X. (2023). Recuperado de: [www.support.sungrowpower.com](http://www.support.sungrowpower.com)

- [54]. Ramírez-Valencia R., & Rosales-Asensio E. (2020). Assessing Solar Energy Potential in Colombia Using Geostatistical Interpolation Techniques. p16-18.
- [55]. Análisis de Viabilidad: La cenicienta en los Proyectos de Inversión, Francisco Santiago Sobrero FCE –UNL, abril de 2009.
- [56]. Arias D, Gavela P, Cruz L and Izquierdo P (2022). Sensitive análisis for levelized costo f electricity – LCOE with multi-objective optimization. p.4.
- [57]. Eajeevkumar R, Chandly A, Sumaiti A and Mayyas A. (2023). Techno-economic analysis of green hydrogen as an energy-storage medium for commercial buildings. p. 97.
- [58]. Nayak R, Bañares R, Wilkinson I (2018). “Green” Ammonia: Impact of renewable energy intermittency on plant sizing and levelized cost of ammonia.
- [59] Google earth pro. Duitama Boyacá.
- [60] Google earth pro. Polígono planta de producción de amoníaco verde.
- [61] Jana, A. K. (2016). Industrial Gas Handbook: Gas Separation and Purification. CRC Press.
- [62] Arzad A, Hannan M, Al-Shetwi A, Hossain M, Begum R, Jern P, Salehi F, Muttaqi K. (2023). Hydrogen electrolyser for sustainable energy production: A bibliometric analysis and future directions.
- [63] Carmoc. M. (2022). Electrolysis for Hydrogen Production: An Introduction

[64] Hao Q, Liu C, Wang Y, Aradiyan H, Wei W, Jie B. (2020). Catalytic reduction of nitrogen to produce ammonia by bismuth-based catalysts: state of the art and future prospects

[65] Departamento Nacional de Planeación. Tasa social de descuento para proyectos de inversión. (2019)

[66] Egli F, Steffen B, Schmidt TS. A dynamic analysis of financing conditions for renewable energy technologies. Nat Energy. 2018; 3(12): 1084-1092

[67] IEA. (2022). Analysis and forecast to 2027. p. 154.

[68]. EIA. (2022). Cost and performance characteristics of new generating technologies, annual energy outlook 2022. p. 2.

[69] FRV, 2021, Posibles modelos de negocio para proyectos de hidrógeno verde: Offtakers y aplicaciones del hidrógeno y sus derivados, costos asociados, logística y periodos de construcción, O&M y análisis de casos de éxito de proyectos de hidrógeno verde.

[70] Gobierno Nacional de Colombia. (2021). Hoja de ruta del hidrógeno en Colombia.

[71] IRENA (2020). Power generation cost 2020. p. 47.

[72] LEY 2277 de 2022. Artículo 10.

[73] The observatory of economic complexity (2021). Recuperado de [https://oec.world/es/profile/bilateral-product/ammonia/reporter/col#:~:text=En%202021%2C%20Colombia%20import%C3%](https://oec.world/es/profile/bilateral-product/ammonia/reporter/col#:~:text=En%202021%2C%20Colombia%20import%C3%9)

B3%20%2430%2C4M%20en%20Amon%C3%ADaco%2C%20principalmente,Unidos%20(%242%2C1k).]

[74] Zhang H., Wang L., Van J., Márchal F., Desideri U. (2020). Techno-economic comparison of green ammonia production processes

[75] Ammonia synthesis plant from intermittent renewable energy (ASPIRE). (2022). p 19-20

## Anexo 2

# SG350HX

Multi-MPPT String Inverter for 1500 Vdc System



### HIGH YIELD

- Up to 16 MPPTs with max. efficiency 99%
- 20A per string, compatible with 500Wp+ module
- Data exchange with tracker system, improving yield

### LOW COST

- Q at night function, save investment
- Power line communication (PLC)
- Smart IV Curve diagnosis, active O&M

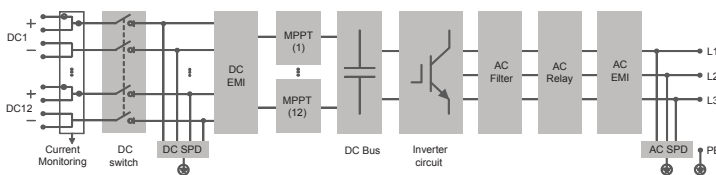
### GRID SUPPORT

- $SCR \geq 1.15$  stable operation in extremely weak grid
- Reactive power response time  $< 30\text{ms}$
- Compliant with global grid code

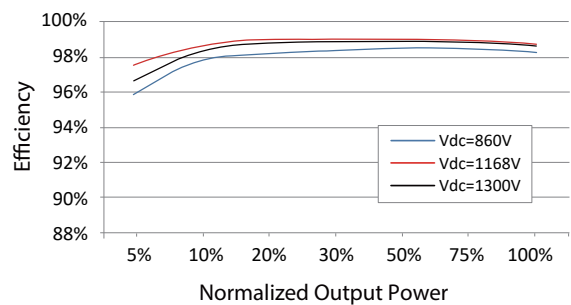
### PROVEN SAFETY

- 2 strings per MPPT, no fear of string reverse connection
- 24h real-time AC and DC insulation monitoring

## CIRCUIT DIAGRAM



## EFFICIENCY CURVE



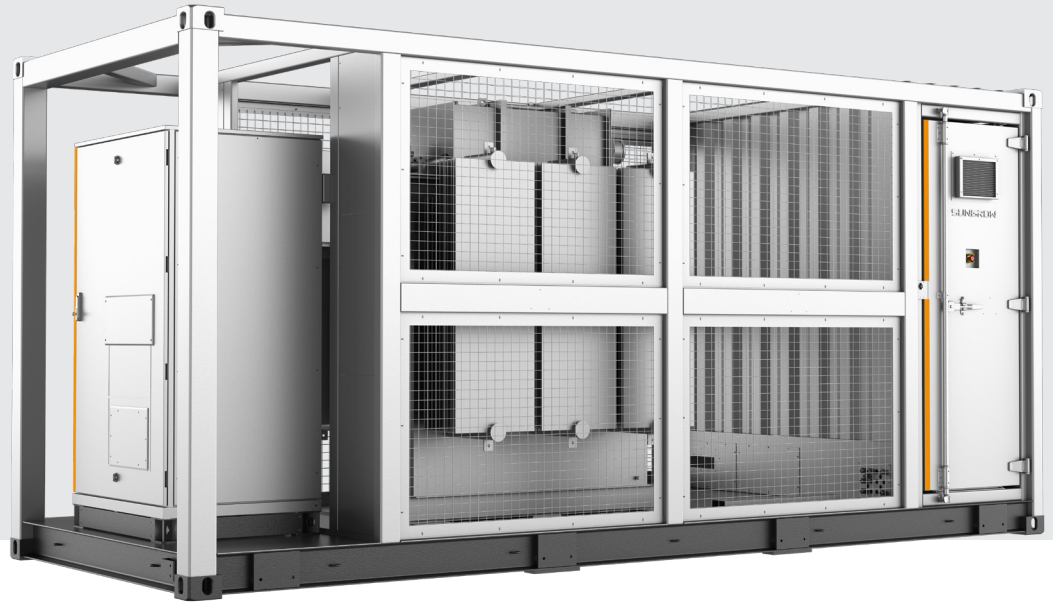
Type designation	SG350HX
<b>Input (DC)</b>	
Max. PV input voltage	1500 V
Min. PV input voltage / Startup input voltage	500 V / 550 V
Nominal PV input voltage	1080 V
MPP voltage range	500 V – 1500 V
No. of independent MPP inputs	12 (Optional: 14 / 16)
Max. number of input connector per MPPT	2
Max. PV input current	12 * 40 A (Optional: 14 * 30 A / 16 * 30 A)
Max. DC short-circuit current per MPPT	60 A
<b>Output (AC)</b>	
AC output power	352 kVA @ 30°C / 320 kVA @ 40 °C / 295 kVA @ 50°C
Max. AC output current	254 A
Nominal AC voltage	3 / PE, 800 V
AC voltage range	640 – 920 V
Nominal grid frequency / Grid frequency range	50 Hz / 45 – 55 Hz, 60 Hz / 55 – 65 Hz
THD	< 3 % (at nominal power)
DC current injection	< 0.5 % In
Power factor at nominal power / Adjustable power factor	> 0.99 / 0.8 leading – 0.8 lagging
Feed-in phases / Connection phases	3 / 3
<b>Efficiency</b>	
Max. efficiency / European efficiency	99.02 % / 98.8 %
<b>Protection</b>	
DC reverse connection protection	Yes
AC short circuit protection	Yes
Leakage current protection	Yes
Grid monitoring	Yes
Ground fault monitoring	Yes
DC switch / AC switch	Yes / No
PV string current monitoring	Yes
Q at night function	Yes
Anti-PID and PID recovery function	Optional
Surge protection	DC Type II / AC Type II
<b>General Data</b>	
Dimensions (W*H*D)	1136 * 870 * 361 mm
Weight*	≤ 116 kg
Isolation method	Transformerless
Degree of protection	IP66
Power consumption at night	< 6 W
Operating ambient temperature range	-30 to 60°C
Allowable relative humidity range	0 – 100 %
Cooling method	Smart forced air cooling
Max. operating altitude	4000 m (> 3000 m derating)
Display	LED, Bluetooth+APP
Communication	RS485 / PLC
DC connection type	MC4-Evo2 (Max. 6 mm <sup>2</sup> , optional 10mm <sup>2</sup> )
AC connection type	Support OT/DT terminal (Max. 400 mm <sup>2</sup> )
Compliance	IEC 62109, IEC 61727, IEC 62116, IEC 60068, IEC 61683, VDE-AR-N 4110:2018, VDE-AR-N 4120:2018, EN 50549-1/2, UNE 206007-1:2013, P.O.12.3, UTE C15-712-1:2013
Grid Support	Q at night function, LVRT, HVRT, active & reactive power control and power ramp rate control, Q-U control, P-f control

\*Due to the multi-supplier for some key components, the actual weight may have a ±8% deviation, please refer to the actually delivered product.

## Anexo 3

# MVS3200/4480-LV

MV Turnkey Solution for 1500 Vdc String Inverter SG350HX



### SAVED INVESTMENT

- Up to 4.48 MW block design
- Easy transportation due to standard container design
- All pre-assembled for easy set-up and commissioning



### SAFETY

- MV and LV isolated, independent control room
- All key components front accessible, no need walk-in operation



### EASY O&M

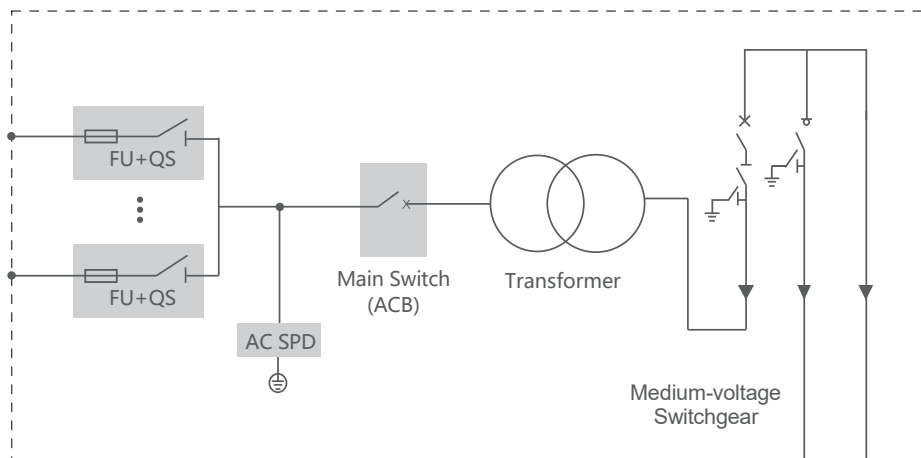
- Online analysis for fast trouble shooting
- Modular design, main device easy replacement



### RELIABLE

- All components type-tested
- Compliance with standards: IEC 60076, IEC 62271, IEC 61439

## CIRCUIT DIAGRAM



Type designation	MVS3200-LV	MVS4480-LV
<b>Transformer</b>		
Transformer type	Oil immersed	
Rated power	3200 kVA @ 40 °C	4480 kVA @ 40 °C
Max. power	3520 kVA @ 30 °C	4928 kVA @ 30 °C
Vector group	Dy11	
LV / MV voltage	0.8 kV / 10 – 35 kV	
Maximum input current at nominal voltage	2540 A	3557 A
Frequency	50 Hz / 60 Hz	
Tapping on HV	0, ± 2 * 2.5 %	
Efficiency	≥99%	
Cooling type	ONAN (Oil Natural Air Natural)	
Impedance	7 % ( ± 10 % )	8 % ( ± 10 % )
Oil type	Mineral oil (PCB free)	
Winding material	Al / Al	
Insulation class	A	
<b>MV switchgear</b>		
Insulation type	SF6	
Rate voltage	24 kV – 36 kV	
Rate current	630 A	
Internal arcing fault	IAC AFL 20 kA / 1 s	
Qty. of feeder	3 feeders	
<b>LV panel</b>		
Main switch specification	4000 A / 800 Vac / 3P, 1 pcs	
Disconnecter specification	260 A / 800 Vac / 3P, 10 pcs	260 A / 800 Vac / 3P, 14 pcs
Fuse specification	400A / 800 Vac / 1P, 30 pcs	400 A / 800 Vac / 1P, 42 pcs
<b>Protection</b>		
AC input protection	FUSE+Disconnecter	
Transformer protection	Oil-temperature, oil-level, oil-pressure	
Relay protection	50/51,50N/51N	
LV overvoltage protection	AC Type II (optional: AC Type I + II)	
<b>General Data</b>		
Dimensions(W*H*D)	6058 mm * 2896 mm * 2438 mm	
Approximate weight	15 T	17 T
Operating ambient temperature range	-20 °C to 60 °C (optional: -30 °C to 60 °C)	
Auxiliary transformer supply	5 kVA / 400 V (optional: max. 40 kVA)	
Degree of protection	IP54	
Allowable relative humidity range (non-condensing)	0 – 95 %	
Operating altitude	1000 m (standard) / > 1000 m (optional)	
Communication	Standard: RS485, Ethernet ; Optional: optical fiber	
Compliance	IEC 60076, IEC 62271-200, IEC 62271-202, IEC 61439-1, EN50588-1	

# PVsyst - Simulation report

## Grid-Connected System

---

Project: Amoniaco verde 3.2MWac

Variant: Amoniaco\_verde\_3.2MWac

Unlimited sheds

System power: 4346 kWp

Duitama - Amoniaco Verde - Colombia



# Project: Amoniaco verde 3.2MWac

Variant: Amoniaco\_verde\_3.2MWac

## PVsyst V7.2.8

VCO, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

### Project summary

**Geographical Site**  
Duitama - Amoniaco Verde  
Colombia

**Situation**  
Latitude 5.78 °N  
Longitude -73.00 °W  
Altitude 2484 m  
Time zone UTC-5

**Project settings**  
Albedo 0.20

#### Meteo data

Duitama - Amoniaco Verde  
Meteonorm 8.0 (2010-2014), Sat=100% - Sintético

### System summary

#### Grid-Connected System

#### PV Field Orientation

Sheds  
tilt 10 °  
azimuth 0 °

#### System information

#### PV Array

Nb. of modules 7125 units  
Pnom total 4346 kWp

#### Unlimited sheds

#### Near Shadings

Mutual shadings of sheds

#### User's needs

Unlimited load (grid)

#### Inverters

Nb. of units 10 units  
Pnom total 3200 kWac  
Pnom ratio 1.358

### Results summary

Produced Energy 7376 MWh/year Specific production 1697 kWh/kWp/year Perf. Ratio PR 89.87 %

### Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Horizon definition	5
Main results	6
Loss diagram	7
Special graphs	8
CO <sub>2</sub> Emission Balance	9

**PVsyst V7.2.8**

VC0, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

**General parameters**

<b>Grid-Connected System</b>		<b>Unlimited sheds</b>			
<b>PV Field Orientation</b>		<b>Sheds configuration</b>		<b>Models used</b>	
Orientation		Nb. of sheds	91 units	Transposition	Perez
Sheds tilt	10 °	Unlimited sheds		Diffuse	Perez, Meteonorm
Sheds azimuth	0 °	<b>Sizes</b>		Circumsolar	separate
		Sheds spacing	5.97 m		
		Collector width	3.44 m		
		Ground Cov. Ratio (GCR)	57.6 %		
		Top inactive band	0.02 m		
		Bottom inactive band	0.02 m		
		<b>Shading limit angle</b>			
		Limit profile angle	13.2 °		
<b>Horizon</b>		<b>Near Shadings</b>		<b>User's needs</b>	
Average Height	5.1 °	Mutual shadings of sheds		Unlimited load (grid)	
<b>Bifacial system</b>					
Model	2D Calculation unlimited sheds				
<b>Bifacial model geometry</b>				<b>Bifacial model definitions</b>	
Sheds spacing	5.97 m	Ground albedo		0.30	
Sheds width	3.48 m	Bifaciality factor		80 %	
Limit profile angle	13.4 °	Rear shading factor		13.2 %	
GCR	58.3 %	Rear mismatch loss		10.0 %	
Height above ground	1.50 m	Shed transparent fraction		0.0 %	

**PV Array Characteristics**

<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	Jinkosolar	Manufacturer	Sungrow
Model	JKM610N-78HL4-BDV	Model	SG350HX-12MPPT
(Custom parameters definition)		(Custom parameters definition)	
Unit Nom. Power	610 Wp	Unit Nom. Power	320 kWac
Number of PV modules	7125 units	Number of inverters	10 units
Nominal (STC)	4346 kWp	Total power	3200 kWac
Modules	285 Strings x 25 In series	Operating voltage	500-1500 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Max. power (=>30°C)	352 kWac
Pmpp	4031 kWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.36
U mpp	1055 V		
I mpp	3823 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	4346 kWp	Total power	3200 kWac
Total	7125 modules	Nb. of inverters	10 units
Module area	19917 m <sup>2</sup>	Pnom ratio	1.36
Cell area	18351 m <sup>2</sup>		



**PVsyst V7.2.8**

VC0, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

**Array losses**

**Array Soiling Losses**

Loss Fraction 2.0 %

**Thermal Loss factor**

Module temperature according to irradiance

Uc (const) 20.0 W/m<sup>2</sup>K

Uv (wind) 0.0 W/m<sup>2</sup>K/m/s

**DC wiring losses**

Global array res. 6.9 mΩ

Loss Fraction 2.3 % at STC

**LID - Light Induced Degradation**

Loss Fraction 1.0 %

**Module Quality Loss**

Loss Fraction -0.8 %

**Module mismatch losses**

Loss Fraction 2.0 % at MPP

**Strings Mismatch loss**

Loss Fraction 0.1 %

**IAM loss factor**

Incidence effect (IAM): User defined profile

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	1.000	1.000	1.000	0.987	0.969	0.929	0.741	0.000

**System losses**

**Unavailability of the system**

Time fraction 0.3 %  
1.1 days,  
4 periods

**Auxiliaries loss**

Proportionnal to Power 1.0 W/kW  
0.0 kW from Power thresh.

**AC wiring losses**

**Inv. output line up to MV transfo**

Inverter voltage 800 Vac tri  
Loss Fraction 0.10 % at STC

**Inverter: SG350HX-12MPPT**

Wire section (10 Inv.) Copper 10 x 3 x 150 mm<sup>2</sup>  
Average wires length 12 m

**MV line up to Injection**

MV Voltage 13.2 kV  
Wires Alu 3 x 120 mm<sup>2</sup>  
Length 156 m  
Loss Fraction 0.10 % at STC

**AC losses in transformers**

**MV transfo**

Grid voltage 13.2 kV

**Operating losses at STC**

Nominal power at STC 4274 kVA  
Iron loss (24/24 Connexion) 4.27 kW  
Loss Fraction 0.10 % at STC  
Coils equivalent resistance 3 x 1.50 mΩ  
Loss Fraction 1.00 % at STC



**PVsyst V7.2.8**

VCO, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

**Horizon definition**

Horizonte del servicio web de Meteonorm, lat=5,781, lon=-72,9979

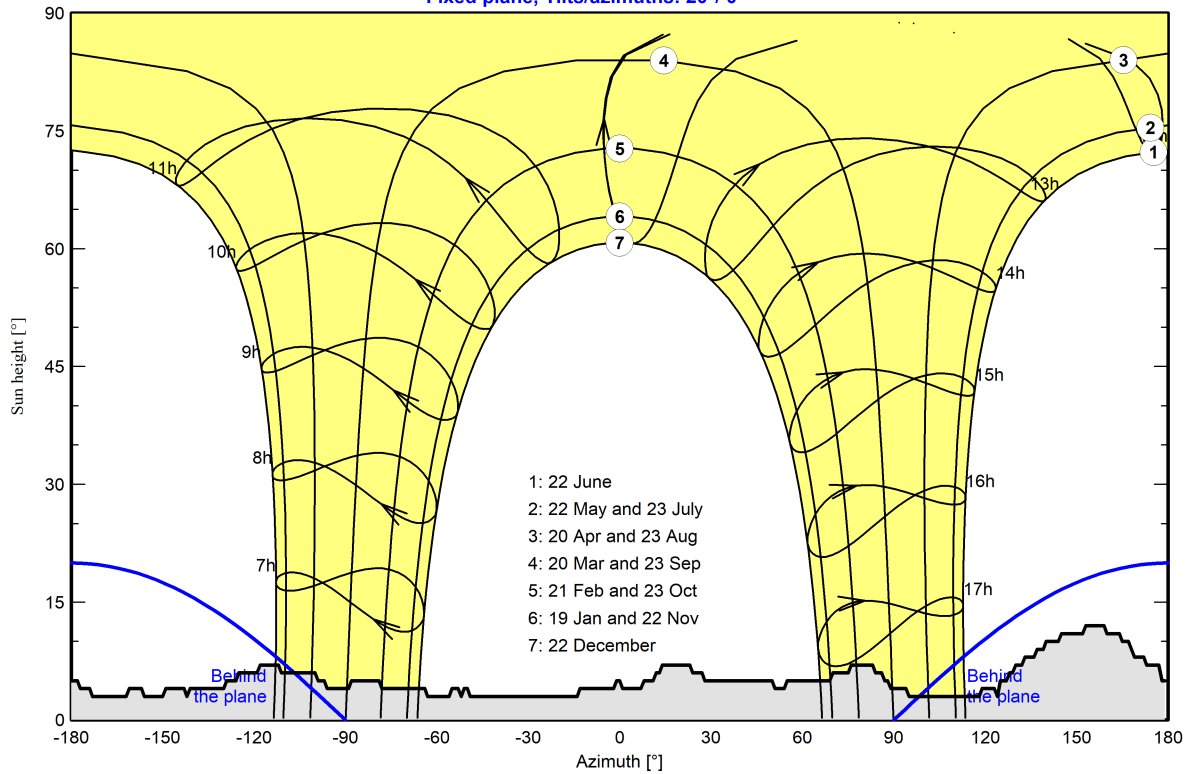
Average Height 5.1 °      Albedo Factor 0.78  
Diffuse Factor 0.99      Albedo Fraction 100 %

**Horizon profile**

Azimuth [°]	-180	-177	-174	-162	-150	-143	-142	-130	-125	-119	-112	-111	-99	-89
Height [°]	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	6.0	6.0	7.0	6.0	5.0	4.0
Azimuth [°]	-88	-78	-64	-56	-52	-51	-49	-14	-2	1	7	11	12	14
Height [°]	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	5.0	6.0	7.0
Azimuth [°]	24	28	50	55	70	75	83	84	88	94	95	119	123	127
Height [°]	6.0	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	4.0	4.0	5.0
Azimuth [°]	129	130	133	136	140	145	152	159	160	167	172	173	178	179
Height [°]	6.0	7.0	8.0	8.0	10.0	11.0	11.0	12.0	11.0	10.0	8.0	7.0	5.0	5.0

**Sun Paths (Height / Azimuth diagram)**

Fixed plane, Tilts/azimuths: 20°/ 0°





**PVsyst V7.2.8**

VCO, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

**Main results**

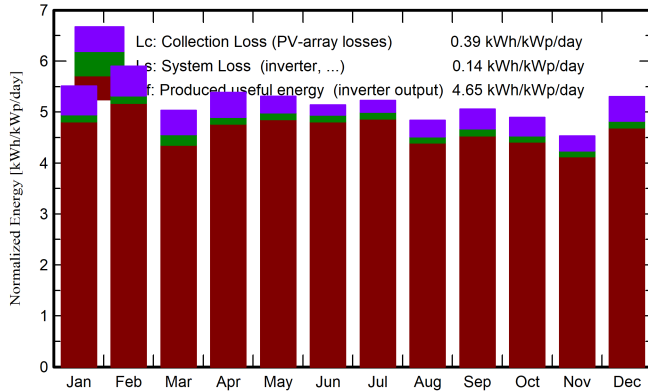
**System Production**

Produced Energy 7376 MWh/year

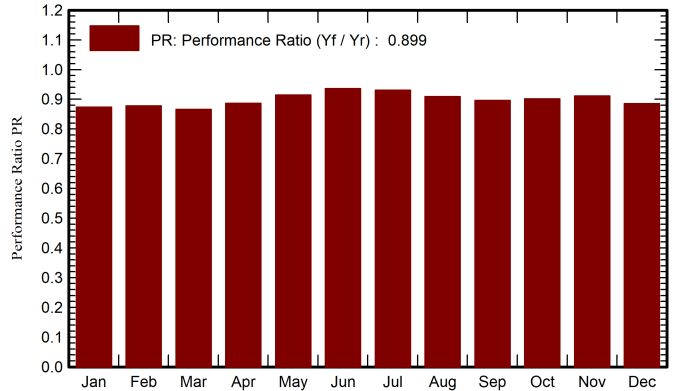
Specific production  
Performance Ratio PR

1697 kWh/kWp/year  
89.87 %

**Normalized productions (per installed kWp)**



**Performance Ratio PR**



**Balances and main results**

	<b>GlobHor</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>DiffHor</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>T_Amb</b> °C	<b>GlobInc</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>GlobEff</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>EArray</b> MWh	<b>E_Grid</b> MWh	<b>PR</b> ratio
<b>January</b>	159.8	66.89	13.70	170.9	166.2	667.0	648.7	0.873
<b>February</b>	157.7	62.80	13.94	165.2	160.1	647.8	630.2	0.878
<b>March</b>	155.1	67.79	14.18	155.9	151.1	614.5	586.7	0.866
<b>April</b>	165.5	67.21	14.17	161.5	156.7	639.4	622.0	0.886
<b>May</b>	174.2	67.06	14.36	164.6	159.6	672.2	654.3	0.915
<b>June</b>	166.2	69.21	13.97	154.2	149.0	644.4	627.6	0.936
<b>July</b>	173.1	73.55	14.10	162.1	156.8	673.7	656.1	0.931
<b>August</b>	155.7	67.93	14.01	150.0	145.1	609.0	592.6	0.909
<b>September</b>	152.5	74.16	13.68	151.8	147.2	609.9	591.3	0.896
<b>October</b>	147.9	79.52	13.87	151.8	147.2	611.1	595.2	0.902
<b>November</b>	129.5	74.23	13.77	135.9	131.7	552.7	538.4	0.911
<b>December</b>	152.1	64.02	13.78	164.4	159.4	649.9	632.5	0.885
<b>Year</b>	1889.5	834.37	13.96	1888.3	1830.1	7591.5	7375.7	0.899

**Legends**

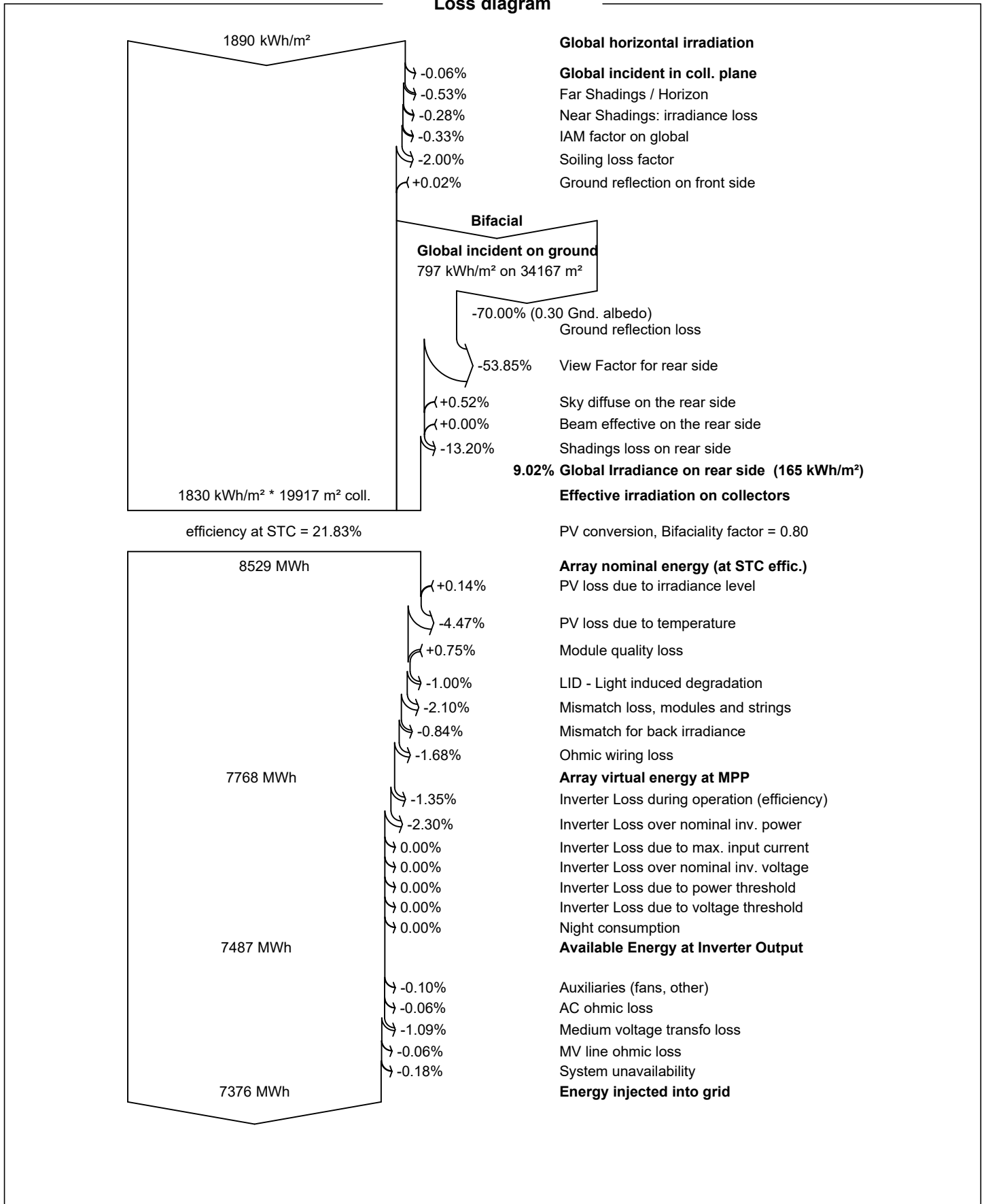
- GlobHor Global horizontal irradiation
- DiffHor Horizontal diffuse irradiation
- T\_Amb Ambient Temperature
- GlobInc Global incident in coll. plane
- GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
- EArray Effective energy at the output of the array
- E\_Grid Energy injected into grid
- PR Performance Ratio



PVsyst V7.2.8

VCO, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

Loss diagram



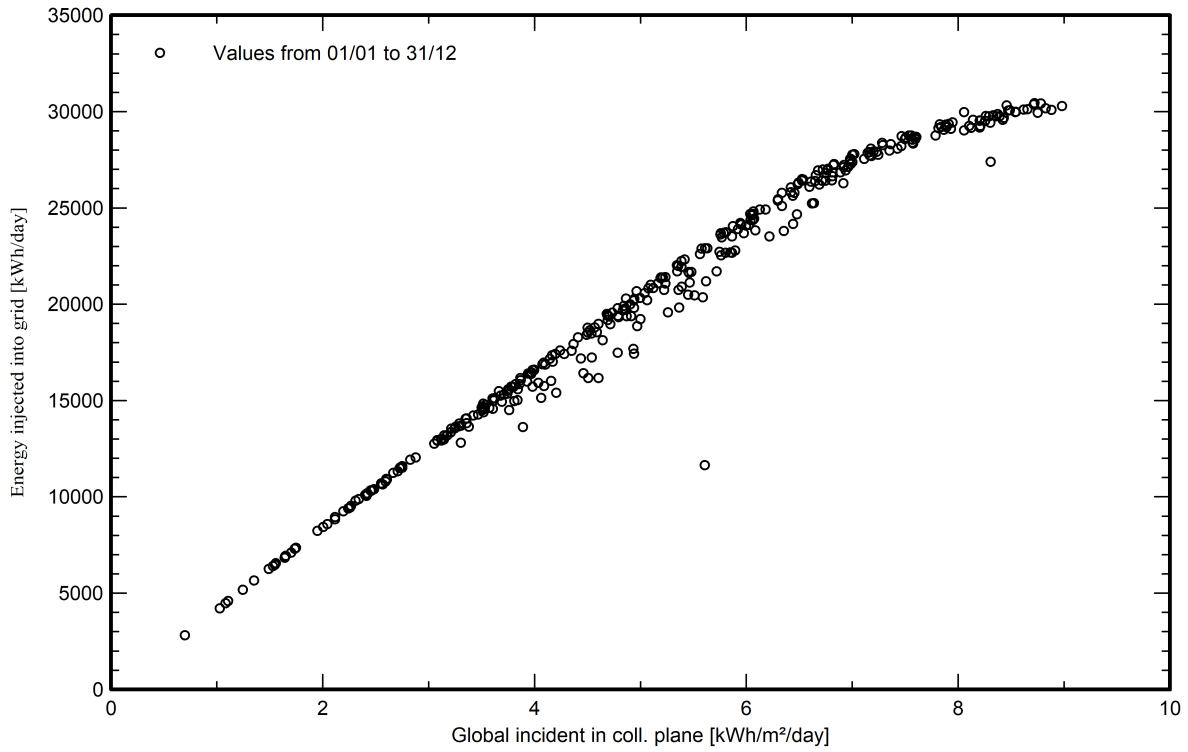


**PVsyst V7.2.8**

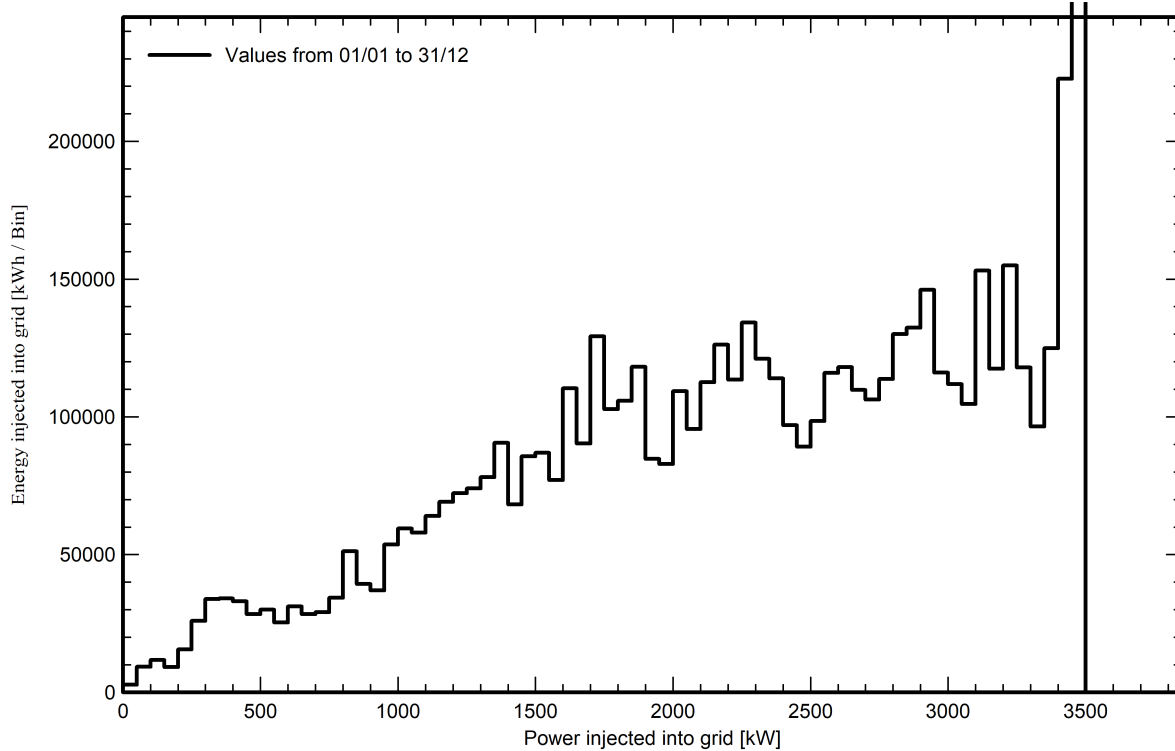
VC0, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

**Special graphs**

**Diagrama entrada/salida diaria**



**Distribución de potencia de salida del sistema**





**PVsyst V7.2.8**

VCO, Simulation date:  
27/09/23 08:31  
with v7.2.8

**CO<sub>2</sub> Emission Balance**

Total: 21856.6 tCO<sub>2</sub>

**Generated emissions**

Total: 7517.63 tCO<sub>2</sub>

Source: Detailed calculation from table below:

**Replaced Emissions**

Total: 33854.4 tCO<sub>2</sub>

System production: 7375.68 MWh/yr

Grid Lifecycle Emissions: 153 gCO<sub>2</sub>/kWh

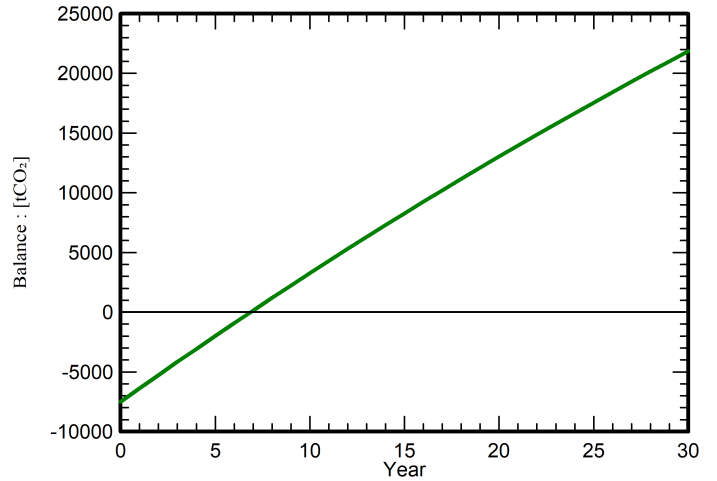
Source: IEA List

Country: Colombia

Lifetime: 30 years

Annual degradation: 1.0 %

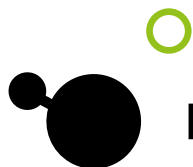
**Saved CO<sub>2</sub> Emission vs. Time**



**System Lifecycle Emissions Details**

Item	LCE	Quantity	Subtotal
			[kgCO <sub>2</sub> ]
Modules	1713 kgCO <sub>2</sub> /kWp	4346 kWp	7443909
Supports	1.02 kgCO <sub>2</sub> /kg	71250 kg	72711
Inverters	101 kgCO <sub>2</sub> /	10.00	1011

Anexo 5



Hydrogen is now.

**H-TEC SYSTEMS**

READY.  
SET.  
SUPPLY.

**H-TEC SYSTEMS**  
High Efficiency  
Electrolyzers

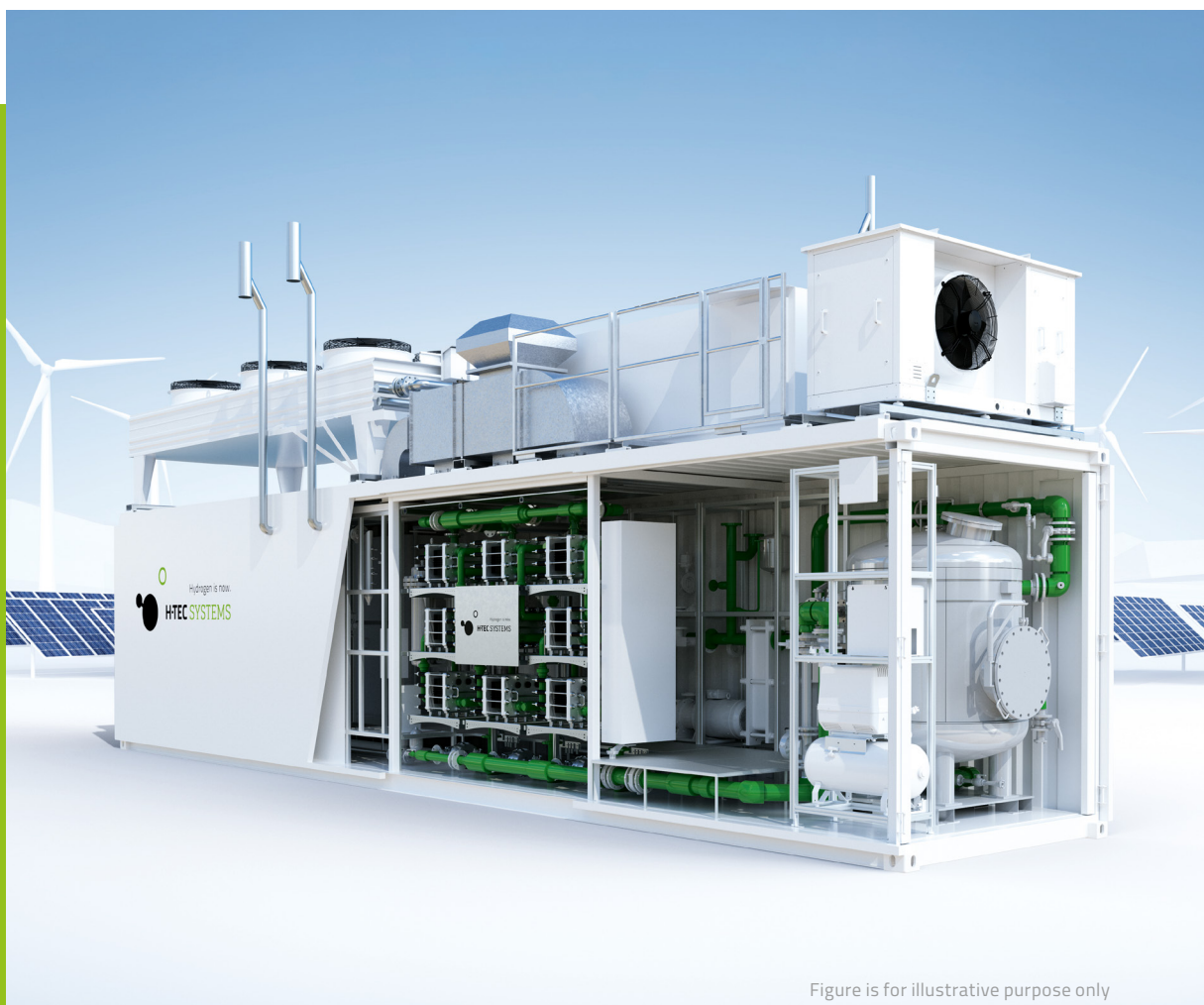


Figure is for illustrative purpose only

# H-TEC SYSTEMS PEM Electrolyzer **ME450**

**EN**

# PEM electrolyzers for a sustainable energy supply system – H-TEC SYSTEMS ME450

Plug-and-play hydrogen: The H-TEC SYSTEMS ME450 electrolyzer is a proven turn-key solution for the easy and efficient production of green hydrogen. In the space of just one standard 40-foot container, enough hydrogen can be produced to refuel 90 cars daily. Each ME450 has an electrolysis capacity of 1 MW and can produce 450 kg of high purity hydrogen daily. Its modularity makes it suitable for

projects requiring 1 – 5 MW of electrolysis capacity. Thanks to a multiple stack design, high plant availability and excellent spare parts availability, and our extensive service offering, risks can be minimized, and costs reduced. Due to the proven design the technology of the H-TEC SYSTEMS PEM electrolyzer is reliable and future-proof.

<b>H<sub>2</sub> production nominal</b>	450 kg/d   210 Nm <sup>3</sup> /h
<b>Energy consumption<sup>1</sup></b>	4,7 kWh/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>   53 kWh/kg
<b>System efficiency<sup>1</sup></b>	75%
<b>Performance class</b>	1 MW
<b>H<sub>2</sub> production modulation range</b>	42 – 210 Nm <sup>3</sup> /h   20 – 100 %
<b>H<sub>2</sub> purity</b>	5.0 (meets ISO 14687:2019 Table 2)
<b>H<sub>2</sub> output pressure</b>	20 – 30 bar (g)
<b>Load change</b>	30 s (Standby to nominal load)
<b>Heat recovery</b>	Heat output: 170 kW BoL   350 kW EoL 57 °C Transfer to customer system   >90% system efficiency
<b>H<sub>2</sub>O required quality</b>	TrinkwV 2020   EU Directive 2020/2184-EU
<b>H<sub>2</sub>O consumption nominal</b>	260 kg/h (at 10° dH)
<b>Power supply electrolysis<sup>2</sup></b>	3 x 480 VY, 3 x 480 V ▲ / 50 Hz (acc. IEC 60038), Connecting power: 1.325 MVA
<b>Power supply peripherie</b>	3 x 400 V / 50 Hz (acc. IEC 60038), Connecting value: 150 kW
<b>Dimensions LxWxH</b>	40' Container, incl. attachments ca. 13.2 x 4.0 x 5.7 m
<b>Weight</b>	ca. 36 t (operational)
<b>Ambient temperature</b>	-20 °C to +40 °C

Technical changes reserved

<sup>1</sup> Standard conditions: BoL, 15 °C outdoor temperature, 30 bar (g) H<sub>2</sub> transfer pressure and 200 Nm<sup>3</sup>/h, based on Higher Heating Value (HHV).

<sup>2</sup> Transformer is required for galvanic isolation

## We are the fuel of the global energy transition

As a technological pioneer, we have been playing a decisive role in shaping hydrogen technology for over 25 years. We believe that mobility, production, and consumption are possible without emissions. To achieve this, H-TEC SYSTEMS

builds on cooperation with visionary customers and partners, and the power of our parent company MAN Energy Solutions. Together, we are making hydrogen production green and the CO<sub>2</sub>-neutral transformation of all sectors a reality.

# Nitrogen Generating Systems - Twin Tower PSA System-Series: NS-60-88



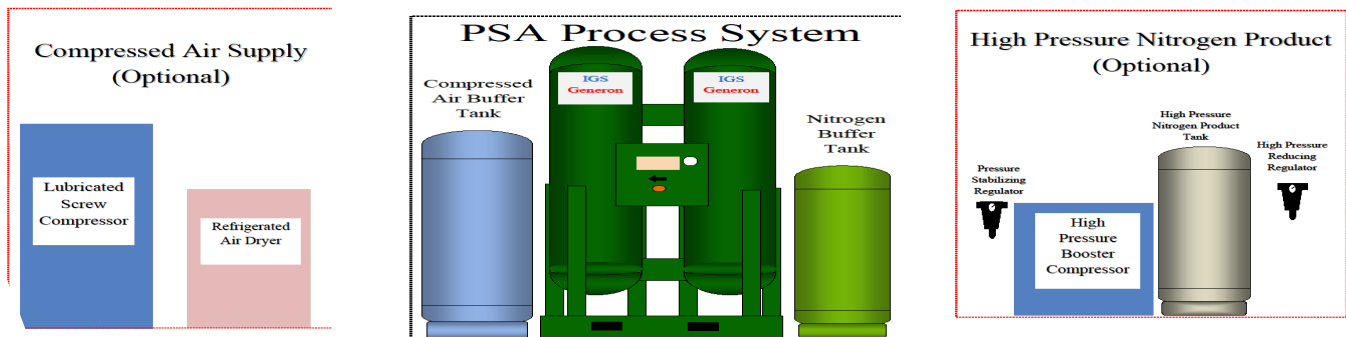
## Typical Applications

- Gas Assisted Injection Molding (GAIM)
- Heat Treatment of Ferrous & Non-Ferrous Metals
- Inerting of Flammable Liquids & Gases
- Food Packaging
- Laser / Plasma Cutting
- Re-flow and Wave Soldering of PCBs
- Brazing
- Blanketing of Chemical & Pharmaceuticals
- Auto Clave

## Advantages of GENERON® PSA

- Low Operating Pressures
- No Hazardous Storage or Connections
- Low Gas Generating costs
- Low Operating Cost
- Fully Automatic Unattended Operation
- 2 Million plus cycle valves
- Easy to Install and Maintain
- Low dBA levels

GENERON® Nitrogen PSA Generators separate nitrogen (N<sub>2</sub>) from compressed air utilizing *Pressure Swing Adsorption* technology. Compressed air, which consists of approximately 21% oxygen and 78% nitrogen, is passed through a bed of carbon molecular sieve (CMS). The sieve preferentially adsorbs O<sub>2</sub> and moisture over N<sub>2</sub> allowing the N<sub>2</sub> to pass through as a product gas at pressure. While one of the towers is in the adsorption phase the other tower is regenerated by de-pressurizing at which time the sieve releases the adsorbed gases to the atmosphere and the cycle is then repeated.



## Standard Components

- ASME Adsorber Vessels
- Pneumatic / Electric Valves (Two million cycle life)
- Piping, Gauges, and Instrumentation
- Safety Valve
- Nitrogen Pressure and Flow Regulators
- PLC Control System (Allen Bradley)
- Steel wrap around skid mounted
- Exhaust Silencing Muffler
- Sound Level < 90 dB(A)

## Options

- Oxygen Analyzer (with Calibration kit)
- Product Flow Meter
- Inlet Filtration Package
- Post Filtration Package
- Auto Shut Down/Startup mode (with manual bypass valve capability)
- Auto Standby mode
- Off Specification Circuit
- HMI Display Screen: Displays Inlet pressure, outlet pressure, system run status, O<sub>2</sub> concentration

## Special Options

- Master Controller: PLC (Allen Bradley) Driven for multiple unit operation
- Enhanced PLC with Telemetry
- Enhanced HMI: Monitor Package (Displays Feed Air, Nitrogen Product Pressures, Oxygen Concentration, and Product Flow)
- Compressed Air Buffer Tank
- Nitrogen Buffer Tank
- Product Booster Compressor
- Dew Point Analyzer
- Tanks & Generator on a common skid
- Custom Engineered packages

# GENERON

# Nitrogen Generating Systems - Twin Tower PSA System-Series: NS-60-88

## NS-60-88 Technical Data—US Standards

### NITROSWING NS-60-88 Series Specifications & Performance

Standard	90 PSIG Feed Pressure and 68°F					110 PSIG Feed Pressure and 68°F				
Nitrogen %	N2 Flow SCFH	N2 Pressure PSIG	Feed Air Flow SCFM	Air Receiver Gallons	N2 Receiver Gallons	N2 Flow SCFH	N2 Pressure PSIG	Feed Air Flow SCFM	Air Receiver Gallons	N2 Receiver Gallons
99	48064	60	1939.6	5000	3800	59322	80	2393.9	5000	3800
99.9	27626	60	1644.4	3800	2560	32456	80	1931.9	3800	2560
99.95	25255	60	1683.7	3800	1550	28850	80	1923.3	3800	1550
99.99	18682	60	1638.8	3800	1550	19834	80	1739.8	3800	1550
99.999	9849	60	1478.8	2560	1550	9015	80	1353.7	2560	1550

### NITROSWING NS-60-88 Series Specifications & Performance

Standard	125 PSIG Feed Pressure and 68°F					145 PSIG Feed Pressure and 68°F				
Nitrogen %	N2 Flow SCFH	N2 Pressure PSIG	Feed Air Flow SCFM	Air Receiver Gallons	N2 Receiver Gallons	N2 Flow SCFH	N2 Pressure PSIG	Feed Air Flow SCFM	Air Receiver Gallons	N2 Receiver Gallons
99	68500	95	2764.3	5000	3800	79307	115	3200.5	8000	3800
99.9	36389	95	2166	3800	2560	41332	115	2460.3	5000	2560
99.95	31774	95	2118.3	3800	1550	35658	115	2377.2	5000	1550
99.99	20765	95	1821.5	3800	1550	22472	115	1971.2	5000	1550
99.999	8328	95	1250.5	2560	1550	8114	115	1218.3	2560	1550

All performance flows are +/- 4%. All flows are shown at 68° F / 20°

### Approximate Weight and Dimensions

Standard	H	W	L	Weight
US-in / lbs	141	106	138	25,515

#### GENERON

16250 Tomball Parkway  
Houston, Texas 77086  
O +1 713 937 5200  
F +1 713 932 5250  
[www.generon.com](http://www.generon.com)

# GENERON



## Anexo 7

**Proyecto** Planta de producción de amoníaco verde Duitama  
**Lugar** Duitama, Boyacá, Colombia

**Diseño** Amoníaco Verde Duitama 3,2MWac **Modena** USD \$

Item	Unidad de referencia	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Precio Pre-impuestos	Impuestos	Precio Final	
<b>EQUIPOS PRINCIPALES</b>								
<b>1 Sistema solar Fotovoltaico</b>								
<b>1.1 LADO DC</b>								
1.1.1	Módulos FV	Cantidad de módulos	7,961	Módulos	160 \$/Módulos	\$ 1,273,708.80	0%	\$ 1,273,708.80
1.1.2	Inversor tipo String	Inversores tipo String	10	Inversor String	7,500 \$/Inversor String	\$ 75,000.00	0%	\$ 75,000.00
1.1.3	Estructuras fijas	Estructura 3H27	4,497,000	Potencia pico	0.070 \$/Potencia pico	\$ 314,790.00	0%	\$ 314,790.00
<b>1.2 LADO AC</b>								
1.2.1	Estaciones de media tensión	Potencia pico Nominal	3,200	kWp	40 \$/kWp	\$ 128,000.00	0%	\$ 128,000.00
<b>2 TRABAJOS CIVILES</b>								
<b>2.1 Site Conditions</b>								
2.1.1	Limpieza y corte de grama	Área de encerramiento	6,200.00	m <sup>2</sup>	2.00 \$/m <sup>2</sup>	\$ 12,400.00	0%	\$ 12,400.00
2.1.2	Retirada de tierra vegetal	Área removida	6,200.00	m <sup>2</sup>	2.00 \$/m <sup>2</sup>	\$ 12,400.00	0%	\$ 12,400.00
2.1.3	Caminos internos	Longitud caminos	113.00	m	70.00 \$/m	\$ 7,910.00	0%	\$ 7,910.00
2.1.4	Drenajes	Longitud drenajes	220.00	m	35.00 \$/m	\$ 7,700.00	0%	\$ 7,700.00
<b>2.2 Cimentaciones</b>								
2.2.1	Estaciones de media tensión	Cantidad de Estaciones	1.00	Cimentaciones	7,000.00 \$/Cimentaciones	\$ 7,000.00	0%	\$ 7,000.00
2.2.2	Hincado	Cantidad hincas	3,822.00	Cimentaciones	2.50 \$/Cimentaciones	\$ 9,555.00	0%	\$ 9,555.00
<b>2.3 TRINCHERAS Y REGISTROS</b>								
2.3.1	Registros de baja tensión	Cantidad registros de baja tensión	4.00	Registros	1,500.00 \$/Registros	\$ 6,000.00	0%	\$ 6,000.00
2.3.2	Registros de media tensión	Cantidad registros de media tensión	1.00	Registros	2,000.00 \$/Registros	\$ 2,000.00	0%	\$ 2,000.00
2.3.3	Trench 400mm x 1000mm	Trincheras de BT	117.20	m <sup>3</sup>	35.00 \$/m <sup>3</sup>	\$ 4,102.00	0%	\$ 4,102.00
2.3.4	Trench 800mm x 1000mm	Trincheras de BT	58.40	m <sup>3</sup>	40.00 \$/m <sup>3</sup>	\$ 2,336.00	0%	\$ 2,336.00
2.3.5	Trench 800mm x 1000mm	Trincheras de MT	123.20	m <sup>3</sup>	40.00 \$/m <sup>3</sup>	\$ 4,928.00	0%	\$ 4,928.00
2.3.8	Trench 400mm x 700mm	Trincheras SSAA	80.00	m <sup>3</sup>	30.00 \$/m <sup>3</sup>	\$ 2,400.00	0%	\$ 2,400.00
<b>2.4 SEGURIDAD Y CONTROL</b>								
2.4.1	Vallado	Vallado perimetral	1,000.00	m	78.00 \$/m	\$ 78,000.00	0%	\$ 78,000.00
2.4.2	Puertas de acceso	Cantidad de puertas de acceso	1.00	Puertas	4,800.00 \$/Puertas	\$ 4,800.00	0%	\$ 4,800.00
2.4.3	Cimentaciones para iluminación y cámaras de video	Cantidad de cimentaciones Iluminación y cámaras	6.00	Cimentaciones	200.00 \$/Cimentaciones	\$ 1,200.00	0%	\$ 1,200.00
<b>3 SISTEMA ELÉCTRICO</b>								
<b>3.1 CABLEADO SOLAR</b>								

## Anexo 7

3.1.1	Cableado solar DC IEC 10mm CU	Cableado solar DC IEC 10mm CU	5,969.16	m	1.20	\$/m	\$ 7,162.99	0%	\$ 7,162.99
3.2	<b>CABLEADO DE BAJA TENSIÓN</b>								
3.2.1	Cableado BT AC IEC 185mm AL	Cable BT AC IEC 185mm <sup>2</sup> AL	0.00	m	4.00	\$/m	\$ -	0%	\$ -
3.2.2	Cableado BT AC IEC 240mm AL	Cable BT AC IEC 240mm <sup>2</sup> AL	3,006.72	m	4.90	\$/m	\$ 14,732.93	0%	\$ 14,732.93
3.2.3	Cableado BT AC IEC 300mm AL	Cable BT AC IEC 300mm <sup>2</sup> AL	0.00	m	5.80	\$/m	\$ -	0%	\$ -
3.2.4	Cableado BT AC IEC 400mm AL	Cable BT AC IEC 400mm <sup>2</sup> AL	0.00	m	6.40	\$/m	\$ -	0%	\$ -
3.3	<b>CABLEADO MEDIA TENSIÓN</b>								
3.3.1	Cableado MT AC IEC 300mm AL	Cableado MT AC IEC 300mm <sup>2</sup> AL	465.00	m	26.00	\$/m	\$ 12,090.00	0%	\$ 12,090.00
3.4	<b>SISTEMA DE ATERRIZAMIENTO</b>								
3.4.1	Cableado SPT (trincheras BT)	Longitud de trincheras de cableado SPT	1,002.24	m <sup>2</sup>	15.00	\$/m <sup>2</sup>	\$ 15,033.60	0%	\$ 15,033.60
3.4.2	Cableado SPT (estación de media tensión)	Longitud cableado SPT estación media tensión	25.00	m	15.00	\$/m	\$ 375.00	0%	\$ 375.00
3.4.3	Varillas de SPT (estaciones de media tensión)	Varillas SPT	25.00	varillas	6.00	\$/varillas	\$ 150.00	0%	\$ 150.00
3.5	<b>SISTEMA DE SSAA</b>								
3.5.1	Cableado auxiliar para el perímetro	Cableado auxiliar para el perímetro	1,183.00	m	1.20	\$/m	\$ 1,419.60	0%	\$ 1,419.60
3.6	<b>COMUNICACIONES/SISTEMA DE MONITOREO</b>								
3.6.1	Cableado de fibra óptica monomodo(Sistema de control)	Cableado de FO monomodo	155.00	m	20.00	\$/m	\$ 3,100.00	0%	\$ 3,100.00
3.6.2	Cableado de fibra óptica mono mono (CCTV)	Cableado de FO monomodo CCTV	1,283.00	m	20.00	\$/m	\$ 25,660.00	0%	\$ 25,660.00
3.6.3	Cableado RS 485 (Monitoring System)	Cable RS 485	50.00	m	1.50	\$/m	\$ 75.00	0%	\$ 75.00



## Anexo 7

5.1	Desarrollo de proyecto	Desarrollo prefactibilidad de parque solar fv	4.50	megavatios	2,500.00	\$/megavatios	\$ 11,242.50	0%	\$ 11,242.50
5.2	Compra de predio	Adquisición de predios	6.00	hectáreas	10,000.00	\$/hectáreas	\$ 60,000.00	0%	\$ 60,000.00
<b>6 INGENIERÍA</b>									
6.1	Ingeniería de detalle	Desarrollo de ingeniería detallada	4.50	megavatios	15,000.00	\$/megavatios	\$ 67,500.00	0%	\$ 67,500.00
<b>7 HIDRÓGENO</b>									
7.1	Electrolizador	Cantidad de electrolizadores	3.00	Unidad modular	1,250,000.00	\$/Unidad modular	\$ 3,750,000.00	0%	\$ 3,750,000.00
7.2	Stack	Cantidad de stacks	3.00	Stack	350,000.00	\$/Stack	\$ 1,050,000.00	0%	\$ 1,050,000.00
7.3	Tanques de almacenamiento	Cantidad de tanques	1.00	Unidad de tanques	48,000.00	\$/Unidad de tanques	\$ 48,000.00	0%	\$ 48,000.00
7.4	Instalaciones auxiliares hidrógeno	Global	1.00	Unidad	150,000.00	\$/Unidad	\$ 150,000.00	0%	\$ 150,000.00
<b>8.1 AMONÍACO Y NITRÓGENO</b>									
8.2	Reactor, intercambiador de calor y condensador	Cantidad de electrolizadores	1.00	Unidad	820,000.00	\$/Unidad	\$ 820,000.00	19%	\$ 975,800.00
8.3	Instalaciones auxiliares amoníaco	Cantidad de stacks	1.00	Global	200,000.00	\$/Global	\$ 200,000.00	0%	\$ 200,000.00
8.4	Unidad PSA	Cantidad de tanques	1.00	Unidad	50,000.00	\$/Unidad	\$ 50,000.00	19%	\$ 59,500.00
8.5	Instalaciones auxiliares nitrógeno	Potencia pico Nominal	1.00	Global	150,000.00	\$/Global	\$ 150,000.00	19%	\$ 178,500.00
							\$ 8,527,796.92	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 8,721,596.92</b>

**ANEXO 8**

**FLUJOS DE CAJA PARA LCOE, LCOH Y LCOA**

**LCOE**

Tasa de oportunidad (%) [DNP]	8%
CAPEX (USD) [anexo 7]	\$ 2.304.996.92
OPEX (USD) [65]	\$ 46.099.94
Energía/año (kWh/año) [anexo 4]	7375700
LCOE (USD/kWh)	0.0329419
INDISPONIBILIDAD	0.97

	Año 1	Año2	Año3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Numerador (USD)	\$ 2176941.5	\$ 395233	\$ 36595.6	\$ 33884.8	\$ 31374.8	\$ 29050.8	\$ 26898.9	\$ 24906.4	\$ 23061.4	\$ 21353.2	\$ 19771.5	\$ 18306.9	\$ 16950.9	\$ 15695.2	\$ 14532.6
Denominador (kWh)	80543011.6	6624471.3	6133769.7	5679416.4	5258718.9	4869184.2	4508503.9	4174540.6	3865315.4	3578995.7	3313884.9	3068412.0	2841122.2	2630668.7	2435804.3

	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Numerador (USD)	\$ 13456.1	\$ 12459.4	\$ 11536.5	\$ 10681.9	\$ 9890.7	\$ 9158.0	\$ 8479.6	\$ 7851.5	\$ 7269.9	\$ 6731.4	\$ 6232.8	\$ 5771.1	\$ 5343.6	\$ 4947.8	\$ 4581.3
Denominador (kWh)	2088309.6	1933620.0	1790388.9	1657767.5	1534969.9	1421268.4	1315989.3	1218508.6	1128248.7	1044674.7	967291.4	895640.2	829296.5	767867.1	710988.1

**LCOH**

Tasa de oportunidad (%) [DNP]	8%
CAPEX (USD) [anexo 7]	\$ 4.990.000
OPEX (USD)	\$ 1.350.934
Electricidad (USD)	\$ 4.041.964.81
Agua (USD)	\$ 34.665.22
Total (USD)	\$ 10.417.564.03
Producción H2 (kg)	2.311.015
LCOH (USD/kg)	4.51

	Año 1	Año2	Año3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
CAPEX	4.990.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O&M	111.111	102.881	95.260	88.204	81.670	75.620	70.019	64.832	60.030	55.583	51.466	47.654	44.124	40.855	37.829
Electricidad	332.442	307.817	285.015	263.903	244.355	226.254	209.495	193.977	179.608	166.304	153.985	142.579	132.017	122.238	113.184
Agua	2.851	2.640	2.444	2.263	2.096	1.940	1.797	1.664	1.540	1.426	1.321	1.223	1.132	1.048	971
Total	5.436.404	413.337	382.720	354.370	328.120	303.815	281.310	260.473	241.178	223.313	206.772	191.455	177.273	164.142	151.983
Producción H2 (kg)	190.075	175.996	162.959	150.888	139.711	129.362	119.780	110.907	102.692	95.085	88.042	81.520	75.482	69.890	64.713

	Año 1	Año2	Año3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
CAPEX	-	-	-	-	-	-	-	-	-	208.163	-	-	-	-	-
O&M	35.027	32.432	30.030	27.805	25.746	23.839	22.073	20.438	18.924	17.522	16.224	15.022	13.910	12.879	11.925
Electricidad	104.800	97.037	89.849	83.193	77.031	71.325	66.042	61.150	56.620	52.426	48.542	44.947	41.617	38.535	35.680
Agua	899	832	771	713	661	612	566	524	486	450	416	385	357	330	306
Total	140.725	130.301	120.649	111.712	103.437	95.775	88.681	82.112	76.029	70.398	65.183	60.355	55.884	51.744	47.911
Producción H2 (kg)	59.920	55.481	51.371	47.566	44.043	40.780	37.760	34.963	32.373	29.975	27.754	25.699	23.795	22.032	20.400

**LCOA**

Tasa de oportunidad (%) [DNP]	8%
CAPEX [anexo 7]	\$ 8.721.596.92
OPEX	\$ 87.215.97
LCOA (tNH3) [anexo 7]	\$ 12.624.78
Capex HB [anexo 7]	\$ 5.458.074
tNH3 (toneladas amonaco/año)	697.74

	Año 1	Año2	Año3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Numerador (USD)	\$ 8156308.2	\$ 7552137.2	\$ 6992719.7	\$ 6474740.4	\$ 5995130.0	\$ 5551046.3	\$ 5139857.7	\$ 4759127.5	\$ 4406599.5	\$ 4080184.8	\$ 3777948.9	\$ 3498100.8	\$ 3238982.2	\$ 2999057.6	\$ 2776905.2
Denominador (kg H2)	646.1	598.2	553.9	512.9	474.9	439.7	407.1	377.0	349.0	323.2	299.2	277.1	256.6	237.6	220.0

	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25	Año 26	Año 27	Año 28	Año 29	Año 30
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Numerador (USD)	\$ 2571208.5	\$ 2380748.6	\$ 2204396.9	\$ 2041108.2	\$ 1889915.0	\$ 1749921.3	\$ 1620297.5	\$ 1500275.5	\$ 1389144.0	\$ 1286244.4	\$ 1190967.0	\$ 1102747.3	\$ 1021062.3	\$ 945428.0	\$ 875396.3
Denominador (kg H2)	203.7	188.6	174.6	161.7	149.7	138.6	128.3	118.8	110.0	101.9	94.3	87.3	80.9	74.9	69.3

# Tiger Neo N-type 78HL4-BDV 590-610 Watt

BIFACIAL MODULE WITH  
DUAL GLASS

N-Type

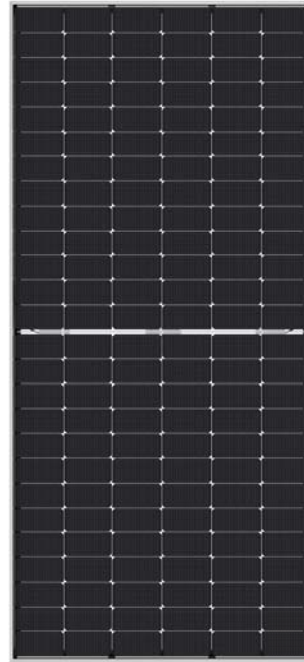
Positive power tolerance of 0~+3%

IEC61215(2016), IEC61730(2016)

ISO9001:2015: Quality Management System

ISO14001:2015: Environment Management System

ISO45001:2018  
Occupational health and safety management systems



## Key Features



### SMBB Technology

Better light trapping and current collection to improve module power output and reliability.



### PID Resistance

Excellent Anti-PID performance guarantee via optimized mass-production process and materials control.



### Higher Power Output

Module power increases 5-25% generally, bringing significantly lower LCOE and higher IRR.



### Hot 2.0 Technology

The N-type module with Hot 2.0 technology has better reliability and lower LID/LETID.



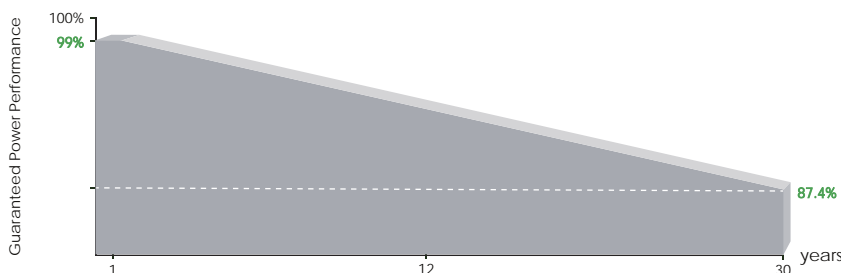
### Enhanced Mechanical Load

Certified to withstand: wind load (2400 Pascal) and snow load (5400 Pascal).



POSITIVE QUALITY™  
Continuous Quality Assurance

## LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

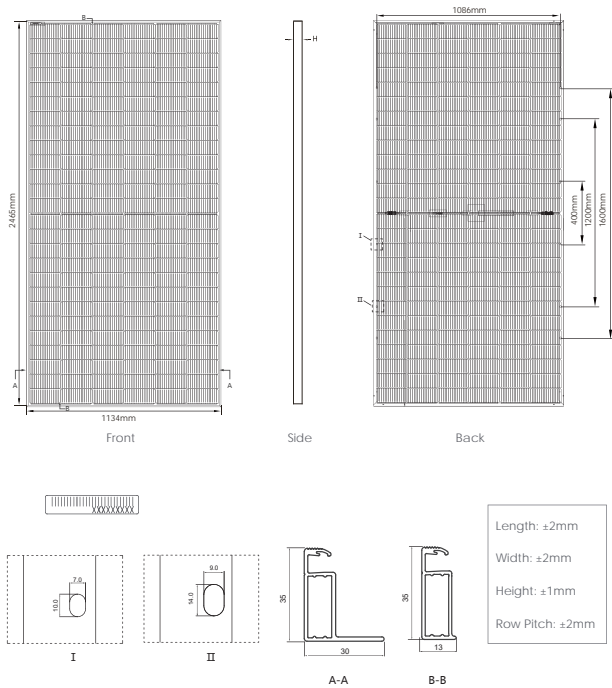


12 Year Product Warranty

30 Year Linear Power Warranty

0.40% Annual Degradation Over 30 years

## Engineering Drawings

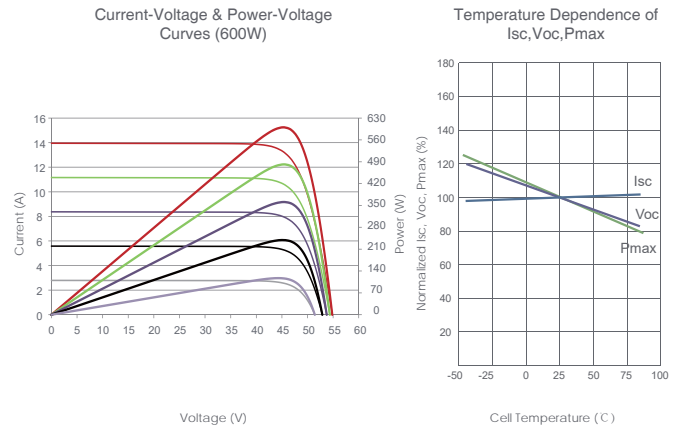


## Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

31pcs/pallets, 62pcs/stack, 496pcs/ 40'HQ Container

## Electrical Performance & Temperature Dependence



## Mechanical Characteristics

Cell Type	N type Mono-crystalline
No. of cells	156 (2×78)
Dimensions	2465×1134×35mm (97.05×44.65×1.38 inch)
Weight	34.6kg (76.38 lbs)
Front Glass	2.0mm, Anti-Reflection Coating
Back Glass	2.0mm, Heat Strengthened Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP68 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm <sup>2</sup> (+): 400mm, (-): 200mm or Customized Length

## SPECIFICATIONS

Module Type	JKM590N-78HL4-BDV		JKM595N-78HL4-BDV		JKM600N-78HL4-BDV		JKM605N-78HL4-BDV		JKM610N-78HL4-BDV	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	590Wp	444Wp	595Wp	447Wp	600Wp	451Wp	605Wp	455Wp	610Wp	459Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	44.91V	41.89V	45.08V	42.00V	45.25V	42.12V	45.42V	42.23V	45.60V	42.35V
Maximum Power Current (Imp)	13.14A	10.59A	13.20A	10.65A	13.26A	10.71A	13.32A	10.77A	13.38A	10.83A
Open-circuit Voltage (Voc)	54.76V	52.02V	54.90V	52.15V	55.03V	52.27V	55.17V	52.41V	55.31V	52.54V
Short-circuit Current (Isc)	13.71A	11.07A	13.79A	11.13A	13.87A	11.20A	13.95A	11.26A	14.03A	11.33A
Module Efficiency STC (%)	21.11%		21.29%		21.46%		21.64%		21.82%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	30A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.25%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									
Refer. Bifacial Factor	80±5%									

## BIFACIAL OUTPUT-REAR SIDE POWER GAIN

		Rear Side Power Gain (%)				
		5%	15%	25%	35%	45%
5%	Maximum Power (Pmax)	620Wp	625Wp	630Wp	635Wp	641Wp
	Module Efficiency STC (%)	22.16%	22.35%	22.54%	22.73%	22.91%
15%	Maximum Power (Pmax)	679Wp	684Wp	690Wp	696Wp	702Wp
	Module Efficiency STC (%)	24.27%	24.48%	24.68%	24.89%	25.10%
25%	Maximum Power (Pmax)	738Wp	744Wp	750Wp	756Wp	763Wp
	Module Efficiency STC (%)	26.38%	26.61%	26.83%	27.05%	27.28%

\*STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>

Cell Temperature 25°C

AM=1.5

NOCT: Irradiance 800W/m<sup>2</sup>

Ambient Temperature 20°C

AM=1.5

Wind Speed 1m/s