

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



“Diseño de un laboratorio y banco de
pruebas para procesos de combustión
amoníaco-hidrógeno”

JORGE IGNACIO CÉSPEDES DOMÍNGUEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA:	DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES
PROFESOR CORREFERENTE:	DR. ING. GERMÁN AMADOR D.

ENERO – 2024

Agradecimientos

Recuerdo los primeros años de universidad sin saber que era lo que quería y teniendo muchas dudas en mi cabeza, pensando cual era el camino que debía seguir para poder cumplir mis sueños. Dudas como si es que la carrera universitaria era la correcta, la universidad o si simplemente si iba a poder afrontar este desafío el cual recién estaba comenzando. Esas preguntas con el paso del tiempo comenzaron a disminuir en mi cabeza, pero siempre existían. A pesar de ello sabía que tenía un gran pilar que nunca me iba a dejar caer y podría afrontar cualquier desafío o inquietud que tuviera, ese pilar llamado familia. Sin ellos saber que con cada actitud que tenían me enseñaban lo mejor de cada una de sus virtudes y defectos.

Mi padre Jorge, una persona gentil, respetuosa, puntual, siempre preocupado por el prójimo y queriendo que todo funcione perfectamente, querido por todo aquel que trabajara con él. De él aprendí su compromiso, perseverancia, diligencia y disciplina. Desde pequeño lo acompañaba a ver como trabajaba, siempre mostrándome el amor con el que hace las cosas, haciendo todo ameno y esa capacidad de liderazgo innata. Siendo nosotros como familia siempre su motor para entregarnos lo mejor.

Mi madre Ingrid, preocupada, serena, protectora y cuidadosa. Siempre escuchando a los demás, demostrando calma y que todo iba a estar bien al lado de ella. Me enseñó la importancia de seguir jugando, abrazando a tu niño interior, aprender a escuchar y siempre intrigarme por cada nueva historia que alguien que te puede contar. Me enseñó el lado natural de la vida, que todo tiene un porqué y el famoso “tren de la vida”, una metáfora la cual explica las relaciones con las demás personas en cada etapa de tu vida.

Mi hermanita Constanza, hermana mayor, casi mi segunda madre, constante, inteligente, estudiosa, independiente, leal, preocupada por cada detalle, tierna y considerada. Me enseñó a nunca rendirme, a decir las cosas, a perseguir mis sueños y que nada es imposible, siendo un pilar fundamental en mi etapa universitaria. De igual manera un gran apoyo su pareja Nicolás.

En esta etapa, siempre conté con el apoyo y aprendizaje de personas clave, como mi primo Nicolás, mi abuela Marta y mis dos abuelos, María Teresa y Jorge, quienes donde quieran que estén me entregan la energía necesaria para afrontar cada situación o desafío. Agradezco a todos mis amigos que conocí dentro de la universidad, también a mis amigos del colegio y los que compartieron conmigo los viajes de verano. Sin ellos, todo hubiera sido muy distinto.

Quiero expresar mi agradecimiento a mis compañeros de proyecto, Paula, Christian y Claudio, ya que sin ellos este proceso no habría sido el mismo. Asimismo, agradezco a mi profesor, Mario Toledo, por su simpatía y por hacer que todo sea más ameno y entretenido. Un agradecimiento general al equipo de trabajo por mantener siempre un buen ambiente.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi sincero agradecimiento a Julieta, mi mejor amiga y compañera, quien apareció en el último año de esta hermosa etapa. Su presencia ha sido enriquecedora, enseñándome valiosas lecciones sobre cómo contemplar la vida, apreciar su simplicidad y brindándome un apoyo incondicional.

Finalmente, en todo el transcurso de esta linda etapa puedo decir que estoy donde quiero y debo estar.

Jorge Ignacio Céspedes Domínguez

Resumen

En el marco del desarrollo de los proyectos de investigación FONDEF IDeA ID23I10331 denominado *"Prototipo de quemador dual de amoníaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica"* y FONDEQUIP EQM230146 denominado *"Micro-turbina a gas: Equipamiento científico-tecnológico para desarrollar sistemas de generación eléctrica en base a combustibles verdes"*, el presente trabajo de titulación tiene como objetivo general el diseño de un laboratorio y banco de pruebas dedicado a los procesos de combustión de amoníaco-hidrógeno.

La primera etapa implicó un estudio exhaustivo del marco teórico actual, abarcando diversos experimentos y bancos de prueba de combustión de amoníaco a nivel mundial. Se logran reconocer diversas experiencias prácticas de procesos de combustión de amoníaco en reactores de distinto tipo, sin embargo, no se encuentran orientaciones para el diseño de laboratorios de combustión.

En segundo lugar, se llevó a cabo un minucioso análisis de las normativas aplicables al proceso de combustión de amoníaco, tanto a nivel nacional e internacional. Esta fase proporcionó las bases regulatorias necesarias para la gestación del diseño del laboratorio como son la toxicidad, inflamabilidad, concentraciones de amoníaco, medioambiente, transporte, manipulación y fenómenos como la corrosión.

En tercer lugar, se detallaron las características generales que debe poseer un laboratorio de este tipo, abarcando aspectos como la edificación, red eléctrica, red de gases, sistema de ventilación y extracción, entre otros.

Finalmente, y considerando cuidadosamente el contexto específico, el espacio físico, las características del emplazamiento y los equipos a utilizar, entre otros aspectos relevantes, se propone el diseño del laboratorio para su construcción e implementación. Este diseño considera las características técnicas presentes en la Tabla 1 adjunta.

Tabla 1: Características del diseño del laboratorio y bancos de pruebas.

Edificación	Área de construcción [m ²]	Volumen [m ³]	
Construcción completa	90,9	-	
Laboratorio	45,5	127	
Oficinas / Monitoreo	20,8	54	
Baños	6,8	17,7	
Antesala	9,07	23,6	
Bodega	3,15	6,3	
Bancos de prueba	Cantidad	Generación energía eléctrica [kW]	
Quemador	1	N/A	
Microturbina - Gas	1	3	
Campana de extracción	2	N/A	
Red de agua	Cantidad salidas de agua		
Laboratorio	5		
Oficina	0		
Baños	2		
Antesala	1		
Bodega	0		
Equipos de demanda eléctrica	Potencia [W]	Unidades	Potencia Total [W]
Foco Led 60x60	48	20	960
Computador	300	5	1500
Analizador de gases	8	5	40
Compresor	2200	1	2200
Impresora	300	1	300
Televisor	300	1	300
Hervidor	1500	1	1500
Monitores	40	3	120
Extractores baño	12	2	24
Extractor primario	2000	1	2000
Extractor secundario	2000	1	2000
Inyectores	1000	4	4000
Potencia Total [W]			14944
Extracción [m ³ /hr]	Renovaciones/hora		
1500 (Extractor 1)	12,5		
2000 (Extractor 2)	16,7		
3500 (Ambos)	29,2		

Abstract

Within the framework of the development of the research projects FONDEF IDeA ID23I10331 called "Prototype of dual green ammonia-hydrogen burner for the decarbonization of the electricity generation sector" and FONDEQUIP EQM230146 called "Gas micro-turbine: Scientific-technological equipment to develop electricity generation systems based on green fuels", the present degree work has as general objective the design of a laboratory and test bench dedicated to the ammonia-hydrogen combustion processes.

The first stage involved an exhaustive study of the current theoretical framework, covering several experiments and test benches for ammonia combustion worldwide. Several practical experiences of ammonia combustion processes in reactors of different types are recognized, however, no guidelines for the design of combustion laboratories are found.

Secondly, a detailed analysis of the regulations applicable to the ammonia combustion process, both at national and international level, was carried out. This phase provided the necessary regulatory bases for the gestation of the laboratory design, such as toxicity, flammability, ammonia concentrations, environment, transport, handling and phenomena such as corrosion.

Thirdly, the general characteristics that a laboratory of this type should have were detailed, covering aspects such as the building, electrical network, gas network, ventilation and extraction system, among others.

Finally, and carefully considering the specific context, the physical space, the characteristics of the site and the equipment to be used, among other relevant aspects, the laboratory design was proposed for its construction and implementation. This design considers the technical characteristics shown in Table 1.

Índice de contenidos

1	Introducción.....	11
1.1	Objetivo general	12
1.2	Objetivos específicos.....	12
2	Estado del arte para el diseño	13
2.1	Combustión de amoniaco	13
2.1.1	Experiencia A	13
2.1.2	Experiencia B	16
2.1.3	Experiencia C	17
2.1.4	Experiencia D	19
2.1.5	Experiencia E	21
3	Normas aplicables en el proceso de combustión de NH₃	22
3.1	Consideraciones de seguridad y estándares internacionales	22
3.1.1	Toxicidad.....	22
3.1.2	Inflamabilidad	24
3.1.3	Corrosión.....	26
3.1.4	Impactos ambientales	26
3.1.5	Regulación y estándares internacionales.....	27
3.2	Marco regulatorio y normativo del amoníaco en Chile	28
3.2.1	Almacenamiento.....	30
3.2.2	Transporte y manipulación	31
3.2.3	Concentraciones de NH ₃	32
4	Consideraciones para el diseño.....	33
4.1	Proyecto FONDEF IDeA.....	33
4.1.1	Prototipo/Set up	34
4.2	Proyecto FONDEQUIP	35
4.2.1	Set up.....	36
4.3	Dependencias	37
4.4	Edificación	37
4.5	Instalaciones de servicios básicos	38
4.5.1	Red Eléctrica	38
4.5.2	Red de agua potable.....	38
4.5.3	Red de gases	38
4.5.4	Sistemas de ventilación y extracción de aire.....	39
4.5.5	Mobiliario	39

5	Diseño para su implementación	40
5.1	Dependencias	40
5.2	Edificación	44
5.3	Implementación de los servicios básicos	45
5.3.1	Sistema de ventilación y extracción de aire	45
5.3.1.1	Renovación de aire	46
5.3.1.2	Flujos críticos	47
5.3.1.3	Pérdidas de carga	51
5.3.2	Mobiliario	52
5.3.3	Red de gases	53
5.3.4	Red eléctrica	55
5.3.5	Red de agua	57
6	Recomendaciones para construcción e implementación	58
6.1	Materiales a utilizar	58
6.2	Consideraciones para la construcción e implementación	58
7	Conclusiones	60
8	Referencias	62
9	Bibliografía	62
10	Anexos	66
10.1	Anexo 1	66
10.2	Anexo 2	71
10.3	Anexo 3	72

Índice de figuras

Figura 1: Set up experimental [9].	13
Figura 2: Set up adquisición de datos [10]	14
Figura 3: Set up llamas premezcladas de NH_3/H_2 /Aire de propagación esférica [14].	16
Figura 4: Set up quemador MPI NH_3/H_2 /air [17].	18
Figura 5: Cámara de combustión [18].	18
Figura 6: Set up experimental con MPI [19].	19
Figura 7: Set up de experiencias previas [20].	20
Figura 8: Set up 5 NH_3/H_2 con MPI [21].	21
Figura 9: Rango de inflamabilidad del amoníaco, hidrógeno, metanol, GNL y GLP. Fuente:[27]	24
Figura 10: Energía mínima de ignición del amoníaco, hidrógeno, metanol, GNL y GLP. Fuente:[27].	25
Figura 11: Temperatura de autoignición del amoníaco, hidrógeno, metanol, GNL y GLP. Fuente:[27].	25
Figura 12: Distintivo de seguridad gases tóxicos[33]	28
Figura 13: Distintivos de riesgos de materiales [35]	29
Figura 14: Señal según NCh 1411/4 [35].	29
Figura 15: Esquema prototipo del MPI.	34
Figura 16: Esquema set up experimental a utilizar.	35
Figura 17: Micro-Turbina Instalada laboratorio en South África.	36
Figura 18: Modelo propuesta set-up Mico-turbina.	36
Figura 19: Imagen satelital ubicación laboratorio. Coordenadas: -33.03172, -71.46084	40
Figura 20: Imagen vista superior vista emplazamiento L.E.R.	41
Figura 21: Vista superior área destinada.	41
Figura 22: Estado actual del baño.	42
Figura 23: Estado actual antesala	42
Figura 24: Estado actual entrada al baño.	42
Figura 25: Estado actual del terreno	42
Figura 26: Circulación en las dependencias	43
Figura 27: Modelado 3D edificación.	44
Figura 28: Vista superior edificación	45
Figura 29: Extractor de 1.500 m^3/hr	46
Figura 30: Extractor de 2.000 m^3/hr	46
Figura 31: Gráfico PPM de NH_3 vs Tiempo.	48
Figura 32: Modelado 3D con sistema de extracción e inyección.	49
Figura 33: Ubicación de la extracción secundaria en modelado 3D.	49
Figura 34: Flujo de aire dentro del laboratorio.	50
Figura 35: Vista superior del sistema de inyección y extracción.	50
Figura 36: Vista superior laboratorio con mobiliario.	52
Figura 37: Modelado de oficina/sala de monitoreo.	53
Figura 38: Diagrama P&ID del set up del quemador.	54

Figura 39: Acercamiento al modelado caseta de gases.	54
Figura 40: Consumo de potencia eléctrica.	55
Figura 41: Esquema del sistema eléctrico interno.	56
Figura 42: Esquema del sistema eléctrico externo.	56
Figura 43: Esquema red de agua.....	57
Figura 44: Plano con dimensiones generales edificación.	71
Figura 45: Gráfica para obtención de velocidad de aire[46].	72
Figura 46: Gráfica para obtención de presión dinámica[46].	73
Figura 47: Obtención factor n para entradas a conductos[46].	74
Figura 48: Obtención de factor n para carga en codos[46].....	75

Índice de tablas

Tabla 1: Características del diseño del laboratorio y bancos de pruebas.	4
Tabla 2: Propiedades físicas y químicas de NH_3 , H_2 y CH_4	11
Tabla 3: Niveles de exposición a la toxicidad del amoníaco [27].	23
Tabla 4: Niveles guía de exposición aguda al amoníaco. Fuente:[28]	23
Tabla 5: Capacidad de almacenamiento de sustancias peligrosas [27] [37].	30
Tabla 6: Tabla de renovaciones. Adaptación de Soler&Palau [44].	47
Tabla 7: Tabla cálculo de renovaciones según extracción.	47
Tabla 8: Flujos críticos de NH_3 para 5 y 10 min.	48
Tabla 9: Normativas internacionales existentes para el NH para sus distintas áreas [27].	66

GLOSARIO

H2	Hidrógeno
CO2	Dióxido de carbono
NH3	Amoniaco
CH4	Metano
FONDEF	Fondo de Fomento al desarrollo Científico y Tecnológico
FONDEQUIP	Fondo de Equipamiento Científico y Tecnológico
MPI	Medio poroso inerte
NFPA	Asociación Nacional de Protección contra Incendios
NOx	Óxidos de nitrógeno
AEGL	Acute Exposure Guideline Levels
EPA	Acute Exposure Guideline Levels
GNL	Gas Natural Licuado
GLP	Gas Licuado Petroleo
SGA o GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals.
PSM	Process Safety Management
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
IMO	International Maritime Organization
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
IGC Code	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk
IGF Code	International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels
DNV	Det Norske Veritas
ABS	American Bureau of Shipping
AiP	Approval in Principle
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CGA	Compressed Gas Association
ISO	International Organization for Standardization
SCC	Stress Corrosion Cracking

1 Introducción

Desde la época de la revolución industrial, la combustión ha desempeñado un papel fundamental en la transformación de la energía para las actividades humanas y el transporte. Hasta el momento actual, estos sectores siguen generando energía a partir de los hidrocarburos [1].

El Acuerdo de París, que se implementó en noviembre de 2016, representa el primer consenso global en la historia en relación con el cambio climático, con la participación de más de 190 países en todo el mundo. Su propósito central es alcanzar una sociedad descarbonizada tan pronto como sea posible durante la segunda mitad de este siglo. En términos de energía, el Acuerdo de París defiende posicionar a las energías renovables como la fuente principal para lograr la descarbonización [2]. Más de 120 países y regiones en todo el mundo han declarado su objetivo de lograr la neutralidad de carbono para el año 2050, y todos los países han asumido el compromiso de buscar fuentes de energía renovable que puedan reemplazar a los combustibles fósiles.

En las últimas décadas, la energía del hidrógeno ha captado considerable interés e investigación como un vector energético óptimo [3]. El hidrógeno (H_2) no genera dióxido de carbono (CO_2) durante su combustión, lo que lo convierte en una opción ambientalmente amigable. No obstante, la naturaleza altamente reactiva del H_2 lo vuelve potencialmente peligroso durante su manipulación y combustión, lo que limita su adopción generalizada como fuente de energía [4]. En este contexto, el amoníaco (NH_3) ha ganado atención en el ámbito energético como combustible, ya que puede contribuir a la reducción de emisiones de CO_2 debido a su abundante contenido de hidrógeno, sirviendo como portador de hidrógeno y sin emitir CO_2 directamente al quemarse. El NH_3 presenta todas las características deseables para combustibles convencionales: es económico, fácil de obtener, volátil, almacenable, poco contaminante, y es relativamente compatible con materiales comunes [5]. Se muestran las propiedades físicas y químicas del NH_3 , H_2 y CH_4 en la **Tabla 1** [6], [7].

Tabla 2: Propiedades físicas y químicas de NH_3 , H_2 y CH_4 .

Parámetro característico	NH_3	H_2	CH_4
Densidad (g/L)	0.771	0.089	0.716
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	18.6	120	50
Temperatura de ebullición crítica (°C)	-33.4	256	161
Temperatura de llama adiabática (°C)	1800	2100	1950
Límite inflamable (ϕ)	0.6-1.4	0.1-7.1	0.5-1.7
Velocidad laminar de combustión (cm/s)	7	291	37
Temperatura mínima de autoignición (°C)	650	520	630

Los desafíos principales para la incorporación directa de NH_3 en sistemas de combustión incluyen su elevado calor de vaporización, bajo poder calorífico, energía mínima de ignición elevada, temperatura de autoignición alta, velocidad de combustión lenta, rango de inflamabilidad estrecho y baja temperatura adiabática de la llama. Otros factores limitantes abarcan un tiempo de retardo de ignición elevado, baja intensidad de radiación y, lo más significativo, debido a la presencia de nitrógeno en el NH_3 , la combustión genera una considerable cantidad de emisiones de NO_x .

Con el fin de llevar a cabo investigaciones y estudios que aborden los desafíos fundamentales asociados con la utilización directa del amoníaco como combustible, se requiere un espacio de trabajo adecuado. Este entorno debe cumplir con las normativas vigentes para el manejo de gases, la utilización de espacios, la instalación de casetas, sistemas de extracción, entre otros aspectos. Estas normas se aplicarán integralmente en la creación del primer laboratorio destinado principalmente a investigar los procesos de combustión de amoníaco en Chile.

En el contexto de los proyectos FONDED IDeA, titulado "Prototipo de quemador dual de amoníaco-hidrógeno verde para la descarbonización del sector de generación eléctrica", y el proyecto FONDEQUIP llamado "Micro-turbina a gas: Equipamiento científico-tecnológico para desarrollar sistemas de generación eléctrica en base a combustibles verdes.", se está llevando a cabo el desarrollo de un laboratorio que será instalado en el Laboratorio de Energías Renovables. En este contexto, se delinean los siguientes objetivos.

1.1 Objetivo general

- Diseño de un laboratorio y banco de pruebas para procesos de combustión amoníaco – hidrógeno.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte de experiencias prácticas de combustión de amoníaco en laboratorios a nivel internacional.
- Analizar normas nacionales e internacionales aplicables a procesos de combustión de amoníaco.
- Establecer requisitos de diseño para el laboratorio, caseta de gases y líneas de suministro de amoníaco, hidrógeno, aire y agua.
- Proponer un layout y crear sus planos para las instalaciones requeridas y operación segura de quemadores.
- Realizar recomendaciones para la construcción e implementación de quemadores con sus sistemas de seguridad.

2 Estado del arte para el diseño

2.1 Combustión de amoniaco

En respuesta al creciente y grave problema del cambio climático, el desarrollo de combustibles sin carbono se presenta como una oportunidad crucial en el marco de la reducción global de las emisiones de carbono. La combustión de NH_3 desempeña un papel significativo en la construcción de un sistema energético con bajas emisiones de carbono y se considera una tecnología puntera para lograr una reducción sustancial de las emisiones de carbono a nivel mundial [8]. Aunque la utilización de NH_3 en lugar de los combustibles fósiles convencionales es reconocida como una tecnología innovadora para lograr una reducción masiva de las emisiones de carbono, también presenta limitaciones importantes, como la **baja estabilidad, la velocidad de combustión reducida y la emisión elevada de NO_x** , aspectos que requieren abordarse en su implementación y desarrollo continuo.

Dentro de esta materia, se han llevado a cabo diversos experimentos que emplean el amoniaco en procesos de combustión con el propósito de investigar las limitaciones previamente mencionadas. A continuación, se presentarán algunas de estas experiencias, seleccionadas tanto por su relevancia para el desarrollo específico de este proyecto como por su enfoque en comprender las razones detrás de las limitaciones mencionadas anteriormente.

2.1.1 Experiencia A

La velocidad de combustión laminar es esencial para analizar y prever el proceso de combustión en cámaras de combustión, siendo crucial para guiar el diseño óptimo de estas [8]. En el ámbito de la investigación fundamental, este parámetro es clave para validar el mecanismo de reacción química durante la combustión y establecer modelos matemáticos sólidos para procesos de combustión premezclada, proporcionando datos esenciales para simulaciones. Desde la perspectiva de la ingeniería, la velocidad de combustión laminar afecta la eficiencia global del sistema de combustión y constituye una base esencial para la predicción teórica del proceso de combustión, así como para investigar el mecanismo de generación de productos de combustión.

Uno de los principales factores que limitan la aplicación del NH_3 en los sistemas de combustión es su baja velocidad de combustión laminar. Y el límite de estabilidad de la llama de NH_3 /aire es sumamente bajo [9].

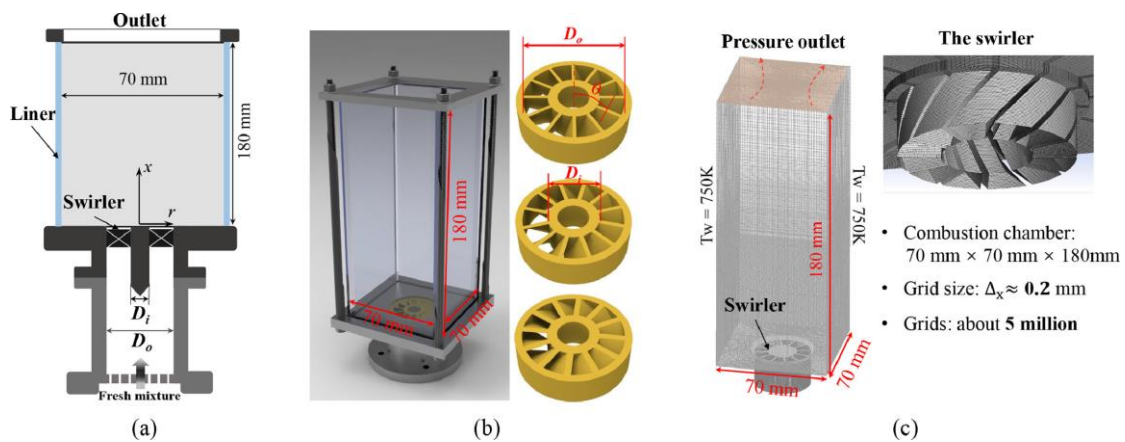


Figura 1: Set up experimental [9].

En los experimentos, se utiliza una cámara de combustión de acero inoxidable con remolino completamente premezclado para estabilizar la llama. Las Figuras 1(a) y (b) presentan el esquema de la sección de cabeza de la cámara de combustión, la camisa y los remolinos utilizados en los experimentos. La geometría general es similar a la empleada en estudios previos, que se detalla en la referencia [10]. La principal adición a la cámara de combustión de remolino anterior es la inclusión de una camisa que confina la llama. En la sección de mezcla del quemador, el combustible y el aire se premezclan por completo. Posteriormente, la mezcla atraviesa una tobera Venturi para evitar la propagación de ondas de presión aguas abajo. Justo después de la tobera Venturi, se instala una placa perforada para rectificar el flujo. Además, el remolino se coloca justo debajo de la salida del quemador. La camisa cuadrada, equipada con cristal de cuarzo en los cuatro lados para visualizar la llama y permitir el diagnóstico láser, se muestra en la Figura 1(b). En esta figura, se presentan tres tipos de generadores de torbellino de cobre con 12 álabes.

Para la adquisición de datos se utilizó el siguiente set up.

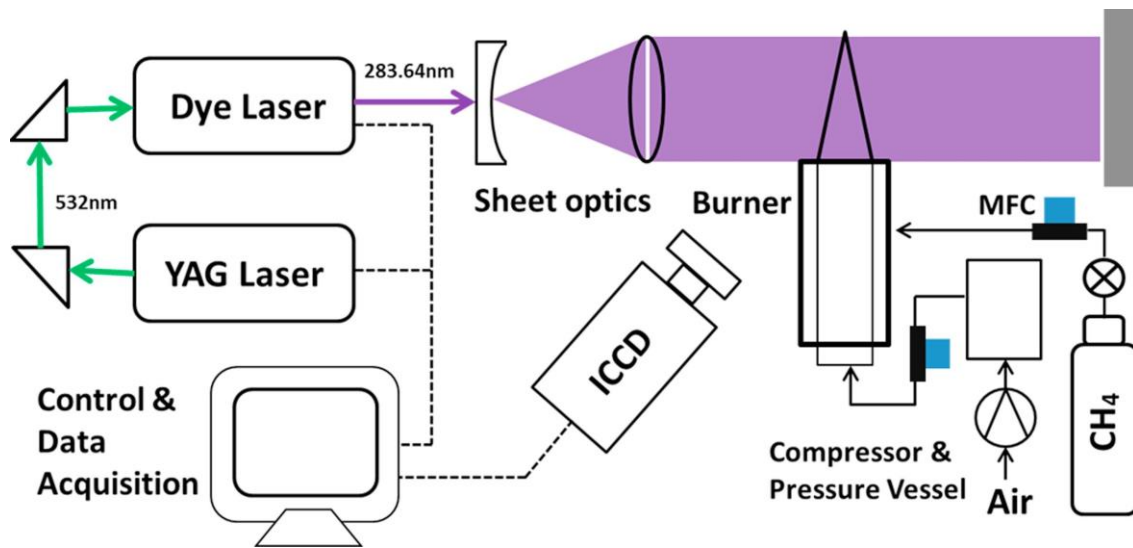


Figura 2: Set up adquisición de datos [10]

Se miden la velocidad del gas caliente y el perfil de OH mediante las técnicas PIV (Particle Image Velocimetry) y OH-PLIF (Planar Laser-Induced Fluorescence), respectivamente.

Para la PIV, se utiliza un láser Nd:YAG de doble cavidad con una longitud de onda de 532 nm, generando pulsos de 300 mJ a 10 Hz. Se emplea TiO_2 como partícula de siembra. Una cámara CCD captura el movimiento de las partículas con una resolución de 1600×1200 píxeles. La dispersión es recogida por la CCD con un objetivo macro y filtrada con un filtro de paso de banda estrecha.

El sistema OH-PLIF utiliza un láser Nd:YAG, un láser de colorante bombeado, una cámara ICCD y software de adquisición de datos. El láser emite a 532 nm, 10 Hz y 5 W. Una lámina láser de 0,5 mm de espesor y 80 mm de altura se forma con elementos ópticos. La fluorescencia OH (alrededor de 308 nm) se detecta mediante una cámara ICCD con un objetivo UV, óptica de relé intensificada y un filtro de paso de banda OH. La resolución de la imagen OH-PLIF es de 1200×900 píxeles.

Las imágenes directas de la llama se graban con una cámara Cannon Kiss X5 y un objetivo de focal fija para captar el estado medio de la llama. [10].

En este experimento se investiga el comportamiento de soplado, así como el comportamiento de transición de la macroestructura de la llama tanto para la llama de amoníaco/aire, como para la llama de

amoníaco/metano/aire (llama 50% NH_3). Es de suma importancia destacar que este experimento es comparado con resultados y modelados numéricos.

También se han realizado experimentos donde se investigaron las propiedades fundamentales de la llama de mezclas de amoníaco/metano/aire utilizando llamas esféricas en expansión en una cámara de presión constante. Se registraron las velocidades de llama laminar, las longitudes de Markstein y los límites de inflamabilidad para mezclas de combustible de amoníaco/metano con relaciones de equivalencia que variaban de 0,6 a 1,4, a temperatura ambiente (298 K) y diferentes presiones (1,0, 5,0 atm). Obteniendo como resultado que, al mezclar metano con amoníaco, **aumentaban los rangos de operación estable y aumento tanto de la temperatura como de la velocidad laminar de la llama y de igual manera emitiendo menos CO_2 que al estar combustionando CH_4 puro** [11].

Con llamas solo de amoníaco/aire y de set ups muy similares también se han realizado experimentos obteniendo los siguientes resultados:

- Estabilidad de la Llama: La llama premezclada de amoníaco/aire pudo estabilizarse para varias relaciones de equivalencia y condiciones de velocidad de flujo de entrada en un quemador de remolino. Esto es notable dado que la velocidad de combustión laminar del amoníaco es reconocidamente lenta.
- Límites de Combustión: A pesar de la lentitud de la velocidad de combustión laminar del amoníaco, los límites de combustión pobre y rica de la llama premezclada se acercaron a los límites de inflamabilidad de la llama de amoníaco. Este resultado sugiere que la llama de amoníaco puede mantenerse estable en una variedad de condiciones sin necesidad de aditivos para mejorar la reacción del amoníaco.
- Características de Emisión: Se empleó un analizador de gases FTIR para examinar las características de emisión. Se observó que la concentración de óxidos de nitrógeno (NO) disminuyó, mientras que la concentración de amoníaco aumentó en condiciones ricas. Se identificó una relación de equivalencia específica en condiciones ricas en la que las emisiones de NO y amoníaco se encontraron en el mismo orden.

Estos resultados indican que la llama premezclada de amoníaco/aire estabilizado por remolino muestra una notable estabilidad y comportamiento de emisión bajo diversas condiciones, lo que respalda su viabilidad como una opción para su uso como combustible y portador de energía [12].

Es de suma importancia destacar que estos experimentos son comparados con resultados y modelados numéricos [13].

2.1.2 Experiencia B

El experimento que se muestra a continuación se utiliza mezcla de amoníaco e hidrogeno para estudiar la velocidad de llama en esta mezcla.

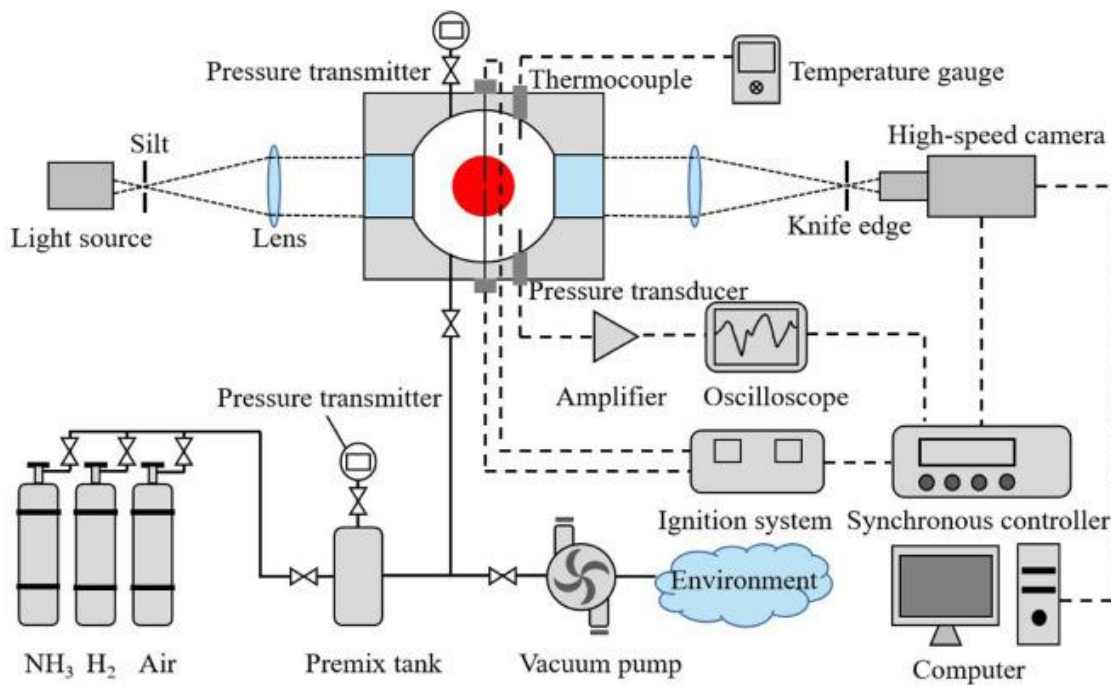


Figura 3: Set up llamas premezcladas de $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{Aire}$ de propagación esférica [14].

El sistema experimental se presenta de manera esquemática en la Figura 3, compuesto principalmente por una cámara esférica de combustión de volumen constante, una cámara de premezcla de gas, un sistema de cinematografía schlieren de alta velocidad, un sistema de registro de presión, un sistema de ignición y un controlador de sincronización. La cámara de combustión tiene un volumen de 4,2 litros con un diámetro interior de 200 mm y está equipada con dos ventanas ópticas de cuarzo de 80 mm de diámetro ubicadas en posiciones opuestas. La cámara de premezcla, con un volumen tres veces mayor (12,6 L), contiene un agitador magnético. El sistema de cinematografía schlieren utiliza una fuente de luz LED, una rendija, una cuchilla, dos lentes de enfoque (120 mm) y una cámara de alta velocidad (Photron FASTCAM SA-Z).

La presión en la cámara durante la propagación de la llama se registra mediante un transductor de presión (Kistler 601CAA) y un registrador de memoria (HIOKI). La ignición se logra mediante un par de electrodos de tungsteno y un sistema de ignición por descarga de condensador (CDI), con electrodos de 1,5 mm de diámetro montados verticalmente en el centro de la cámara. La energía electrostática se ajusta según la proporción de hidrógeno, variando de 0,3 a 1,0 J. El sistema de sincronización controla el registrador de presión, la cámara de alta velocidad y el encendedor de chispas.

Antes de cada experimento, ambas cámaras se reducen a 0,1 Torr, y la mezcla de NH_3 , H_2 y aire sintético se ajusta según la ley de Dalton de la presión parcial. La mezcla se homogeneiza en la cámara de premezcla mediante un agitador magnético a 100 r/min durante 30 minutos y luego se introduce en la cámara de combustión. La presión en la cámara de combustión se controla según el transmisor de presión. Se incorpora un retardo de 30 s antes del encendido para asegurar la mezcla en estado de reposo. Cada experimento se repite al menos tres veces en las mismas condiciones para garantizar la repetibilidad [14].

En este estudio sobre las llamas premezcladas de NH_3/H_2 /aire en propagación esférica, se exploraron la velocidad de combustión laminar, la longitud Markstein y la inestabilidad celular. Se observó que la velocidad de combustión laminar no estirada aumenta significativamente con la relación de hidrógeno, siendo su efecto sensible a la presión inicial en ciertos rangos de relación de equivalencia. Los resultados de la cinética química coinciden con las mediciones en condiciones específicas, destacando la necesidad de mejoras en los mecanismos de reacción.

La longitud Markstein mostró un aumento con la relación de equivalencia, con su positividad o negatividad atribuida al número de Lewis efectivo. La variación de la longitud Markstein con la relación de hidrógeno dependió de la disminución del número de Zel'dovich y del espesor de la llama, afectada negativamente por la presión inicial.

La inestabilidad celular aumentó en condiciones de quemado pobre, siendo influenciada por inestabilidades térmico-difusivas e hidrodinámicas. Se observó una mayor inestabilidad global de la llama con aumentos en la proporción de hidrógeno o la presión inicial, principalmente debido al incremento de la inestabilidad hidrodinámica [14].

2.1.3 Experiencia C

Uno de los elementos importantes en el desarrollo de este trabajo es conocer acerca de la combustión en medios porosos inertes, siendo un proceso en el cual se inserta un material poroso químicamente inerte en la zona donde se desarrolla la combustión. El flujo de mezcla aire-combustible atraviesa las porosidades del material y se quema al interior de ellas, saliendo posteriormente del material poroso los gases producto [15].

La combustión en medios porosos (MPI), ha demostrado ser una alternativa viable para abordar problemas como el agotamiento de los recursos de combustibles fósiles y la contaminación ambiental, mostrando mejoras notables tanto desde una perspectiva técnica como económica. En contraste con las llamas homogéneas, la combustión en medios porosos se caracteriza como un proceso interno autoorganizado de recuperación de calor. Esta distinción se atribuye a factores clave: en primer lugar, la presencia de una superficie interna altamente desarrollada en el medio poroso sólido, el cual facilita una transferencia de calor eficiente entre el medio combustible y el sólido inerte; en segundo lugar, la dispersión del reactivo a través del medio poroso aumenta la difusión efectiva y mejora la transferencia de calor entre las fases, activando así un método interno de recuperación de energía. Este proceso posibilita la combustión con estabilidad en diversas condiciones, como diferentes velocidades del reactante, relaciones oxidante/combustible y cargas de potencia. A medida que la eficiencia de la combustión mejora, se reduce al mínimo la posibilidad de formación de NO_x y CO . En este contexto, un material poroso se define como aquel con huecos conectados, permitiendo que el flujo se desplace fácilmente a través del medio [16].

A continuación, se presenta uno de los esquemas de experimentos que combustionan mezclas de combustibles a través de MPI.

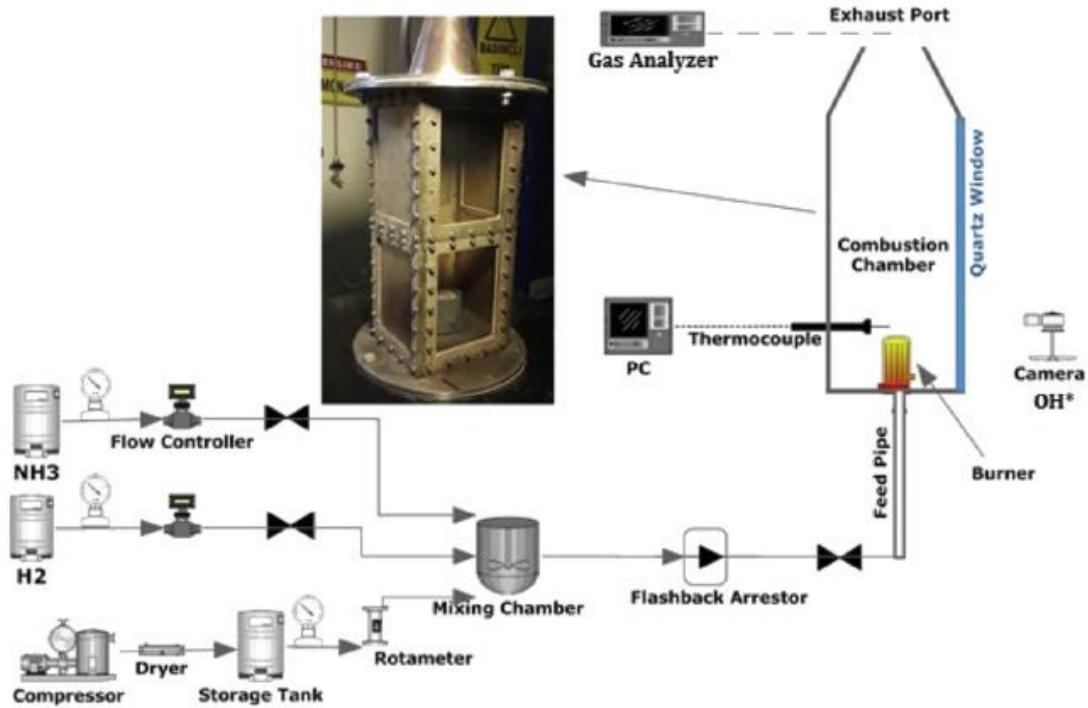


Figura 4: Set up quemador MPI NH₃/H₂/air [17].

Para los estudios experimentales se construyó una cámara de combustión, para experimentos previos de combustión premezclada estabilizada por remolino [18].



Figura 5: Cámara de combustión [18].

El estudio se basa en la modificación de un banco de pruebas de combustión atmosférica premezclada para llevar a cabo experimentos con amoníaco. La cámara de combustión, ilustrada en la Figura 5, genera un chorro premezclado mediante un tubo de alimentación, encendido por chispa en un quemador poroso. Se introducen hidrógeno y amoníaco en el sistema a caudales controlados, y el aire se suministra mediante depósitos con un compresor. La llama se estabiliza en un quemador poroso de SiC inerte. Se utilizan diversas herramientas, como termopares y analizadores de gases, para medir la temperatura y las emisiones. El estudio se enfoca en replicar condiciones prácticas y aislar la llama de corrientes de aire. Se

emplea la técnica de quimioluminiscencia OH^* para evaluar el comportamiento de la llama, capturando imágenes bidimensionales. Los experimentos se realizan bajo condiciones específicas de temperatura, presión y composición de la mezcla, y se aplican procedimientos repetidos para minimizar errores de medición.

A través de estos experimentos de combustión realizados con un quemador a escala de laboratorio han demostrado **una combustión estable y altos rendimientos a niveles de concentración de amoníaco considerablemente elevados**, abarcando una amplia variedad de relaciones de equivalencia. Además, se lograron densidades de potencia significativas. Los resultados preliminares de las mediciones de emisiones de NO_x indican concentraciones tan bajas como 35 ppm en condiciones ricas. La destacada capacidad de este quemador para operar eficientemente y con bajas emisiones a niveles elevados de concentración de amoníaco, alcanzados mediante el craqueo parcial del NH_3 , representa un importante avance en el desarrollo de la tecnología de combustión de amoníaco [17].

2.1.4 Experiencia D

Otro experimento desarrollado con medios MPI para resolver los inconvenientes como la elevada temperatura de ignición, la baja velocidad de llama y las elevadas emisiones de NO_x es el siguiente:

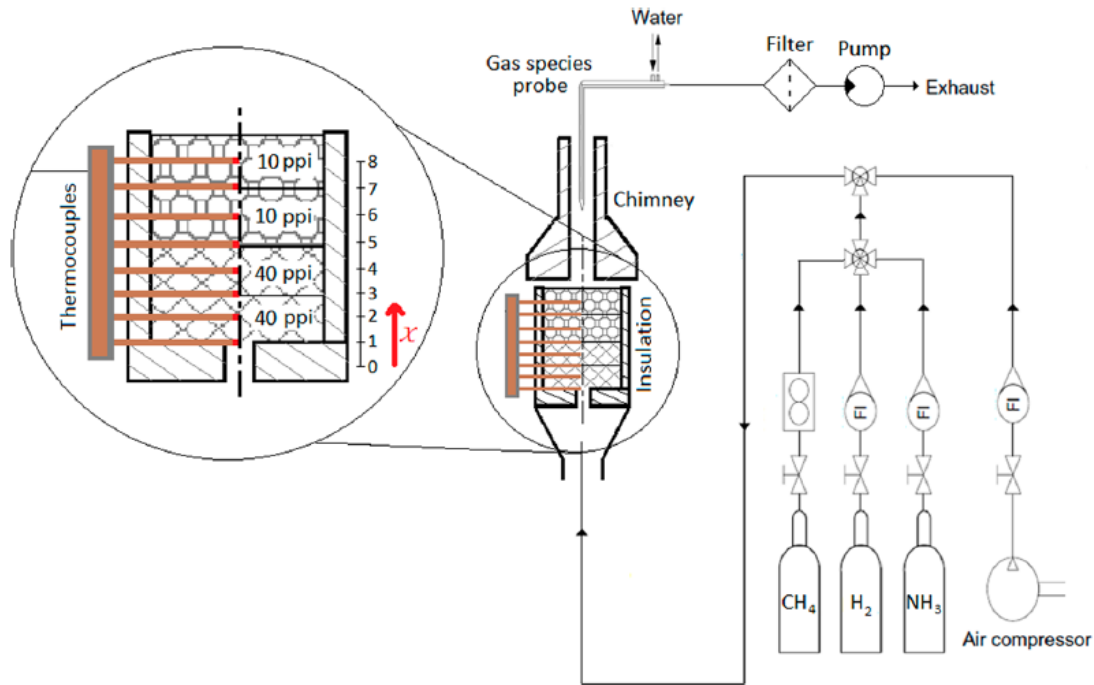


Figura 6: Set up experimental con MPI [19].

El núcleo del quemador está compuesto por un bloque poroso cilíndrico rodeado de lana cerámica, situado dentro de un recipiente cilíndrico de acero inoxidable. El bloque cerámico consta de cuatro capas de espuma porosa, dos de alúmina (Al_2O_3) y dos de circonio (ZrO_2), cada una con un diámetro de 70 mm y una altura de 20 mm, sumando una altura total de 80 [mm]. Las dos capas inferiores tienen 40 poros por pulgada (ppi), mientras que las dos superiores tienen 10 ppi. Esta disposición permite estabilizar un frente de llama entre ambas regiones, ambas con una porosidad volumétrica del 80%. En la base del núcleo, hay otra placa aislante con un canal central para inyectar los gases premezclados. En la parte superior, hay una chimenea para evacuar los gases de combustión.

El amoníaco se introduce en la entrada del quemador junto con aire y CH_4 o H_2 , y todos los caudales se miden con controladores de caudal másico. Las temperaturas dentro de los medios porosos se midieron utilizando una columna vertical de ocho termopares tipo R (Pt/Pt-13% Rh) a lo largo de la línea central vertical, con distancias de 1 cm entre termopares adyacentes. La toma de muestras de los gases de escape se realizó desde la línea central de la chimenea utilizando una sonda de acero inoxidable refrigerada por agua. El análisis de la composición de los gases se llevó a cabo mediante diversos analizadores, y las mediciones de gas se realizaron al menos tres veces para cada condición, sin relación entre ellas [19].

Este set up fue utilizado previamente en otras experiencias [20].

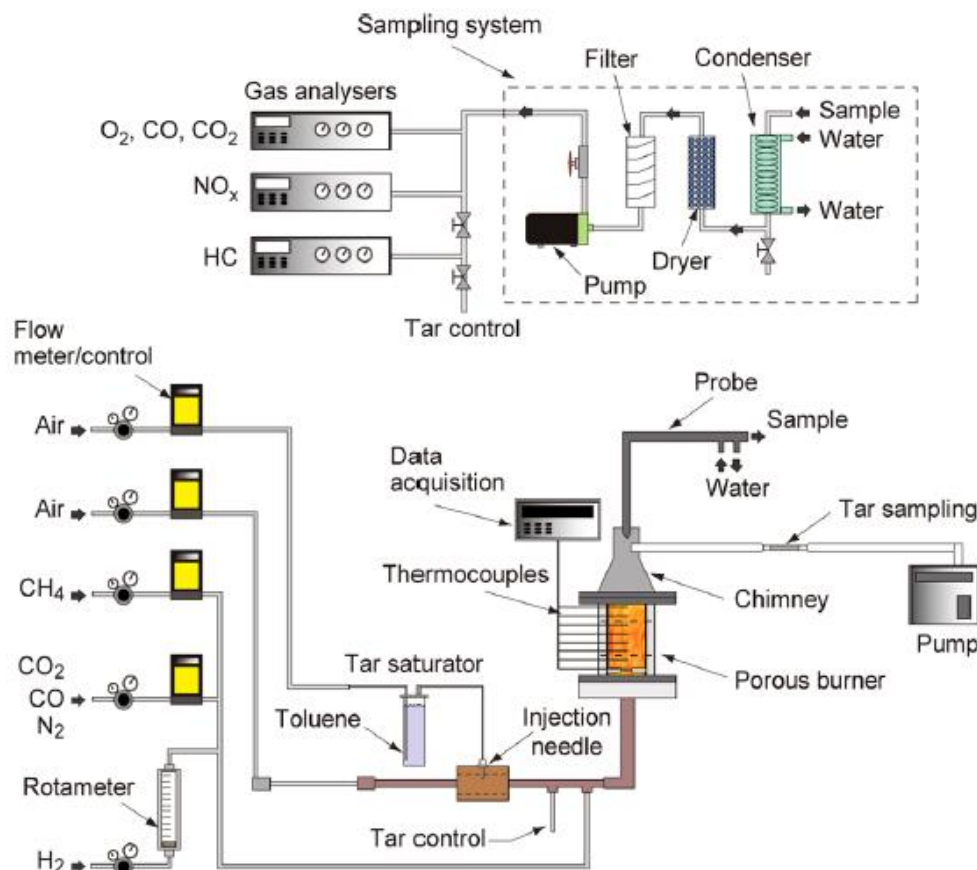


Figura 7: Set up de experiencias previas [20].

En términos sencillos en la experiencia de la Figura 6, se evaluaron llamas premezcladas de mezclas de amoníaco con metano o hidrógeno junto con aire. Se analizaron las emisiones de óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y amoníaco en los gases de escape para entender cómo varían con la composición del combustible. También se midieron las temperaturas a lo largo del quemador. Obteniendo principalmente que las emisiones de NO_x son elevadas en ciertas mezclas, especialmente en presencia de NH_3 . Además, se observa una combustión incompleta del NH_3 en algunas condiciones. Los resultados experimentales coinciden en general con las simulaciones, pero hay discrepancias en las predicciones de NO_x y CO . Se destaca que la formación y destrucción de NO están influenciadas por la química del amoníaco, y se sugiere que mezclas ricas en combustible podrían reducir las emisiones de NO mediante procesos específicos [19].

2.1.5 Experiencia E

Otra de las experiencias que hace uso de MPI con mezclas de combustible, principalmente NH_3/H_2 es el que se muestra a continuación.

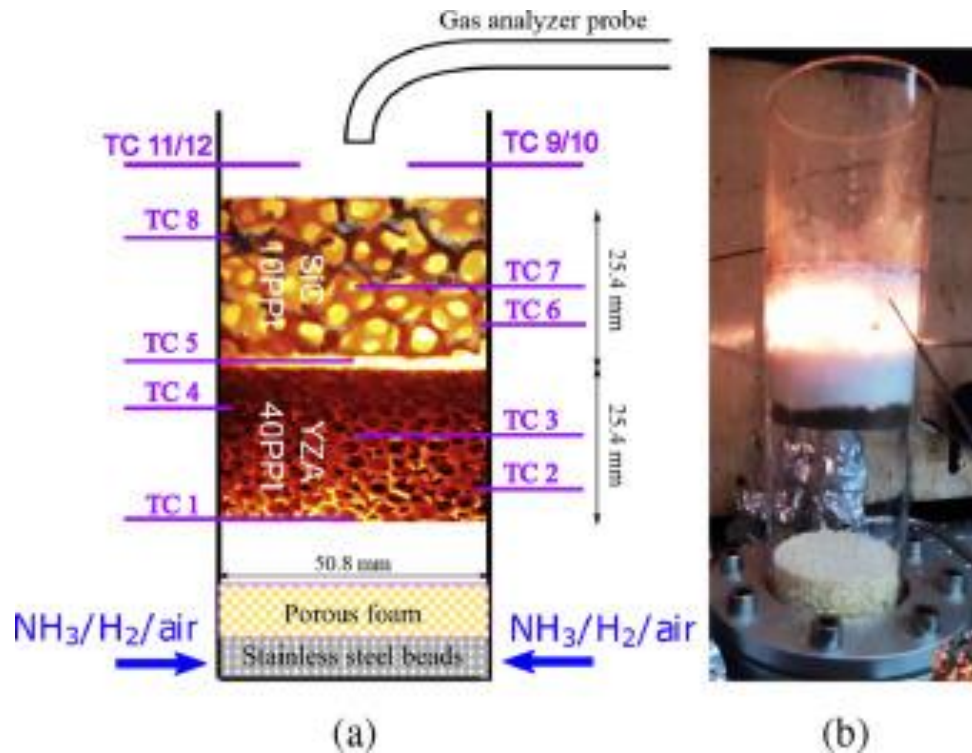


Figura 8: Set up 5 NH_3/H_2 con MPI [21].

El dispositivo consta de dos bloques de espuma cerámica, cada uno con un diámetro de 50.8 mm y espesor de 25.4 mm. La sección aguas arriba está hecha de YZA (circonio estabilizado con itria, Selee, Hendersonville, NC, EE.UU.) con 40 poros por pulgada (PPI) y se utiliza como supresor de retroceso de llama. La sección inferior es de SiC (Ultramet, Pacoima, CA, EE.UU.) con 10 PPI y alberga la llama. Este quemador está diseñado para generar una llama estabilizada por interfaz cerca del límite entre los dos bloques[22] [23]. Ambas espumas cerámicas se envuelven en una manta de fibra cerámica aislante y se colocan en un tubo de cuarzo. En la base del quemador, se emplean perlas de acero inoxidable y un bloque de espuma porosa para homogeneizar el flujo. La regulación del flujo de reactivos al quemador se realiza mediante un conjunto de controladores de flujo másico (Alicat, Tucson, AZ, EE.UU., precisión relativa del 0,6% para el presente experimento). Se utilizan NH_3 y H_2 con una pureza del 99,995%. Las incertidumbres asociadas con las relaciones de equivalencia y los caudales másicos comunicados son del 2,1%. Todos los experimentos se llevan a cabo a presión atmosférica y los reactivos se suministran a temperatura ambiente [21].

Figura 8. (a) Esquema del quemador (no a escala). Los termopares están colocados en forma helicoidal y se muestran en color morado. TC1-TC8 se insertan en la espuma porosa y están en contacto directo con la matriz cerámica. Los TC9-TC11 están equidistantes a la salida del quemador y miden la temperatura de los gases de escape. (b) Imagen del quemador durante su funcionamiento. La mayoría de los termopares y el analizador de gases se retiraron para la foto [21].

En este estudio, se explora el uso de quemadores de medios porosos para estabilizar las llamas en mezclas pobres de NH_3/H_2 /aire. Al lograr la estabilidad de la llama en la interfaz entre dos espumas cerámicas

térmicamente conductoras, se promueve la recirculación interna de calor, precalentando los reactantes y aumentando la velocidad de la llama. Este proceso amplía los límites de estabilidad de la combustión en mezclas extremadamente pobres de $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{aire}$.

Los estudios experimentales abordan la determinación de los límites de estabilidad de la combustión en medios porosos, explorando diversas relaciones de volumen NH_3/H_2 , relaciones de equivalencia y flujos de masa. Se destaca la influencia significativa de la relación NH_3/H_2 , con una dependencia característica de la relación de equivalencia en el proceso de extinción. Se observó que las emisiones de NO_x alcanzaban su punto mínimo cuando el quemador operaba cerca de su límite de extinción, aumentando con el incremento de los índices de flujo másico. En condiciones de operación muy pobres, donde las emisiones de NH_3 sin quemar se mantenían notablemente bajas (1.400 ppm), se reveló que este régimen de funcionamiento presenta emisiones similares o incluso mejores en comparación con los enfoques convencionales de alta carga de combustible sugeridos en la literatura especializada.

3 Normas aplicables en el proceso de combustión de NH_3

En el contexto de este proyecto, es fundamental comprender tanto el ámbito como el marco teórico en los que se desenvolverá. Una parte esencial de este entendimiento radica en conocer las normativas que regirán el desarrollo, asegurando así que todas las fases se lleven a cabo de manera segura y en plena conformidad con los requisitos legales. En este sentido, se explorarán tanto las normativas nacionales como las internacionales relacionadas con el manejo y la combustión de amoníaco. Este análisis no solo proporcionará una base legal sólida para el proyecto, sino que también garantizará que se cumplan los estándares y prácticas reconocidas a nivel global en la manipulación de este compuesto.

3.1 Consideraciones de seguridad y estándares internacionales

3.1.1 Toxicidad

La clasificación del amoníaco como sustancia tóxica por parte de la Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) de Estados Unidos lo posiciona como un químico de alto riesgo para la salud [24]. Los límites aceptables de exposición humana suelen ser determinados por concentraciones y tiempo de exposición. El límite inferior se sitúa entre 25-50 [ppm], sin consecuencias graves para la salud, mientras que concentraciones superiores a 300 [ppm] se consideran peligrosas [25]. En la UE, los límites son de 20 [ppm] para una exposición de 8 horas y 50 [ppm] para 15 minutos, mientras que la Administración de Seguridad y Salud en el Trabajo (OSHA) de EE. UU. establece en 300 [ppm] el nivel de exposición sin efectos irreversibles. La exposición a concentraciones muy elevadas de amoníaco gaseoso puede causar daños pulmonares irreversibles y, eventualmente, la muerte, con un límite de 5.000 [ppm] (0,5%) [26]. A continuación, se detallan los efectos de la exposición al amoníaco en función de su concentración en el aire:

Tabla 3: Niveles de exposición a la toxicidad del amoníaco [27].

Concentración de NH ₃ en el aire (volumen)	Efecto
20 – 50 ppm	Olor levemente detectable, dependiendo si la persona está acostumbrada a oler amoníaco.
50 – 100 ppm	No hay deterioro de la salud en caso de exposición prolongada.
400 – 700 ppm	Irritación severa de ojos, oídos, nariz y garganta. Sin efecto duradero en caso de exposición breve.
2.000 – 3.000 ppm	Peligroso, menos de media hora de exposición puede ser fatal.
5.000 – 10.000 ppm	Edema grave, estrangulamiento, asfixia, rápidamente fatal

Asimismo, basándonos en los niveles guía de exposición aguda (AEGL) establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos para sustancias químicas en el aire, es posible identificar los límites de exposición al amoníaco según se detalla en la Tabla 3:

Tabla 4: Niveles guía de exposición aguda al amoníaco. Fuente:[28] .

Ammonia 7664-41-7, Expresado en ppm					
	10 min.	30 min.	60 min.	4 horas	8 horas
AEGL 1	30	30	30	30	30
AEGL 2	220	220	160	110	110
AEGL 3	2.700	1.600	1.100	550	390

Donde los niveles de exposición están definidos de la siguiente manera:

- **AEGL 1:** Molestia notable, irritación o ciertos efectos asintomáticos no sensoriales. Sin embargo, los efectos son transitorios, no son incapacitantes, y se consideran reversibles al finalizar la exposición.
- **AEGL 2:** Efectos irreversibles u otros efectos adversos graves y duraderos para la salud o una capacidad de escape disminuida.
- **AEGL 3:** Efectos sobre la salud que ponen en peligro la vida.

Otra propiedad importante a considerar es que el amoníaco presenta carácter higroscópico, lo que implica su tendencia a buscar la presencia de agua en su entorno, incluso en el cuerpo humano. Específicamente, las áreas más susceptibles a una exposición al amoníaco son los ojos, los pulmones y la piel, debido a su elevado contenido de humedad. Este aspecto se vincula estrechamente con las fatalidades asociadas al amoníaco anhidro, las cuales se atribuyen principalmente a la asfixia: la inhalación de grandes cantidades provoca inflamación en la garganta, ocasionando daños significativos en el sistema respiratorio. Además, la exposición a los vapores o al líquido también puede resultar en la pérdida de la visión [26].

Asimismo, el amoníaco en forma gaseosa exhibe una notable ligereza en comparación con el aire, representando el 60% de su densidad [29]. En caso de una fuga eventual, tiende a elevarse y dispersarse rápidamente en el aire seco. No obstante, su marcada afinidad por el agua genera una reacción inmediata con la humedad del ambiente, lo que puede resultar en una permanencia cercana al suelo, complicando la dispersión en el entorno. Por consiguiente, resulta esencial contar con sistemas de detección de fugas y una ventilación idónea al manejar amoníaco.

3.1.2 Inflamabilidad

En ambientes exteriores, la presencia de amoníaco gaseoso rara vez representa un riesgo de incendio; no obstante, en entornos interiores, especialmente en espacios confinados, el riesgo de ignición se incrementa, especialmente en presencia de aceites u otros materiales combustibles. Además, los recipientes presurizados destinados al almacenamiento de amoníaco pueden experimentar explosiones cuando se ven expuestos a niveles elevados de calor [30]. Una fuente externa de calor significativo puede ocasionar la ebullición del amoníaco líquido dentro del tanque de almacenamiento, generando un aumento de la presión interna y, eventualmente, propiciando una explosión con liberación de amoníaco en el entorno circundante; estos eventos se conocen como Explosiones de Vaporización de Líquidos en Ebullición (BLEVE, por sus siglas en inglés).

No obstante, el amoníaco se considera un combustible con un riesgo de explosión reducido en comparación con el hidrógeno y otros combustibles convencionales. Al analizar el rango de inflamabilidad de varios combustibles en la Figura 9, se aprecia que el hidrógeno y el metanol poseen los rangos de inflamabilidad más amplios, mientras que el GNL, GLP y amoníaco presentan rangos considerablemente más limitados.

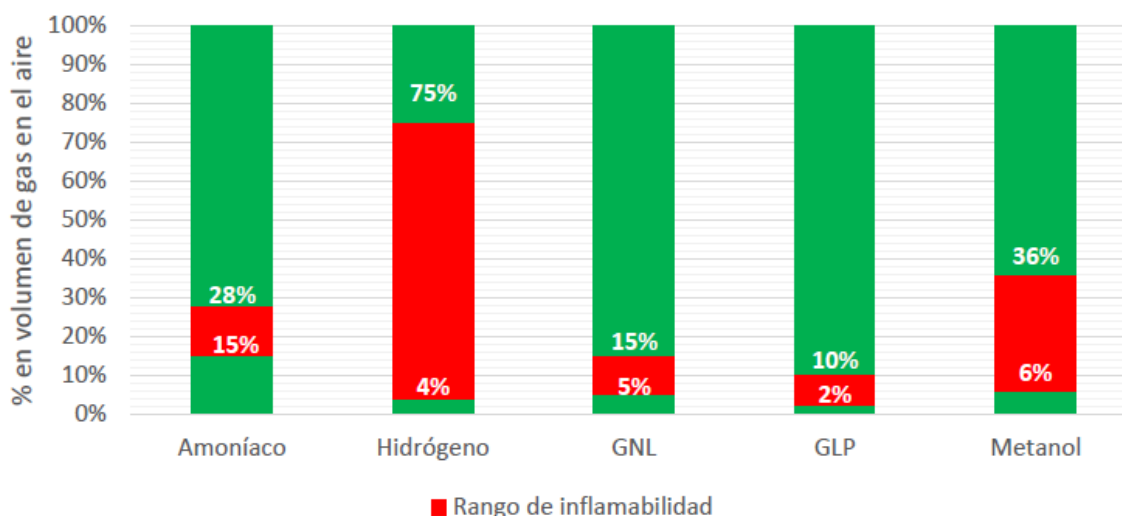


Figura 9: Rango de inflamabilidad del amoníaco, hidrógeno, metanol, GNL y GLP. Fuente: [27] .

Para reducir los riesgos de incendios o explosiones, es esencial implementar sistemas de dilución que eviten ingresar al rango de inflamabilidad cuando se utilizan superficies calientes o dispositivos de combustión en las cercanías de áreas donde se maneja o almacena amoníaco. La probabilidad y la gravedad de los riesgos de combustión del amoníaco se ven atenuadas en cierta medida debido a las características de reacción lenta del combustible. Específicamente, su energía mínima de ignición es relativamente alta, medida en 8 [mJ], lo que equivale a más de 25 veces la energía requerida para la ignición del metano y 400 veces más que la del hidrógeno (consultar Figura 10). Además, su elevada temperatura de autoignición (consultar Figura 11) implica que las exigencias de temperatura más baja cerca de los equipos eléctricos, para protección contra posibles explosiones, podrían ser menores en comparación con otros combustibles [25].

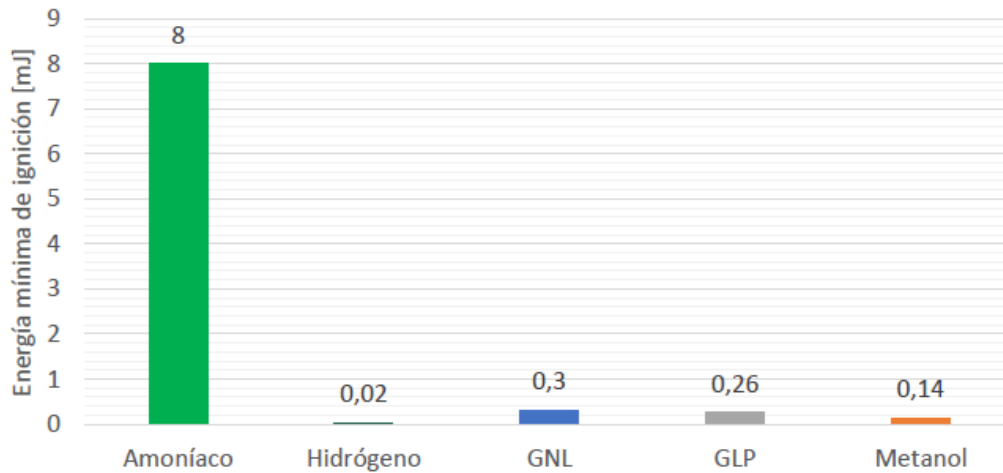


Figura 10: Energía mínima de ignición del amoníaco, hidrógeno, metanol, GNL y GLP. Fuente:[27].

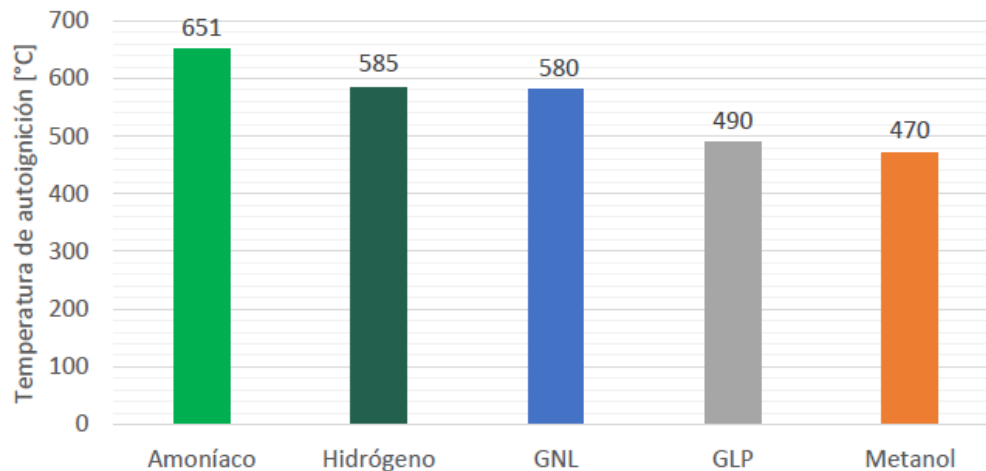


Figura 11: Temperatura de autoignición del amoníaco, hidrógeno, metanol, GNL y GLP. Fuente:[27].

En líneas generales, el amoníaco presenta menos desafíos asociados con la temperatura y los riesgos de explosión en comparación con los combustibles convencionales. Esto se debe a su elevada temperatura de autoignición, a que no se mantiene a temperaturas criogénicas, a su estrecho rango de inflamabilidad y a su alta energía mínima de ignición. No obstante, es importante señalar que el amoníaco, siendo un gas tóxico, puede resultar letal en concentraciones mucho menores que las necesarias para que sea inflamable (0,5% frente al 15% de la mezcla en el aire). Aunque los desafíos son distintos, la gestión de la seguridad del amoníaco es un tema reconocido a nivel internacional [27].

3.1.3 Corrosión

El amoníaco posee propiedades corrosivas, lo que implica que ciertos materiales, como el cobre, metales galvanizados, hierro fundido, aleaciones de cobre y zinc, pueden experimentar corrosión al estar en contacto con el amoníaco. La selección cuidadosa de materiales es crucial al trabajar con amoníaco; el acero y las aleaciones no ferrosas son opciones resistentes a este compuesto y se recomiendan para la construcción de tanques, tuberías y componentes estructurales en los que se emplee amoníaco. El Código IGC establece los requisitos para los elementos de las tuberías, los tanques de carga y los equipos que entran en contacto con el líquido o vapor de amoníaco en aplicaciones marítimas [31].

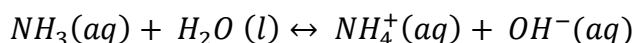
Adicionalmente, la presencia de oxígeno disuelto en el amoníaco líquido incrementa el riesgo de experimentar fenómenos de agrietamiento por corrosión bajo tensión, conocido como SCC (Stress Corrosion Cracking). Para prevenir la ocurrencia de estos fenómenos, es esencial implementar un proceso de purga de aire en los sistemas de almacenamiento de amoníaco antes de proceder al llenado. En algunos casos, también se considera la adición de una pequeña cantidad de agua, no menor al 0,2% en peso, como medida para reducir la probabilidad de SCC [26].

3.1.4 Impactos ambientales

Desde el punto de vista medioambiental, la producción y uso del amoníaco, principalmente en fertilizantes, han tenido impactos negativos en el equilibrio natural del nitrógeno en la Tierra. Gran parte del nitrógeno utilizado en fertilizantes no se absorbe en cultivos y alimentos, sino que se disemina en el suelo, aire y agua, causando problemas como la pérdida de biodiversidad y afectando la calidad del aire y del agua.

Este proceso también contribuye a la emisión de gases como el óxido nitroso (N_2O), un potente gas de efecto invernadero que tiene un impacto significativo en el cambio climático y contribuye al agotamiento de la capa de ozono. Queriendo decir esto que, la actividad humana relacionada con el amoníaco está afectando negativamente nuestro entorno natural y tiene consecuencias importantes para el clima y la salud del planeta [27].

Asimismo, al entrar en contacto con el agua, el amoníaco tiene el potencial de convertirse en un compuesto altamente perjudicial para la vida marina. Incluso en concentraciones muy bajas, alrededor de 0,02 [mg/L], puede resultar letal para peces, especialmente aquellos pertenecientes al grupo Salmonidae, como el salmón y la trucha [26]. La reacción que ocurre en el agua se representa mediante la siguiente ecuación:



El ion amonio no presenta toxicidad directa para la vida marina; sin embargo, en condiciones de altas temperaturas y pH elevado, puede convertirse en amoníaco, cuyo impacto en caso de derrames dependerá de las condiciones del agua. En entornos con pH básico, el amonio puede experimentar nitrificación por bacterias, generando nitritos, que resultan asfixiantes para especies marinas. Este fenómeno afecta más a organismos de agua dulce que a los de agua salada [131].

Es crucial abordar y reducir los impactos ambientales del amoníaco, considerando medidas preventivas en nuevas aplicaciones para evitar consecuencias adversas. Mientras que la regulación actual aborda los riesgos ambientales asociados al transporte de amoníaco, se debe enfocar el análisis en los riesgos adicionales derivados de su uso como combustible.

En motores de combustión interna que emplean amoníaco, las emisiones de gases de escape pueden incluir NO_x , amoníaco no quemado y N_2O . La cantidad de emisiones varía según la tecnología del motor, pero aún se requieren más estudios para determinar con precisión estas emisiones. Aunque las instalaciones industriales ya emplean tecnologías para reducir emisiones de óxido nitroso en la producción de urea, estas pueden adaptarse para el uso de amoníaco como combustible, estas tecnologías deben ajustarse para

aplicaciones específicas, como el transporte marítimo, y considerar la posible limitación de espacio en embarcaciones convertidas para operar con amoníaco.

3.1.5 Regulación y estándares internacionales

El manejo, transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas, tales como amoníaco, GLP, gasolina y combustibles afines, están bajo el análisis de regulaciones tanto a nivel nacional como internacional. Además, se aplican normativas que supervisan las características de calidad, los procedimientos de prueba y el mantenimiento de los equipos presurizados que entran en contacto con estos compuestos, abarcando tanques de almacenamiento, válvulas, bombas, tuberías, entre otros.

- **Normativas Generales:**
 - La adopción del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA o GHS) establece un sistema unificado de clasificación y etiquetado a nivel internacional.
- **Normativas Específicas:**
 - En Estados Unidos, la Gestión de la Seguridad de Procesos (PSM) de la OSHA regula el manejo del amoníaco, con requisitos que entran en vigor para procesos que manejen más de 4,5 toneladas métricas [27].
 - Normativas en el Reino Unido y Australia varían en términos de cantidades para la aplicación de regulaciones específicas.
- **Normativas Marítimas:**
 - La Organización Marítima Internacional (IMO) regula el uso de combustibles en el sector marítimo a través del Convenio SOLAS [27].
 - El Código IGC regula el transporte de amoníaco por barco, mientras que el Código IGF se centra en la combustión de gases, aunque actualmente no establece requisitos específicos para el amoníaco como combustible [31].
- **Desarrollos Recientes:**
 - Empresas como DNV han introducido reglas de clase para el uso de amoníaco como combustible, proponiendo diseños "Fuel ready" y "Gas fuelled ammonia."
 - Otras organizaciones, como ABS, Bureau Veritas, Korean Register, y Lloyd's Register, también han definido reglas y guías para el diseño de barcos que utilicen amoníaco como combustible.
- **Papel de las Sociedades de Clasificación:**
 - Las Sociedades de Clasificación emiten Aprobaciones en Principio (AiP) para conceptos de diseño, asegurando que cumplan con los requisitos de seguridad.
 - La colaboración con las administraciones portuarias es esencial para definir condiciones operativas en las áreas bajo su jurisdicción.
- **Consideraciones de Seguridad:**
 - Dado que los riesgos del uso de amoníaco como combustible no están totalmente contemplados en las normas existentes, se enfatiza la importancia de la identificación de posibles nuevos riesgos y el análisis de seguridad.
- **Normativas y Estándares Existentes:**
 - Organizaciones como ANSI, ASME, ASTM, CGA, ISO, y la IMO han definido estándares y normativas para el almacenamiento y transporte seguro del amoníaco.
 - En el Anexo 1 se presenta una tabla con diferentes estándares y normativas internacionales relevantes, diferenciando la región y las etapas de la cadena de valor a las cuales aplican.

3.2 Marco regulatorio y normativo del amoníaco en Chile

A continuación, se presentan puntos importantes dentro de la norma nacional en cuanto al manejo de amoníaco, importante recalcar que actualmente no hay normas acerca de la combustión de amoníaco, por lo que se abarcara simplemente al manejo dentro de la industria actual.

Dadas las propiedades fisicoquímicas del amoníaco, como su alto grado de toxicidad, inflamabilidad y corrosividad, es esencial contar con un marco regulatorio sólido que garantice la correcta manipulación y seguridad de las personas expuestas a este compuesto. En este contexto, el Ministerio de Salud (MINSAL), a través de su Resolución Exenta 408, Artículo 3, categoriza al amoníaco (tanto anhidro como en disolución acuosa) como una sustancia peligrosa. Además, la norma NCh382 ofrece la posibilidad de clasificar diversas sustancias peligrosas, incluyendo mezclas y soluciones, mediante la consideración de diversas categorías. Las cuales se presentan a continuación:

1. Explosivos
2. Gases
3. Líquidos inflamables
4. Sólidos inflamables
5. Sustancias comburentes y peróxidos orgánicos
6. Sustancias tóxicas y sustancias infecciosas
7. Sustancias radioactivas
8. Sustancias corrosivas
9. Sustancias y objetos peligrosos varios

Las clases establecidas en la norma NCh382 se subdividen según el riesgo inherente o los peligros más significativos que presenten. En el caso del amoníaco anhidro, la clasificación de acuerdo con la NCh382 es en la Clase 2, subdivisión 2.3, lo que indica su pertenencia a la categoría de gases tóxicos [32].

Además, la normativa NCh2190 tiene como propósito establecer los requisitos vinculados a los distintivos de seguridad utilizados para identificar los riesgos asociados a las sustancias peligrosas. Esto abarca aspectos como las características de las marcas, etiquetas y rótulos, su correcto uso, las excepciones permitidas y los lugares específicos donde deben ser colocados. Esta norma resulta aplicable al transporte de sustancias peligrosas por vía terrestre, según lo definido en la NCh382, tanto a nivel nacional como en el ámbito del comercio de importación/exportación. Además, regula la manipulación y almacenamiento en tránsito de estas sustancias. En relación con el amoníaco anhidro, la norma especifica que debe llevar el distintivo correspondiente a un gas tóxico (Etiqueta y rótulo para Clase 2, División 2.3)[33], como se ilustra en la figura que se presenta a continuación:



Figura 12: Distintivo de seguridad gases tóxicos[33] .

En relación con la evaluación de peligros asociados a sustancias, la normativa NCh 1411/4 [34] se aplica a instalaciones involucradas en la producción, almacenamiento o uso de materiales con riesgos asociados (no se extiende al ámbito del transporte de productos peligrosos). La identificación de riesgos de un material se clasifica en tres categorías principales: impacto en la salud, inflamabilidad y reactividad o inestabilidad. Cada categoría se asigna a una posición y se gradúa en una escala del 0 al 4, según la gravedad del riesgo, como se detalla en la Figura 10.



Figura 13: Distintivos de riesgos de materiales [35].

En el caso del amoníaco anhidro se clasifica de la siguiente manera:

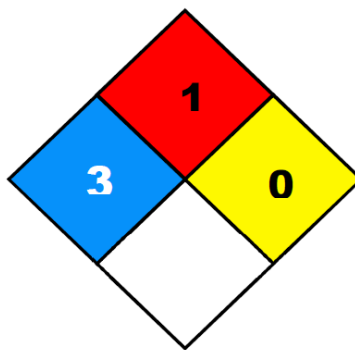


Figura 14: Señal según NCh 1411/4 [35].

- **Riesgos para la salud** → Grado 3: Materiales cuyos efectos aun en exposiciones breves pueden causar una lesión grave, temporal o residual, aun cuando se haya dado pronto tratamiento médico, incluyendo los que requieren protección para evitar el contacto con cualquier parte del cuerpo.
- **Inflamabilidad** → Grado 1: Materiales que deben ser precalentados para que ocurra la combustión. Los materiales de este grado requieren un precalentamiento considerable bajo cualquier condición de temperatura ambiental, para que se produzca la ignición y la combustión.
- **Reactividad** → Grado 0: Materiales que por sí mismos son normalmente estables, aun en condiciones de exposición al fuego y que no reaccionan con el agua [34].

3.2.1 Almacenamiento

Para un trabajo seguro, los cilindros deben ser almacenados en áreas especialmente diseñadas y bien ventiladas, preferiblemente al aire libre, cumpliendo con las leyes y requisitos locales correspondientes. Se requiere un control periódico de los envases para garantizar su buen estado y prevenir fugas. Es esencial protegerlos contra la corrosión y las condiciones atmosféricas extremas, almacenándolos en posición vertical y asegurándolos para prevenir caídas.

Las válvulas de los contenedores deben cerrarse adecuadamente y, cuando sea necesario, proteger las salidas con tapas. Los envases deben mantenerse herméticamente cerrados en lugares frescos y bien ventilados, lejos de riesgos de incendio e ignición. Se debe evitar que la temperatura de almacenamiento supere los 50°C (122 °F). Se prohíbe fumar en las áreas de almacenamiento y durante la manipulación de productos o envases, y se deben colocar señales correspondientes.

Es crucial minimizar la cantidad almacenada de gases inflamables o tóxicos y devolver los envases una vez desocupados, siguiendo prácticas seguras y respetando las regulaciones locales [36].

En lo que respecta al almacenamiento de amoníaco en estado líquido y en solución, la gestión de esta fase en la cadena de suministro se encuentra sujeta a las disposiciones establecidas en el Decreto 43 [37]. Este reglamento tiene como finalidad definir las pautas para el almacenamiento de sustancias peligrosas. Para los gases tóxicos, como el amoníaco anhidro, el decreto detalla los requisitos específicos de la instalación, los cuales varían según las cantidades máximas permitidas para el almacenamiento, como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 5: Capacidad de almacenamiento de sustancias peligrosas [27] [37].

Capacidad Máxima	Tipos de instalación
1 cilindro o 5 [kg] en contenedor	Almacenamiento sobre el piso o en estanterías de material liso no absorbente
2 cilindros o 10 [kg] en contenedor	Bodegas comunes
3 cilindros o 300 [kg] en contenedor	Bodegas para sustancias peligrosas
Mayor a 3 cilindros o 300 [kg] en contenedor	Bodegas exclusivas para la(s) clase(s) y/o divisiones

En relación con el almacenamiento de gases envasados, el Título IV, Párrafo III, Artículo 76 establece las directrices para sustancias peligrosas clasificadas en la clase 2 según la NCh382:

- El almacenamiento de gases tóxicos sobre 3 cilindros o 300 [kg] en contenedor, debe realizarse en un área exclusiva para ello. Dicha área deberá contar con techo con cubierta liviana y, en caso de ser una bodega, tener un sistema de detección automático para el gas específico y acciones de control en caso de fuga. Si no existiesen detectores específicos, será obligatorio el uso de equipos de protección personal para el manejo de este tipo de gases, como, por ejemplo: máscaras con filtros específicos para sustancias manejadas y/o equipos de respiración autónomos para el personal.
- Cuando se almacenen más de 5 cilindros se deberá contar con, al menos, dos equipos de respiración autónoma, para respuesta a emergencias.
- El área de almacenamiento deberá tener un distanciamiento al muro medianero o deslinde de la instalación de 10 [m], y un distanciamiento de 3 [m] a cualquier otra construcción al interior del sitio [37].

3.2.2 Transporte y manipulación

Puntos importantes para la manipulación de cilindros de amoníaco [36]:

1. Almacene los cilindros en posición vertical, asegurando la tapa de protección contra caídas.
2. Utilice equipo adecuado y evite daños físicos a los cilindros.
3. La temperatura de almacenamiento no debe superar los 50 °C.
4. Solo personal capacitado debe manipular gases; lea y comprenda la etiqueta antes de usar.
5. No retire las etiquetas de identificación del proveedor.
6. Use carretillas diseñadas para transportar cilindros.
7. No retire el protector de la válvula hasta que el cilindro esté firmemente sujeto.
8. Verifique la adecuación del sistema de gas antes de conectar el envase.
9. Asegúrese de que el sistema sea compatible y no haya fugas antes de usar.
10. Use equipos adecuados cuando el gas se transfiere a sistemas de menor presión.
11. No inserte objetos en las aberturas del protector de la válvula.
12. Interrumpa el uso en caso de problemas y contacte al proveedor.
13. Cierre la válvula después de cada uso, incluso si está vacía.
14. No repare o modifique válvulas; comuníquelo al proveedor.
15. Sustituya protectores y tapas tan pronto como el envase sea desconectado.
16. Evite sacudidas mecánicas y no levante el cilindro por el protector de la válvula.
17. No use cilindros para fines distintos al almacenamiento de gas.
18. Evite arcos voltaicos y no permita que formen parte de circuitos eléctricos.
19. Prohibido fumar durante la manipulación de productos o cilindros.
20. No recomprima ni transfiera gases sin consultar al proveedor.
21. Use válvulas anti-retorno en las tuberías y al devolver el cilindro, instale la tapa protectora.

El transporte de amoníaco por vía terrestre y las operaciones de manipulación y almacenamiento en instalaciones portuarias son regulados por el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) a través del Decreto 298 y la Resolución 96, respectivamente. El Decreto Supremo 298 establece requisitos generales, condiciones y procedimientos para el transporte de sustancias peligrosas por carretera. Incluye directrices sobre identificación, señalización, rutas de tránsito y estacionamiento, antigüedad de los vehículos, competencias del conductor, entre otros aspectos. Aspectos clave a tener en cuenta son [38]:

- Vehículos que no excedan la antigüedad máxima de 15 años, deben ser cerrados o transportar la carga tapada.
- Cuando el peso de la carga sea mayor a 3.500 [kg] se debe portar una luz de emergencia.
- Portar con rótulos que indiquen clase de peligrosidad de las sustancias transportadas por todos los lados visibles del vehículo.
- Todos los bultos deben estar marcados y etiquetados de acuerdo con la norma NCh2190.
- Los vehículos que transporten sustancias peligrosas deberán evitar el uso de vías en áreas densamente pobladas y no podrán circular por túneles cuya longitud sea superior a 500 [m], siempre y cuando éstos tengan una vía alternativa segura.
- Se deberá limpiar los depósitos luego de transportar una sustancia peligrosa, a menos que la nueva carga este constituida del mismo producto que el cargamento anterior.
- Las operaciones de carga y descarga implicarán la detención total del vehículo, a menos que se necesite, la utilización de un sistema integrado a este (sistemas de transferencia).
- Un vehículo transportando materiales peligrosos sólo deberá estacionar a más de cien metros (100 [m]) de una zona de fuego abierto.

En referencia a la Resolución 96, su función principal es regular las cargas peligrosas en recintos portuarios, específicamente categorizándolas como de depósito prohibido, de depósito condicionado y cargas de ingreso prohibido. Dado que el amoníaco anhidro se clasifica en la clase 2 – gases comprimidos, licuados o disueltos bajo presión, en esta resolución se incluye como carga de depósito condicionado.

Chile, además, sigue el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas y sus Anexos, aprobado por el Decreto Supremo N° 777/78. Esta adhesión tiene como objetivo mantener y mejorar los niveles de operatividad y seguridad en los puertos. Conforme al Código IMDG, las mercancías de la clase 2.3, gases tóxicos, se consideran como de embarque o de retiro inmediato. En situaciones excepcionales, estas pueden ser depositadas en el recinto o área especial de la Administración de Puerto, previa solicitud del cliente, con notificación a la Autoridad Marítima y autorización posterior del Administrador del Puerto.

3.2.3 Concentraciones de NH₃

Dentro del laboratorio y los procesos en los que se utilizará el NH₃ es necesario conocer los límites permisibles en cuanto a la concentración de amoníaco en respectivo volumen. Abarcando en este punto las condiciones ambientales de trabajo. Lo cual viene normado por el Decreto Supremo N° 594/99 del Ministerio de Salud, Título III, Párrafo I [39] . El cual dice lo siguiente acerca de la ventilación:

- Artículo 32: *“Todo lugar de trabajo deberá mantener, por medios naturales o artificiales, una ventilación que contribuya a proporcionar condiciones ambientales confortables y que no causen molestias o perjudiquen la salud del trabajador.”*
- Artículo 33: *“Cuando existan agentes definidos de contaminación ambiental que pudieran ser perjudiciales para la salud del trabajador, tales como aerosoles, humos, gases, vapores u otras emanaciones nocivas, se deberá captar los contaminantes desprendidos en su origen e impedir su dispersión por el local de trabajo.”*

“Con todo, cualquiera sea el procedimiento de ventilación empleado se deberá evitar que la concentración ambiental de tales contaminantes dentro del recinto de trabajo exceda los límites permisibles vigentes.”

Dentro de este punto es sumamente importante mencionar que el amoníaco cuenta con restricciones en cuanto a la exposición y está controlado por distintos límites en ppm entregados por el proveedor en este caso Indura [36], los cuales se muestran a continuación:

- LPP: 22 ppm
- LPT: 35 ppm

Donde por el D.S. 594 en los artículos 59, 60 y 66. Define

- LPP: Límite permisible ponderado: 8 horas diarias y 45 semanales.
 - LPT: Límite permisible temporal: 15 minutos continuos, 1 vez por hora y 4 veces por día.
- Artículo 34: *“Los locales de trabajo se diseñarán de forma que por cada trabajador se provea un volumen de 10 metros cúbicos, como mínimo, salvo que se justifique una renovación adecuada del aire por medios mecánicos. En este caso deberán recibir aire fresco y limpio a razón de 20 metros cúbicos por hora y por persona o una cantidad tal que provean 6 cambios por hora, como mínimo, pudiéndose alcanzar hasta los 60 cambios por hora, según sean las condiciones ambientales existentes, o en razón de la magnitud de la concentración de los contaminantes.”*

4 Consideraciones para el diseño

La génesis de la propuesta para establecer este laboratorio se origina en dos proyectos que han proporcionado la financiación y el impulso necesario tanto para la investigación teórica como práctica. Estas dos experiencias se han desarrollado de manera completamente independiente, aunque comparten la utilización de gases similares y objetivos de investigación afines.

Ambos proyectos, exitosamente adjudicados, forman parte de iniciativas respaldadas por CONYCIT. El primero de ellos corresponde al concurso IDeA I+D del FONDEF, mientras que el segundo es un proyecto financiado por FONDEQUIP. La orientación principal de estos proyectos se alinea con el propósito de estimular y fomentar el desarrollo de la investigación en el país.

En consonancia con la misión de CONYCIT, que busca respaldar a la comunidad científica, estos proyectos tienen como objetivo proporcionar acceso a equipos científicos y tecnológicos esenciales para llevar a cabo investigaciones de frontera. Este respaldo no solo impulsa el avance en el ámbito de la investigación, sino que también contribuye al desarrollo de una sociedad y economía fundamentadas en el conocimiento.

4.1 Proyecto FONDEF IDeA

El primer proyecto que marcó el inicio de la creación de este laboratorio es el ganador del concurso IDeA I+D del FONDEF, representando el punto de partida para la iniciativa. En este proyecto, se persigue el desarrollo de un prototipo de quemador que emplea la tecnología de combustión en medios porosos inertes, utilizando mezclas de amoniaco-hidrógeno verde. Este enfoque se inscribe en la temática de "Prototipos de dispositivos y materiales para el uso de hidrógeno verde en sectores intensivos en el consumo de energías no renovables".

El objetivo principal es asociar al Estado, la academia, las empresas y la sociedad civil para avanzar hacia un sector energético libre de carbono. La implementación de nuevos combustibles, como la mezcla de amoniaco-hidrógeno, en parte del proceso de abastecimiento energético nacional es fundamental, especialmente ante la actual agenda estatal que promueve reducir el uso de combustibles fósiles en la generación eléctrica.

Este proyecto, centrado en el desarrollo de un prototipo de quemador a nivel de laboratorio, cuenta con la colaboración de entidades clave. Guacolda Energía, con más de 27 años de experiencia en generación eléctrica, y el Coordinador Eléctrico Nacional, encargado de la coordinación del Sistema Eléctrico Nacional, son dos entidades asociadas. Además, se cuenta con la colaboración de instituciones internacionales con amplia experiencia en tecnologías de combustión en medios porosos, como la Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg / LSTM - Institute of Fluid Mechanics de Alemania y la Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS de Rusia. Estas instituciones aportarán su experiencia en el diseño técnico del prototipo y en el desarrollo de modelos para simular condiciones reales de operación.

La colaboración con la Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) de Energía en Valparaíso, que promueve el desarrollo de aplicaciones para el hidrógeno verde, también es un componente esencial en este proyecto.

El objetivo final es desarrollar un prototipo innovador capaz de operar con mezclas de amoniaco-hidrógeno verde, cumpliendo con los requisitos necesarios para su aplicación en sistemas de generación eléctrica. Esto permitiría la reconversión de centrales destinadas al cierre de operación para el año 2050.

4.1.1 Prototipo/Set up

El diseño propuesto para el prototipo implica una coraza cilíndrica que será rellena con un arreglo de medios porosos, incorporando una trampa de llama de seguridad (ver Figura 15). Para minimizar las pérdidas de calor radiales, se instalará aislamiento tanto dentro como fuera de la coraza cilíndrica.

En uno de los extremos, se situará un captador de gases de combustión, mientras que en el otro extremo se colocará un difusor de acero inoxidable por donde se introducirá la premezcla de combustible. La inyección de aire se llevará a cabo de manera independiente, permitiendo que la premezcla aire-combustible se forme en el mismo medio poroso inerte. Para analizar las temperaturas de operación, se implementará un arreglo de termocuplas a lo largo del reactor, cubriendo el rango desde $x=0$ hasta $x=L$ en la dirección axial.

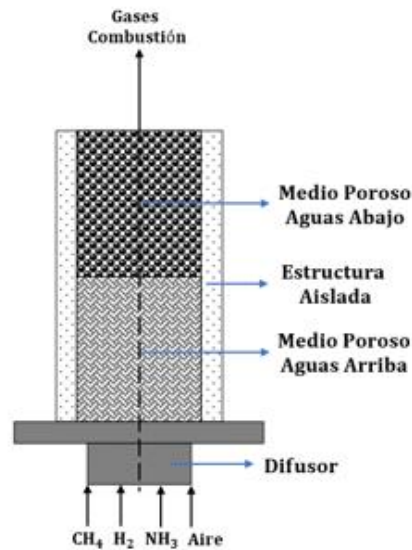


Figura 15: Esquema prototipo del MPI.

Las pruebas experimentales se llevarán a cabo en un montaje similar al ilustrado en la Figura 16. Se emplearán cilindros que contienen los tres combustibles considerados en el proyecto ($\text{CH}_4\text{-H}_2\text{-NH}_3$), con reguladores de flujo que permitirán ajustar las razones de equivalencia, velocidades de filtración y fracción de cada combustible. La medición de las temperaturas dentro del reactor se realizará mediante termocuplas tipo S o K, recubiertas en varillas cerámicas para protección. Estas temperaturas se ajustarán utilizando balances de energía para la termocupla, considerando conducción, radiación y convección, con el propósito de obtener la temperatura real de operación.

Las señales se registrarán a través de un adquisidor de datos DAQ-Omega y se almacenarán en un computador para análisis posterior. Las emisiones se capturarán a la salida del quemador y se analizarán con un analizador de gases para determinar su composición. Se estima una incertidumbre del 5% para las temperaturas y del 10% para las emisiones, basada en equipos utilizados en investigaciones similares.

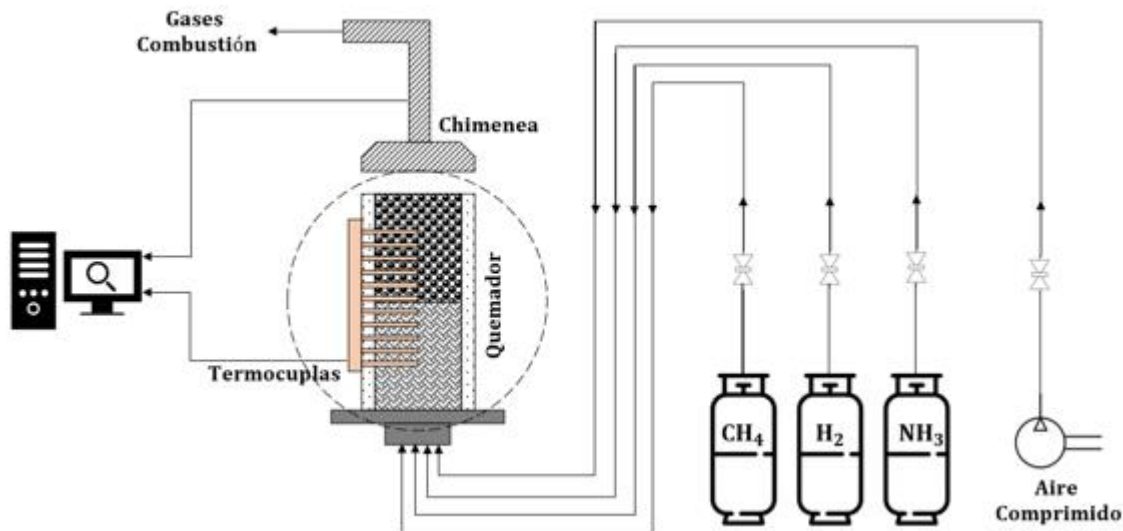


Figura 16: Esquema set up experimental a utilizar.

El quemador, fabricado en acero inoxidable (SS316 o similar), estará recubierto interna y externamente con aislante Fiberfrax para minimizar las pérdidas térmicas. La premezcla ingresará por la parte inferior a través de un difusor para asegurar una distribución uniforme y reducir la probabilidad de puntos calientes. El interior del quemador se divide en dos zonas diferenciadas por el tipo de material poroso inerte (MPI) utilizado.

La ignición se realizará mediante arco eléctrico en la zona superior del reactor. Se iniciarán pruebas con metano, un combustible ampliamente estudiado para garantizar la operación segura y verificar el correcto funcionamiento de los sistemas. Posteriormente, se incorporará gradualmente amoníaco e hidrógeno en la mezcla hasta desplazar completamente el metano. Se realizarán pruebas con diferentes composiciones, razones de equivalencia y velocidades de filtración para identificar los límites de estabilidad y analizar las emisiones. Los resultados obtenidos permitirán calcular los rendimientos de combustión asociados al amoníaco e hidrógeno.

4.2 Proyecto FONDEQUIP

El segundo proyecto que se adjudicó, en la “Propuesta XII concurso de equipamiento científico y tecnológico mediano FONDEQUIP” del año 2023, es una Microturbina a gas, diseñada para operar con combustibles verdes, para su implementación en actividades de investigación, desarrollo y docencia en instituciones de educación superior. La iniciativa contempla una colaboración extensa a nivel nacional e internacional, estableciendo una red de colaboración que respalde diversas líneas y proyectos de investigación, involucrando a diversas entidades.

El propósito fundamental de este proyecto es generar conocimiento científico-tecnológico de alto impacto, centrándose en sistemas de generación eléctrica alimentados por combustibles verdes, como el hidrógeno y sus portadores. La colaboración entre distintas instituciones y la participación activa de entidades nacionales e internacionales contribuirá a enriquecer la investigación y promover avances significativos en el ámbito de la energía sostenible.

La "Micro Turbine LAB" representa un sistema de co-generación a escala, basado en un ciclo termodinámico Brayton, diseñado específicamente para impulsar actividades de investigación, desarrollo y docencia en instituciones de educación superior. Este equipo, versátil en su funcionamiento, puede

operar con una variedad de combustibles, incluyendo opciones verdes como hidrógeno y sus derivados, así como combustibles convencionales y sus mezclas.



Figura 17: Micro-Turbina Instalada laboratorio en South África.

El equipamiento está equipado con una serie de sensores de presión y temperatura, respaldado por un software especializado que facilita el análisis de la información registrada, permitiendo un seguimiento en tiempo real. Sus características técnicas lo posicionan como una herramienta versátil capaz de integrar diversas líneas y proyectos de investigación, tanto a nivel nacional como internacional. La presencia de este laboratorio contribuirá al desarrollo de un centro de investigación único en Chile, consolidándose como un punto clave para el avance en el ámbito de la energía sostenible.

4.2.1 Set up

En primera instancia se plantea instalar la turbina debajo de una campana para la extracción de gases, es importante mencionar las características físicas de esta turbina, para su futura instalación. Esta micro turbina tiene 995 [mm] de alto, 600 [mm] de ancho y 1170 [mm] de profundidad. Pesando aproximadamente 200 [kg].

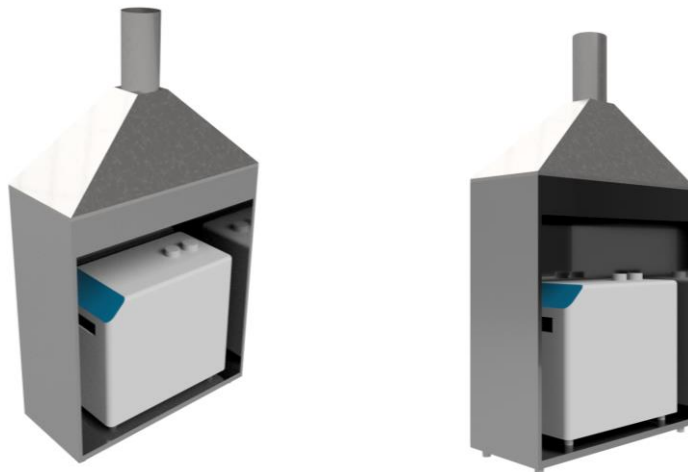


Figura 18: Modelo propuesta set-up Mico-turbina.

4.3 Dependencias

Para llevar a cabo el diseño y desarrollo integral del nuevo laboratorio, se debe realizar un análisis exhaustivo de cada espacio disponible en el emplazamiento, considerando sus dimensiones generales y evaluando posibles mejoras. La revisión tiene que abarcar aspectos cruciales como salidas y líneas de agua para el drenaje, ubicación estratégica para la conexión y extensión de la red eléctrica, y disposiciones para casetas de gases, todo ello alineado con las normativas previamente mencionadas.

El núcleo del proyecto se centró en el desafío de concebir un laboratorio que no solo proporcionara un entorno cómodo para la realización de experimentos, sino que también garantizara la máxima seguridad en todas las operaciones. Esto implica la creación de un espacio colaborativo donde los datos obtenidos en las experiencias pudieran ser analizados de manera efectiva por un equipo de trabajo. Este espacio multifuncional se diseñó para facilitar tanto el trabajo individual como las reuniones de equipo, priorizando la seguridad y la comodidad.

El desarrollo y las directrices para la ubicación de diversos elementos se fundamentaron en el Manual de Seguridad en Laboratorios elaborado por la ACHS (Asociación Chilena de Seguridad) [40], aplicando de manera específica este manual al contexto del laboratorio de combustión. Esta metodología garantiza la integración de prácticas de seguridad rigurosas y actualizadas, adaptadas a las necesidades y particularidades del entorno donde se llevarán a cabo las investigaciones sobre combustión.

El laboratorio contará con dependencias adecuadas y habilitadas para:

- a) Trabajo administrativo/monitoreo
- b) Procesamiento y análisis de datos obtenidos
- c) Lavado y preparación de material para la recolección, procesamiento y análisis de datos
- d) Almacenamiento
- e) Vestuario
- f) Servicios higiénicos
- g) Mantención de útiles de aseo

Las dependencias mencionadas anteriormente se diseñaron de modo que:

- Permitan controlar el acceso del personal a las áreas de tránsito restringido.
- Las áreas del laboratorio permanezcan separadas de la zona administrativa/monitoreo.
- La circulación del personal sea por circuito cerrado (vestuario-laboratorio-vestuario)

4.4 Edificación

Las áreas de laboratorio dispondrán de:

- Pisos lisos e impermeables con un declive suficientemente para asear desde sectores limpios hacia sectores sucios, considerando también el sistema de drenaje.
- Paredes lisas e impermeables.
- Puertas que giren en un solo sentido para evitar accidentes de personas que transportan materiales, cualquiera sea su naturaleza. Deben estar dotadas en su parte superior de un vidrio (mirilla) que permita visualizar a través de él, si se aproxima una persona*.
- Ventanas que permitan una adecuada iluminación natural, de manera que se facilite la observación y el trabajo en general. Se consideró este punto principalmente en el área de monitoreo*.

4.5 Instalaciones de servicios básicos

4.5.1 Red Eléctrica

Las instalaciones eléctricas se diseñaron con tal de prevenir situaciones de riesgo por medio de las siguientes normas de seguridad previstas para áreas peligrosas:

- Se situarán los tableros de comandos fuera de las áreas de trabajo, en un lugar de fácil acceso y visible para el personal.
- Se dispondrá de un interruptor general para todo el circuito eléctrico e interruptores individuales para cada sector, todos debidamente identificados y de fácil acceso. (Se capacitará al personal para que, en caso de emergencia, pueda cortar en el tablero el suministro eléctrico del laboratorio.)
- Se sectorizará la red eléctrica de acuerdo con el nivel de consumo, con indicación de carga máxima tolerable, para evitar sobrecargas del sistema y el consiguiente salto de los fusibles automáticos.
- Material eléctrico a prueba de explosiones por sustancias inflamables.
- Los enchufes no se ubicarán cerca de fuentes de agua o gas.
- Todos los enchufes contarán con una conexión a tierra.
- Equipos eléctricos se situarán fuera del área en que se utilizarán reactivos corrosivos.
- Las iluminarias contarán con protección, iluminarias estancas.

4.5.2 Red de agua potable

- Dentro del laboratorio se contará con llaves de paso para agua fría y caliente.
- La red estará identificada con colores de acuerdo con el tipo de agua (caliente = rojo; fría = azul).
- En el sitio de ingreso al laboratorio existirá una llave de paso general de fácil acceso, que permita cerrar toda la red. Su ubicación estará debidamente señalizada y será conocimiento de todo el personal del laboratorio.
- El lavafondo será:
 - De acero inoxidable y adecuado al material que se trabajará, en este caso NH_3 .
 - Con profundidad de acuerdo a la función.
 - Con sistema de desagüe que no contenga plomo.
 - Con codos que retengan partículas, para su fácil extracción.
 - El grifo tendrá cuello de cisne, móvil, para facilitar el trabajo y ser utilizado en caso de emergencia. (ej. Salpicadura en los ojos con alguna sustancia peligrosa).

4.5.3 Red de gases

Las instalaciones deben ser adecuadas para cada caso de utilización de gases, según el Decreto 43 con la utilización de amoníaco y metano, se debe tener precaución y revisar incompatibilidades individuales de los gases. Para este caso no presentan incompatibilidades según proveedores. Sin embargo, hay medidas generales que se considerarán para que la utilización no provoque accidentes a los usuarios, apoyada también con el Decreto 43 [37] el cual es el reglamento de almacenamiento de sustancias peligrosas.

- Siempre deberá existir una llave central y llaves de paso sectorizadas. Estas quedarán visibles y con fácil acceso para que puedan utilizarse en caso de emergencias.
- El depósito del gas quedará situado fuera del laboratorio, en un gabinete de material incombustible, debidamente ventilado y provisto de puertas con un dispositivo portacandado.
- Los cilindros deben fijarse a la pared mediante una cadena.
- Los cilindros que contienen los distintos gases estarán debidamente identificados mediante el color que está normado para cada uno de ellos.

- En caso de utilización de calefón, se deberá instalar fuera del recinto de trabajo por siego de explosión
- En caso de utilización de mecheros Bunsen, adosados al mesón de trabajo, no quedaran situados:
 - En flujo de aire.
 - Debajo de repisas.
 - En la cercanía de reactivos inflamables.
- Estarán dotados de una manguera que no sea excesivamente larga (30 a 70 cm).

4.5.4 Sistemas de ventilación y extracción de aire

- Se instalarán termómetros e higrómetros dentro del laboratorio.
- Sumamente importante conocer cuál es el combustible más crítico para utilizar en el proceso de combustión, para siempre operar en concentraciones bajo lo dictamina la norma o recomendación de proveedor.
- Importante contar con un sensor de gases el cual entregue alerta en caso de superar cierta concentración dentro del volumen del laboratorio.
- Existirán dos campanas de extracción para respectivos proyectos, con extracción focalizada para mejorar el correcto flujo de viento.
- Correcta posición de sistemas de extracción e inyección de aire para remover todo el volumen del aire dentro del laboratorio.
- El amoniaco no se debe liberar al ambiente, los gases deben pasar por un filtro o un lavado de gases posterior al proceso de combustión

4.5.5 Mobiliario

- Los mesones del laboratorio deberán ser:
 - De 75-90 cm de altura máxima, adecuados al personal, instrumentos y tipo de trabajo.
 - Sólidos, de material no poroso, lavables e incombustibles.
 - De superficie adecuada para su uso: el ancho debe permitir un buen espacio de trabajo y favorecer la protección y funcionamiento de los equipos.
 - Las sillas y taburetes dispondrán de un respaldo anatómico, para evitar malas posturas; su altura deberá estar de acuerdo con los mesones, persona y tipo de trabajo.
- El mobiliario de la zona de monitoreo no es necesario que cumpla con características de material no poroso y lavables.

5 Diseño para su implementación

El diseño del laboratorio se planificó meticulosamente, considerando diversas actividades y metodologías de trabajo. Se llevaron a cabo variadas reuniones con los ingenieros de los proyectos, el director del proyecto y proveedores. Además, se participó en un curso especializado en el manejo, uso y riesgos asociados al amoníaco, proporcionando una comprensión profunda de sus características y precauciones necesarias. Para enriquecer el diseño, se realizó un análisis exhaustivo de otros laboratorios ya existentes, extrayendo lecciones valiosas de sus experiencias y prácticas.

En particular, para el departamento de física, se capitalizó la existencia de un laboratorio que ya utilizaba amoníaco en sus experimentos, el cual fue desarrollado por el ingeniero Pablo Bunout. La asesoría proporcionada por el ingeniero Bunout resultó invaluable, brindando una orientación inicial esencial para los primeros pasos en el diseño del laboratorio. Este enfoque colaborativo y la integración de conocimientos especializados contribuyeron de manera significativa al desarrollo de un diseño eficiente y completo.

Como se detalló anteriormente, una vez que se han establecido las consideraciones esenciales para el diseño adecuado de un laboratorio de combustión, se procede a la fase de implementación.

Para crear un diseño que se adapte de manera precisa a las necesidades de cada proyecto, es imperativo tener una comprensión detallada de dicho proyecto. Esto implica obtener un conocimiento exhaustivo de su ubicación, contexto y diversas dimensiones relevantes que deben considerarse para su realización. A continuación, se detalla paso a paso como se realizó la implementación de diseño para el contexto dado.

5.1 Dependencias

El proyecto de construcción del laboratorio tendrá espacio en Viña del Mar, específicamente en el laboratorio de energías renovables, que forma parte de las instalaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María.



Figura 19: Imagen satelital ubicación laboratorio. Coordenadas: -33.03172, -71.46084



Figura 20: Imagen vista superior vista emplazamiento L.E.R.



Figura 21: Vista superior área destinada.

Es importante mencionar que el área en donde se instalará el laboratorio de combustión de amoníaco está en un área restringida de aproximadamente 12,2 [m] de largo y 7,4 [m] de ancho, siendo esta el área disponible para construcción. De igual manera este terreno ya cuenta con construcción previa, que actualmente cuenta con un camarín y baños, utilizando un área de aproximadamente 16 [m²] como se muestra en la Figura 20.

La zona delimitada en rojo representa el espacio que actualmente cumple la función de baño/camarín, mientras que toda el área en blanco está destinada para la instalación y construcción del laboratorio. Es relevante destacar que, como parte del desafío del proyecto, se contempla la utilización de las instalaciones de baños existentes.

Todo el espacio asfaltado se encuentra en buen estado, con pequeñas mejoras a realizar en cuanto a nivelación de piso. De igual manera el baño cuenta con una estructura sólida y buenos acabados interiores, importante a tener en consideración para las modificaciones.

Es crucial tener en cuenta que el terreno presenta limitaciones significativas en cuanto a espacio de trabajo, particularmente en tres de sus lados. Uno de los costados está adyacente a la nave central, mientras que en el lado opuesto existe otra construcción, lo que deja aproximadamente 3 metros de espacio disponible. Más allá de esta área demarcada, no es posible realizar trabajos adicionales, ya que el perímetro está cerrado en esa sección.

A continuación, se presentan imágenes del estado actual del baño/camarín y terreno en general:



Figura 25: Estado actual del terreno



Figura 24: Estado actual entrada al baño



Figura 23: Estado actual antesala



Figura 22: Estado actual del baño

Con un conocimiento profundo del contexto, incluyendo el terreno de instalación y las normativas aplicables en el proceso, así como los requisitos cruciales de las etapas clave, se inició el diseño preliminar del laboratorio. A lo largo del proyecto, este diseño experimentó ajustes y modificaciones para asegurar una adaptación más efectiva a las necesidades discutidas y acordadas con el grupo de trabajo. Esta evolución en el diseño fue guiada por la búsqueda constante de soluciones que permitieran abordar de manera integral y eficiente todas las exigencias específicas, optimizando los recursos disponibles y asegurando la conformidad con las normas nacionales pertinentes.

El proyecto se enfrenta a desafíos importantes, en particular, la elaboración de un diseño que se adapte a la zona asignada y satisfaga todas las demandas para operar como un espacio integral de trabajo, monitoreo y experimentación. La meta es consolidar todas las funciones en un único lugar, aprovechando incluso el baño existente para que forme parte integral de la nueva instalación.

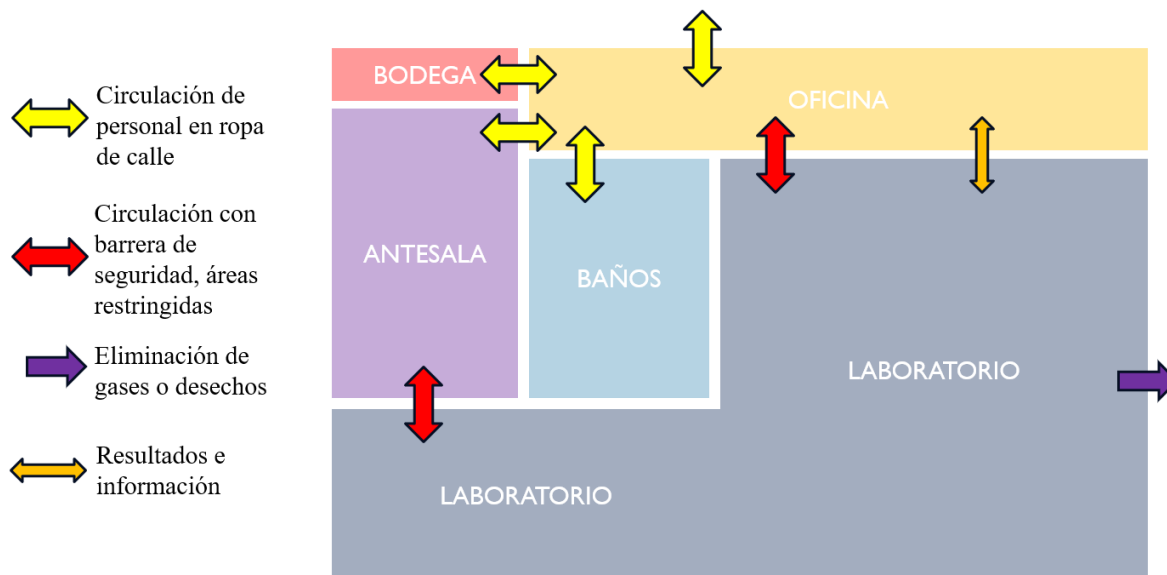


Figura 26: Circulación en las dependencias

La zona más crucial será aquella donde se llevarán a cabo las dos experiencias detalladas posteriormente. El diseño de este espacio debe cumplir con las normativas tanto para áreas de trabajo como las mencionadas anteriormente. Debe incorporar sistemas de mitigación de incendios si es necesario, ser una zona a prueba de fuego, contar con sistemas de extracción de aire, facilitar el flujo adecuado del aire, y tener áreas designadas para el lavado de instrumentos, entre otros requisitos, con el fin de asegurar la realización adecuada de las investigaciones.

Además de esta área, el recinto debe incluir una oficina y una zona de monitoreo capaz de albergar ingenieros, trabajadores, investigadores y técnicos que estén involucrados en distintos proyectos. Este espacio está diseñado para analizar directamente los datos adquiridos, sirviendo también como lugar para reuniones y discusiones de proyectos. Se busca que sea atractivo tanto para la recepción de personas externas como para alumnos y profesores externos interesados en la generación de conocimiento.

Una zona de suma importancia es la antesala, destinada a ser utilizada como área de cambio para el personal que trabaje en el laboratorio. Aquí, los trabajadores se equiparán con el Equipo de Protección Personal (EPP) correspondiente antes de ingresar al laboratorio. Esta área deberá contar con una ducha de emergencia, conforme a las disposiciones del Decreto 594, Párrafo IV, Artículo 21[41], en caso de contacto directo con amoníaco u otras sustancias tóxicas.

Para completar, se incluirá la zona del baño mencionada anteriormente, aprovechándola para el uso del personal que esté trabajando dentro de la instalación. Esto permitirá una gestión eficiente del espacio y brindará comodidad al equipo durante sus labores en el laboratorio.

No olvidando la importancia del almacenamiento, se contempla una zona exclusiva destinada para guardar tanto equipos de laboratorio como suministros de oficina. Este espacio se diseñará con el propósito de mantener la organización y facilitar el acceso a los materiales necesarios para el desarrollo de las actividades en el laboratorio, contribuyendo así a una eficiente gestión de recursos.

5.2 Edificación

Con las áreas de uso de cada espacio distribuidas y el acceso a cada una de ellas planificado, se procedió a la fase de modelado 3D del espacio. Este enfoque permitió comprender las alturas y dimensiones de la edificación. Durante este proceso, se diseñaron los accesos, se determinaron las direcciones de apertura, se planificó la distribución de la iluminación natural, se estableció un ventanal para monitoreo y se abordaron aspectos generales relacionados con la distribución de espacios. Para este caso en específico la estructura que ya se encontraba en terreno se tuvo que modificar, generando un acceso hacia el laboratorio, otro hacia el baño y un muro divisor entre el baño y la antesala, ya que estos espacios hoy actualmente se encuentran unidos.

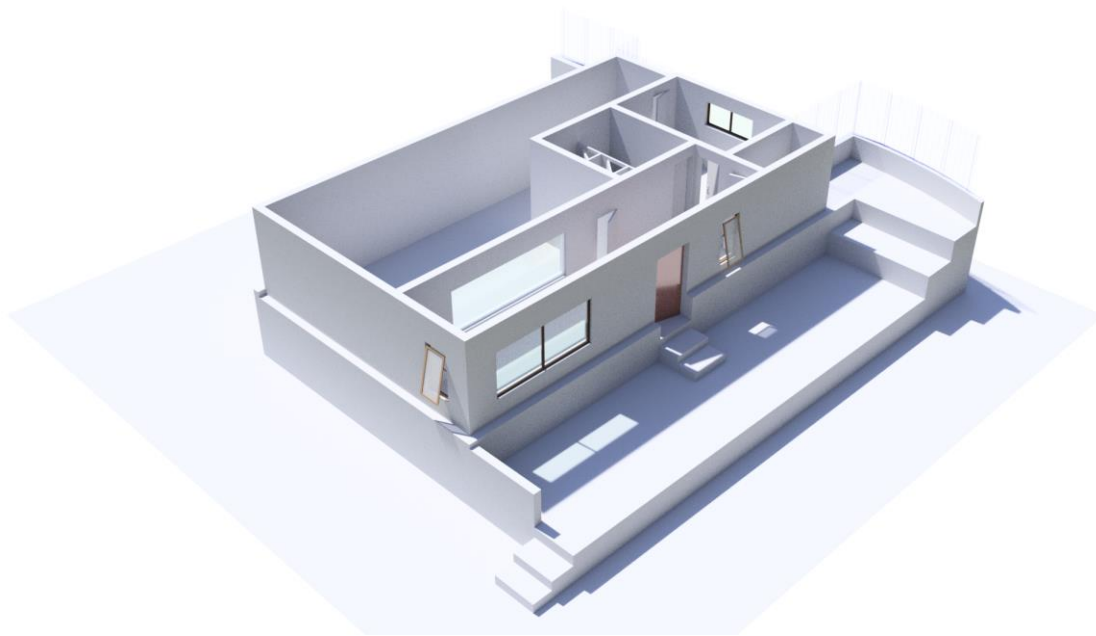


Figura 27: Modelado 3D edificación

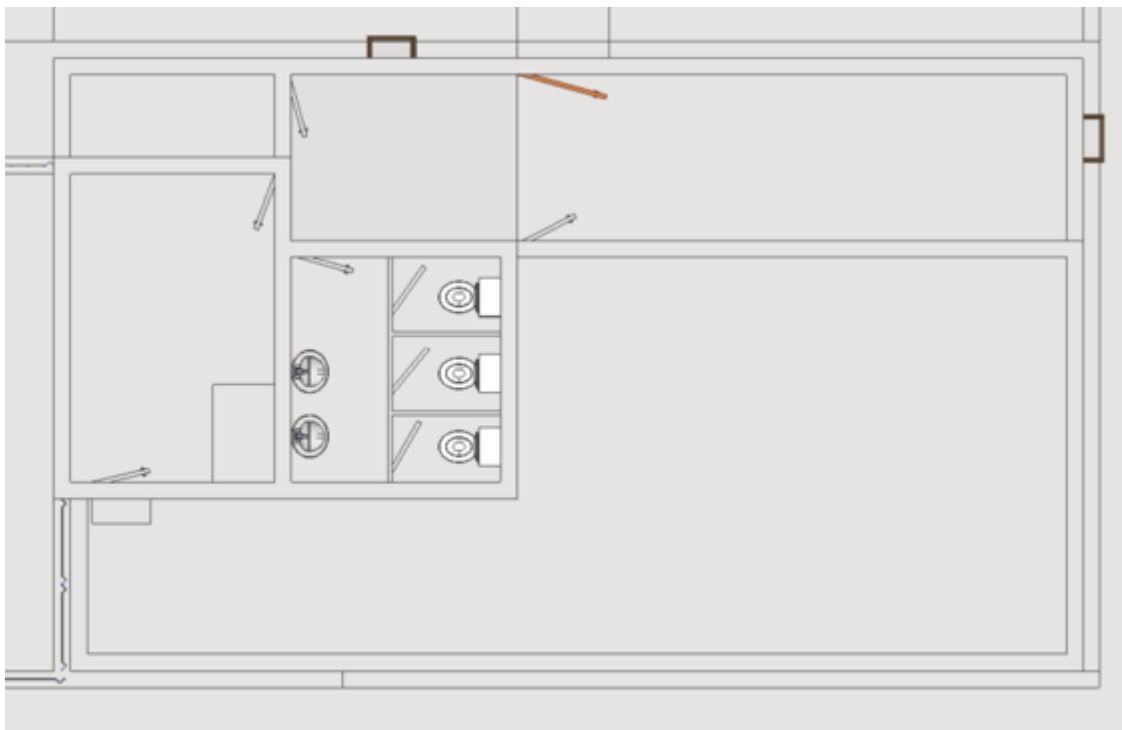


Figura 28: Vista superior edificación

5.3 Implementación de los servicios básicos

Es esencial destacar en este momento que los servicios básicos se desarrollarán progresivamente, priorizando su importancia en el marco de este proyecto en particular. El primero de estos servicios se considera crítico para el correcto funcionamiento del laboratorio, especialmente considerando el contexto que se detallará a continuación.

5.3.1 Sistema de ventilación y extracción de aire

Dentro del contexto en el cual se está trabajando es de suma importancia considerar las tasas de renovación de aire si es que no la más importante una de las más importantes a considerar, debido a la criticidad que se exponen los operadores del laboratorio al estar trabajando con combustibles como el amoniaco. El amoniaco será el punto de partida, debido a que por sus características físicas y químicas en comparación con el H_2 y el CH_4 es el más crítico en cuanto a peligrosidad y toxicidad.

Para este proyecto se contaba previamente con dos extractores de proyectos pasados, igualmente encargados de generar renovaciones de aire dentro de un laboratorio de amoniaco en las instalaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María, los cuales se muestran en las siguientes imágenes.



Figura 30: Extractor de 2.000 [m³/hr]



Figura 29: Extractor de 1.500 [m³/hr]

El extractor de 1.500 [m³/hr] para la etapa inicial del proyecto se considerará como primario, lo que quiere decir que está directamente conectado a las campanas de extracción, el cual es un modelo de la serie CBM 9/9. Por otro lado está el extractor secundario, encargado de la remoción indirecta de todo el volumen del laboratorio teniendo una extracción de 2.000 [m³/hr].

Es fundamental señalar que la existencia de un sistema de extracción de aire conlleva la necesidad igualmente imperativa de un sistema de inyección de aire, cuya tasa de inyección debe ser muy similar a la capacidad de extracción. Por ejemplo, si estamos utilizando un sistema de extracción que gestiona 3500 [m³/hr], la inyección de aire debe aproximarse a este valor. Además, la entrada de aire debe distribuirse de manera uniforme para evitar turbulencias o flujos no deseados en el área de trabajo. En este contexto, se busca mantener un ambiente con un viento de 0 a 1 en la escala de Beaufort, con velocidades entre 0.5 a 1.5 m/s respectivamente [42]. Por ende, para este caso específico, se recomienda un área de inyección de aproximadamente 2.2 [m²], distribuida de manera estratégica en el laboratorio.

5.3.1.1 Renovación de aire

Con la información sobre los extractores que se utilizarán y el volumen de la zona destinada al proceso de combustión, ahora es posible llevar a cabo cálculos para determinar las renovaciones de aire y verificar si cumplen con las recomendaciones de los proveedores. En general, para espacios con diversos propósitos, existen pautas específicas en cuanto a tasas de renovación de aire. En el caso de laboratorios con riesgo químico, se recomienda una tasa que oscila entre 20 y 30 renovaciones por hora [43].

Tabla 6: Tabla de renovaciones. Adaptación de Soler&Palau [44].

Renovación de aire en locales habitados	Renovaciones/hora (N)
Cocinas Industriales (indispensable usar campana)	15 – 20
Lavanderías	20 – 30
Fundiciones (sin extracciones localizadas)	20 – 30
Tintorerías	20 – 30
Obradores de panaderías	25 – 35
Naves industriales con hornos y baños (sin campanas)	30 – 60
Talleres de pintura (mejor instalar campana)	40 – 60

Para este caso, al estar trabajando con combustión de amoníaco, considerando que no se libera libremente al volumen total, se considerará óptimo una tasa de 15 a 30 renovaciones de volumen por hora.

Con base en las dimensiones específicas del área del laboratorio, detalladas en el Anexo 2, se calcula un volumen total en el área de trabajo que se aproxima a los 120 metros cúbicos [m³]. En consecuencia, al evaluar las diversas opciones de extracción disponibles, se determinan las siguientes tasas de renovación:

Tabla 7: Tabla cálculo de renovaciones según extracción.

Extracción [m ³ /hr]	Renovaciones/hora
1500 (Extractor 1)	12,5
2000 (Extractor 2)	16,7
3500 (Ambos)	29,2

Con relación a la Tabla 6 es aconsejable utilizar el extractor 2 o ambos para poder generar las renovaciones requeridas.

5.3.1.2 Flujos críticos

Un aspecto de gran relevancia a tener en cuenta implica comprender a fondo los flujos de amoníaco con los cuales se opera y cuáles son los flujos críticos de funcionamiento para cada sistema de extracción. Esto es esencial en situaciones donde el proceso de combustión pudiera detenerse, liberando gas amoníaco dentro del volumen de trabajo. De acuerdo con la normativa D.S. N° 594/99 del MINSAL, previamente mencionada, se debe garantizar que la concentración de NH₃ no exceda las 35 ppm como límite temporal.

En la Tabla 7, se derivaron estos flujos críticos mediante una ecuación matemática que considera la entrada y salida de flujo dentro de un volumen específico, para este caso de aproximadamente 120 [m³]. Este enfoque permite determinar la concentración de amoníaco presente en un período determinado. Los tiempos de 5 y 10 minutos fueron seleccionados como realistas para situaciones de emergencia, proporcionando un marco temporal adecuado para activar los protocolos de seguridad correspondientes. Es relevante destacar que este análisis se llevó a cabo con el objetivo de obtener una mayor sensibilidad respecto a los flujos de trabajo y comprender los riesgos asociados en profundidad.

Tabla 8: Flujos críticos de NH_3 para 5 y 10 min.

	5 minutos	10 minutos
Extractor Primario [m^3/hr]	1,35 [L/min]	1 [L/min]
Extractor Auxiliar [m^3/hr]	1,55 [L/min]	1,24 [L/min]
Ambos [m^3/hr]	2,23 [L/min]	2,1 [L/min]

Es importante mencionar que el flujo máximo de amoniaco con el que se dimensionó el proyecto del quemador es de aproximadamente 20 [L/min] el cual genera una potencia a la salida del quemador cercana a los 5[kW], cabe destacar de igual manera que es casi idóneo que se utilice este flujo de amoniaco en el proceso de combustión. Otro aspecto a considerar es que para realización de estos cálculos se considera inyección directa de este flujo de amoniaco dentro del laboratorio, cosa si se sigue toda la normativa existente este hecho nunca ocurriría.

Vale la pena tener en cuenta factores como la extracción localizada mediante una campana cerrada, que reduce la cantidad de aire necesario para evacuar los gases [45]. Además, el personal en el laboratorio estará equipado con equipo de protección personal (EPP), que incluye traje, mascarilla con filtro y protección ocular.

Como se muestra en la Tabla 7, para poder alcanzar una renovación de aire idónea para el trabajo dentro de este laboratorio es necesario la utilización de ambos extractores, por lo que a continuación se muestra un gráfico para observar cómo varían las concentraciones de amoniaco en el tiempo con extracción de 3.500 [m^3/hr] para tres flujos volumétricos distintos.

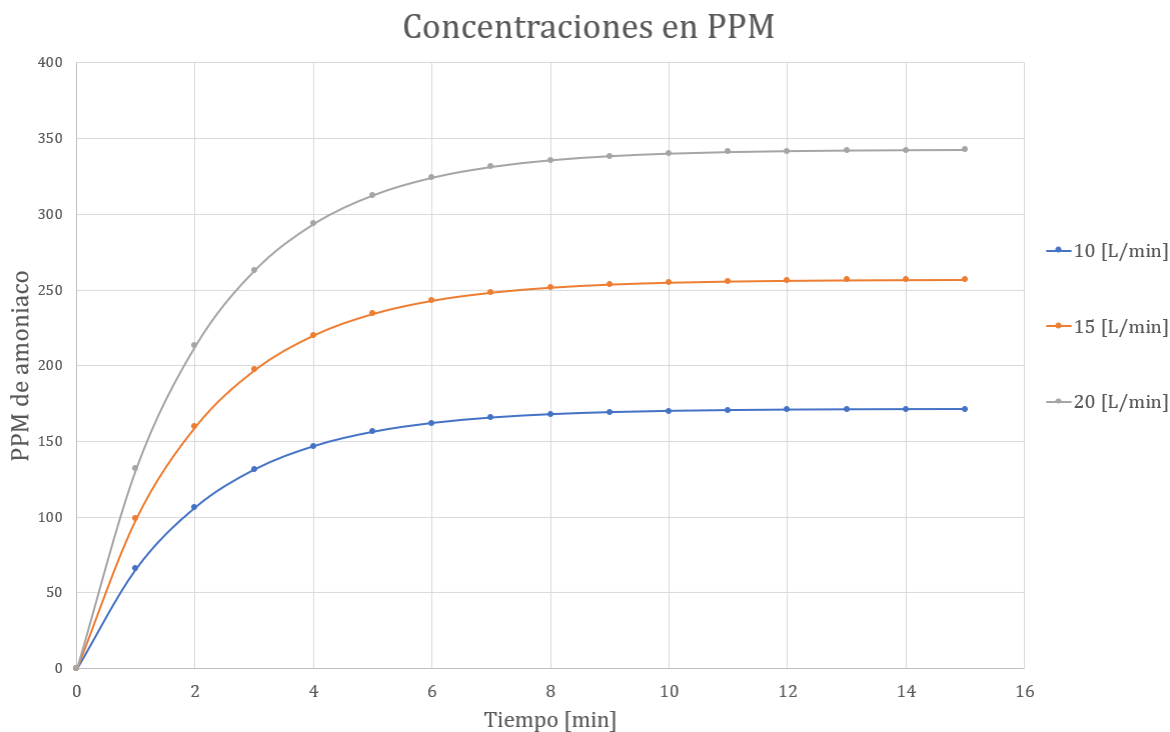


Figura 31: Gráfico PPM de NH_3 vs Tiempo

Como se observa en el gráfico siendo 20 [L/min] sería el máximo flujo volumétrico de amoniaco a utilizar y según el comportamiento con el sistema de extracción recomendado nunca pasaría las 350 ppm. Dadas las precauciones mencionadas y según la información de la Tabla 2, esta concentración no genera una preocupación significativa, estando completamente bajo los estándares de la norma. De igual manera es sumamente importante contar con un sensor de gases dentro del laboratorio en caso de fugas.

Asimismo, es crucial la disposición estratégica de los elementos de ventilación en el espacio del laboratorio para garantizar un flujo laminar adecuado y la renovación completa del aire y gases en el laboratorio. La Figura 31. ilustra la disposición recomendada de los equipos.

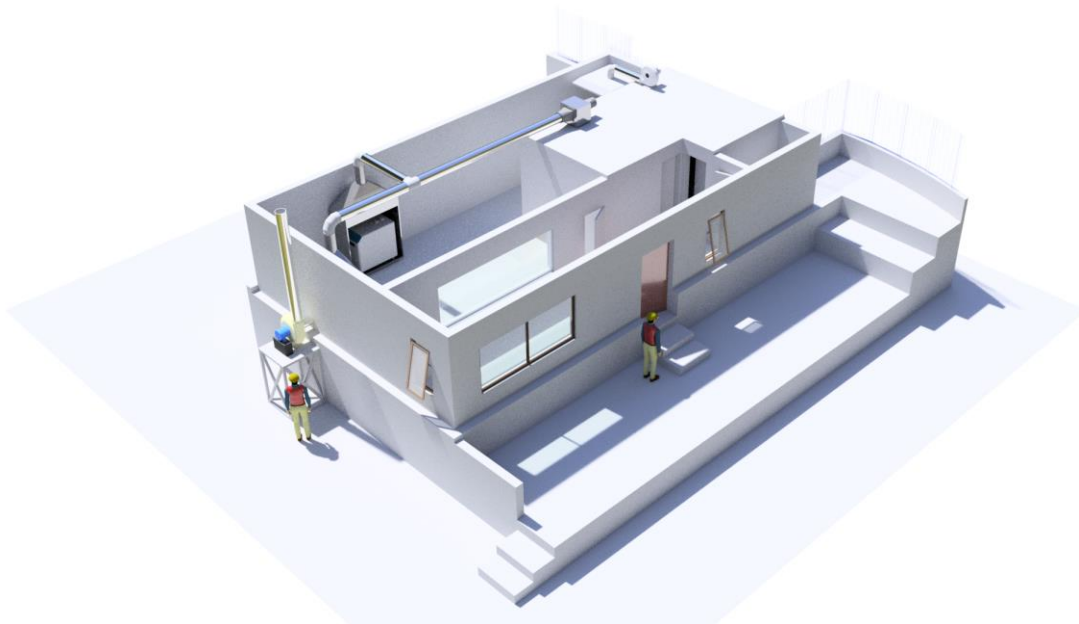


Figura 32: Modelado 3D con sistema de extracción e inyección.

Como se indicó previamente, un extractor está dedicado a la remoción directa del aire desde las campanas, mientras que el otro se encarga de extraer la totalidad del volumen del laboratorio, conectándose directamente a este espacio.

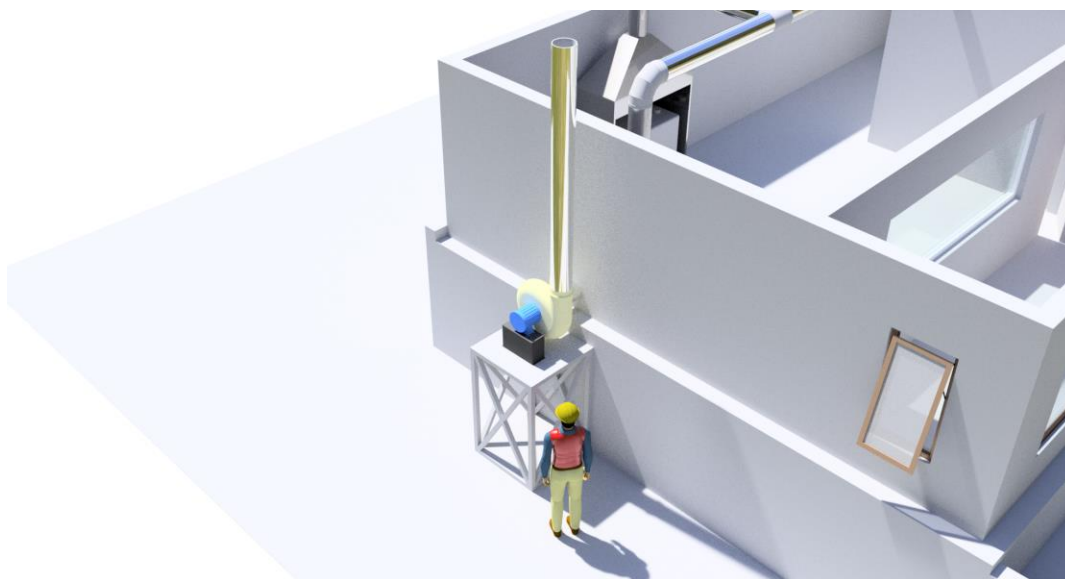


Figura 33: Ubicación de la extracción secundaria en modelado 3D.

En las imágenes adjuntas, se puede observar la disposición estratégica de los equipos para garantizar un flujo de aire adecuado en todo el laboratorio, desde la entrada hasta la zona de combustión donde se ubican las campanas. Esta disposición asegura un continuo y eficiente flujo de aire en todo el espacio. También se nota que las extracciones de las campanas y la extracción directa del laboratorio están ubicadas a alturas diferentes, esto se realiza para garantizar la remoción completa del volumen del laboratorio.

Es relevante destacar que, como se ilustra en la Figura 33, la disposición de los inyectores y los extractores contribuirá al flujo de aire efectivo en el laboratorio.

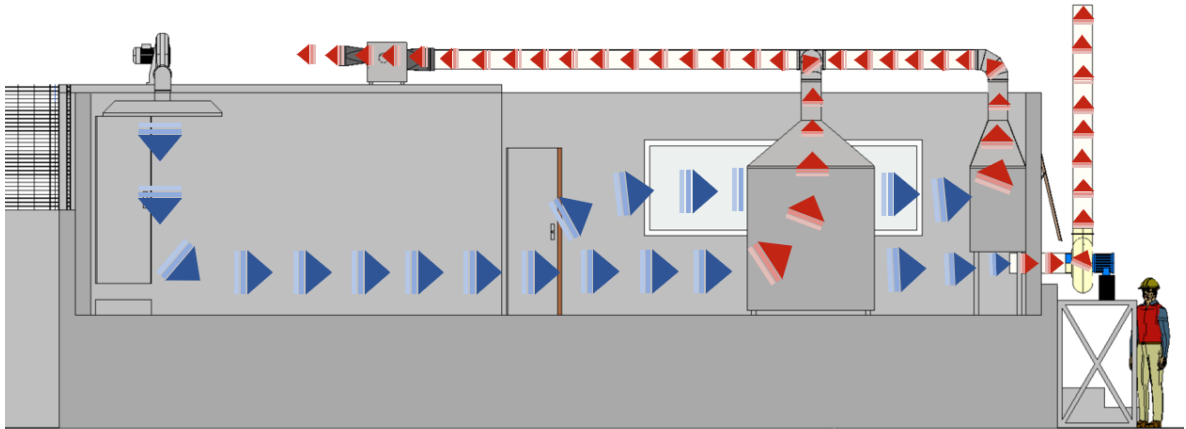


Figura 34: Flujo de aire dentro del laboratorio.

En cuanto a la posición de cada uno, se eligió el quemador el cual está enfocado en la combustión de amoníaco en una posición en que la pérdida de carga se a lo menor posible para así asegurar la máxima extracción de aire.

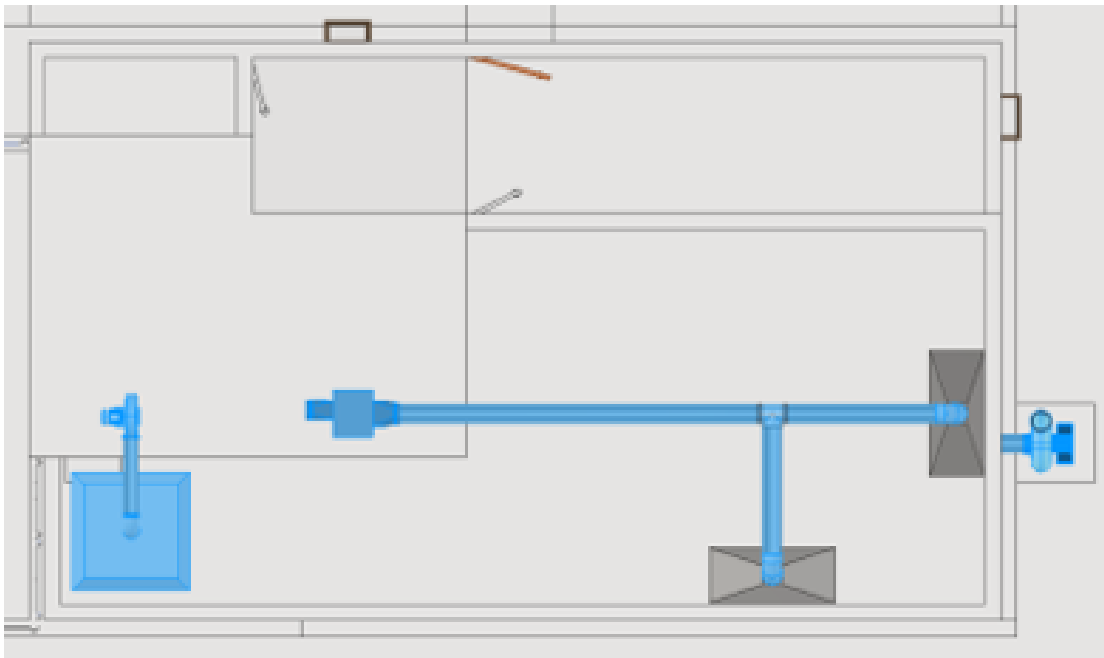


Figura 35: Vista superior del sistema de inyección y extracción.

5.3.1.3 Pérdidas de carga

En este punto, con la disposición definida de cada equipo, es crucial tener un conocimiento detallado de las pérdidas de carga presentes en el sistema de extracción, ya que el sistema de inyección de aire se ajusta en función de estas condiciones. Como se puede apreciar en las imágenes, la disposición de los inyectores y el extractor primario se ubica en la parte superior de la zona del baño, aprovechando la robustez de la estructura para facilitar futuras labores de mantenimiento. La comprensión de las pérdidas de carga es fundamental para determinar si el equipo puede operar eficientemente dentro de ese rango específico. Dado que no se cuenta con datos técnicos precisos de los equipos actuales, se llevó a cabo el cálculo de las pérdidas de carga, y se compararán con los resultados obtenidos durante las pruebas de los equipos antes de su instalación. A pesar de esta incertidumbre, se considera que los equipos son idóneos para el desarrollo de este proyecto, gracias a su capacidad significativa de extracción y a la corta distancia que el flujo de aire debe recorrer desde el laboratorio hasta el equipo de extracción.

Para llevar a cabo estos cálculos, se empleó una guía especializada de Soler&Palau Ventilation Group [46], que proporciona instrucciones detalladas y aplicaciones prácticas para asegurar la circulación de aire eficiente a través de conductos. Las consideraciones tenidas en cuenta fueron las siguientes:

- Caudal: 1500 [m³/hr]
- Diámetro de conducto: 200 [mm]
- Campana de 70°
- Codos Radio=Diámetro
- Quemador
 - Longitud tramos rectos = 7,55 [m]
 - 1 codo
- Turbina
 - Longitud tramos rectos = 6.95 [m]
 - 2 codos

Así, se obtuvieron pérdidas de carga de aproximadamente 12,21 mm c.d.a. para los tramos hacia el quemador y 12,54 mm c.d.a. para la turbina, sumando en total una pérdida de carga cercana a 25 mm c.d.a. Es relevante señalar que no se consideraron otros factores como filtros, dado que este cálculo se centra en el dimensionamiento y la sensibilidad del problema. Para obtener cálculos más precisos, se recomienda consultar con el proveedor. Estas estimaciones se realizaron utilizando tablas que se detallan en el Anexo 3.

5.3.2 Mobiliario

Esta fase resultó crucial en las etapas iniciales para comprender la disposición de los lugares de trabajo, como la oficina o sala de monitoreo, y el área del laboratorio, incluyendo sitios para la adquisición de datos y almacenamiento de medidores e instrumentos esenciales. La distribución de estos elementos en el espacio sienta las bases para las próximas etapas del proyecto.

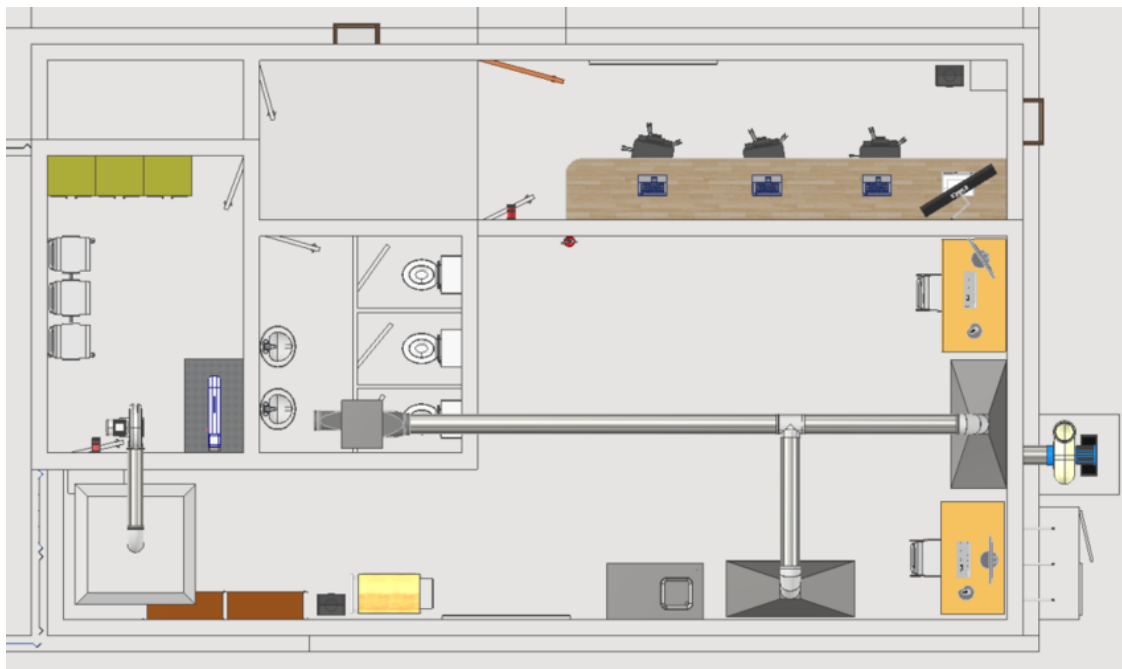


Figura 36: Vista superior laboratorio con mobiliario.

Como se evidencia en la Figura 36, el área de monitoreo está equipada con un amplio mesón situado frente a la ventana que se asoma hacia la zona del laboratorio. Esto facilita la supervisión del trabajo desde el exterior, la adquisición de datos y, en futuras acciones, la posibilidad de operar desde este espacio. Asimismo, esta área cuenta con espacios designados para el almacenamiento de equipos y herramientas necesarios.



Figura 37: Modelado de oficina/sala de monitoreo.

En el área del laboratorio, se han dispuesto escritorios individuales, asignados específicamente para la recopilación de datos de los distintos proyectos. Además, se ha designado un espacio destinado al almacenamiento de instrumentos y herramientas, asegurando así un entorno organizado y eficiente para la realización de las tareas asociadas a cada proyecto.

5.3.3 Red de gases

En el marco de este proyecto, los protagonistas son los gases de combustión, entre los cuales se destacan el H_2 , CH_4 y NH_3 , que se utilizarán como objetos de estudio. Para asegurar un proceso y unas instalaciones que cumplan con las normativas vigentes, se implementarán líneas de gases específicas y un almacenamiento seguro para cada uno de ellos. Es fundamental garantizar la conformidad con los requisitos normativos, considerando aspectos como la compatibilidad entre los gases, las disposiciones internas y externas del laboratorio, la accesibilidad, los protocolos de mantenimiento, los controles de calidad, y una variedad de consideraciones adicionales que asegurarán el éxito y la seguridad en el desarrollo de las investigaciones.

En la Figura 37, se presenta de manera esquemática el recorrido desde la caseta de gases hasta la entrada al laboratorio. La línea de ingreso está equipada con controladores de flujo que aseguran la precisión del proceso. Luego, el aire, suministrado a una presión específica mediante un compresor, atraviesa una unidad FRL (Filtro, Regulador y Lubricador). A continuación, se mezcla con los gases combustibles y, después de pasar por un arrestallama, alcanza finalmente el quemador. Es crucial destacar que este diseño forma parte del banco de prueba adoptado para la configuración de este laboratorio. El objetivo es garantizar un control preciso y seguro de los componentes involucrados en el proceso de combustión.

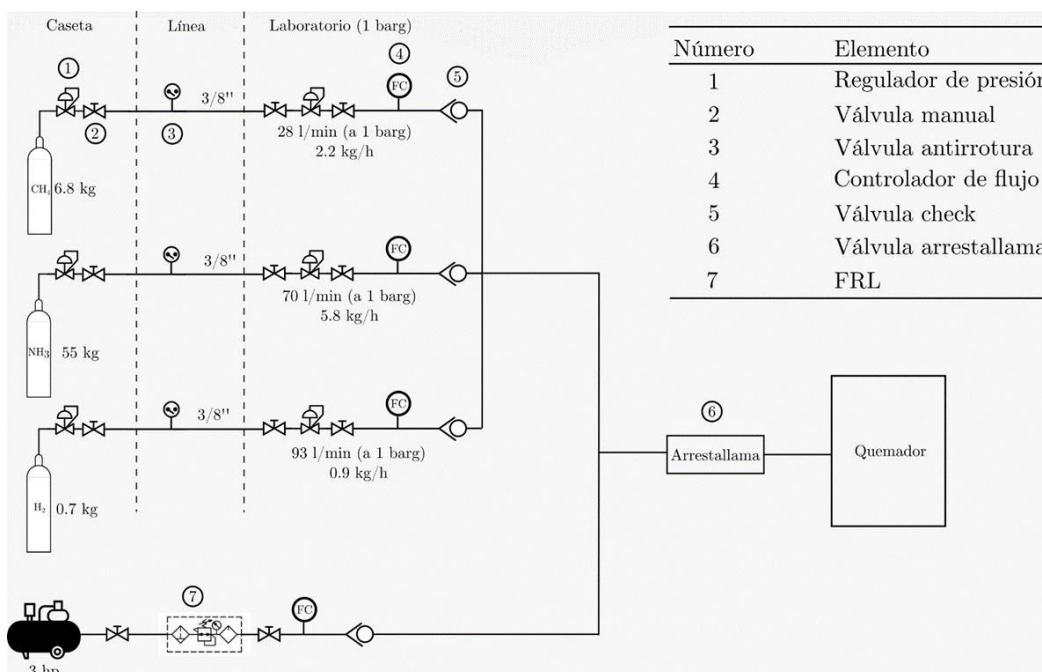


Figura 38: Diagrama P&ID del set up del quemador.

Asimismo, es crucial contemplar una línea específica para el suministro de amoníaco e hidrógeno directamente hacia la microturbina, la cual aprovechará estos gases. Cabe destacar que cada experimento se llevará a cabo de manera secuencial y no simultánea. Esto garantiza un enfoque preciso y dedicado a cada fase del proceso experimental, optimizando así la eficiencia y la seguridad de la instalación.

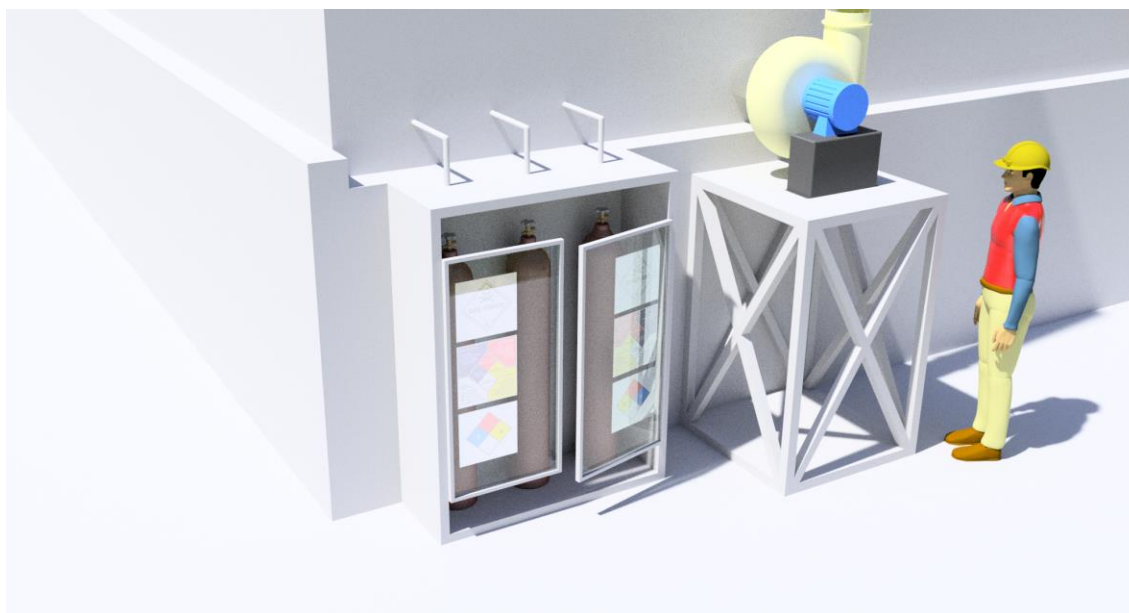


Figura 39: Acercamiento al modelado caseta de gases.

Como se muestra en la Figura 38 la caseta de gases se encontrará afuera del laboratorio, en una zona de fácil acceso y en donde también se verá gran parte del tiempo resguardada de la luz solar.

5.3.4 Red eléctrica

Un aspecto de gran importancia en el diseño y construcción del laboratorio es el sistema eléctrico, que está principalmente definido por los requisitos energéticos de cada equipo y dispositivo relevante tanto dentro como fuera del laboratorio, asegurando así su correcto funcionamiento.

Se elaboró una tabla aproximada que detalla los principales equipos a utilizar, junto con sus respectivas cantidades y potencias de consumo. Este paso fue crucial para obtener una estimación del consumo eléctrico dentro del laboratorio, proporcionando información valiosa al encargado eléctrico de la red.

Figura 40: Consumo de potencia eléctrica.

Equipos de demanda eléctrica	Potencia [W]	Unidades	Potencia Total [W]
Foco Led 60x60	48	20	960
Computador	300	5	1500
Analizador de gases	8	5	40
Compresor	2200	1	2200
Impresora	300	1	300
Televisor	300	1	300
Hervidor	1500	1	1500
Monitores	40	3	120
Extractores baño	12	2	24
Extractor primario	2000	1	2000
Extractor secundario	2000	1	2000
Inyectores	1000	4	4000
			14944

Como se puede observar la potencia total solicitada es de aproximadamente de 15 [kW] teniendo en consideración rangos máximos de potencia. Es importante resaltar que la microturbina, al operar, genera una potencia de 3 [kW]. En este contexto, se decidió inyectar esta energía directamente a la red en lugar de almacenarla.

En esta fase, fue importante contar con un conocimiento detallado de la ubicación planificada para cada mueble, equipo y dispositivo electrónico que se utilizará. Se elaboró un esquema eléctrico detallado para facilitar a los proveedores la correcta disposición de elementos como luminarias, puntos de red, tableros eléctricos, enchufes, entre otros.



Figura 41: Esquema del sistema eléctrico interno.

En la Figura 40 se muestra la distribución de los equipos que se encuentran al interior de la edificación, mientras que en el Figura 41. se muestran los equipos que están afuera de la construcción. En el cual se detalla donde se encuentra el inyector, los extractores y las campanas de extracción.

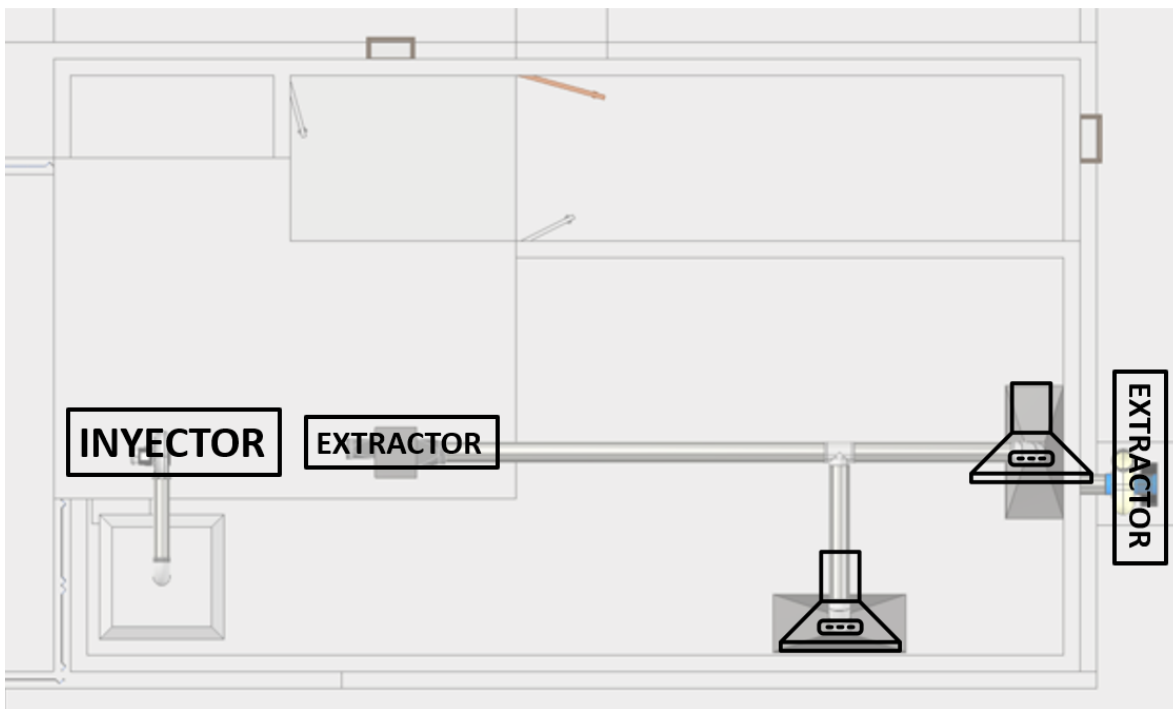


Figura 42: Esquema del sistema eléctrico externo.

5.3.5 Red de agua

En el diseño integral de la instalación, se destaca la importancia de contar con un lavafondo que facilite la limpieza de utensilios o manos en situaciones de contacto cercano con sustancias tóxicas. Además, se implementará un eficiente sistema de drenaje en el laboratorio para garantizar una rápida limpieza en caso de derrames de agentes contaminantes. Para abordar posibles emergencias, se dispondrán aspersores para controlar incendios y crear una barrera de protección en situaciones de fuga de amoníaco, siendo crucial contar con un sistema de drenaje para aguas residuales.

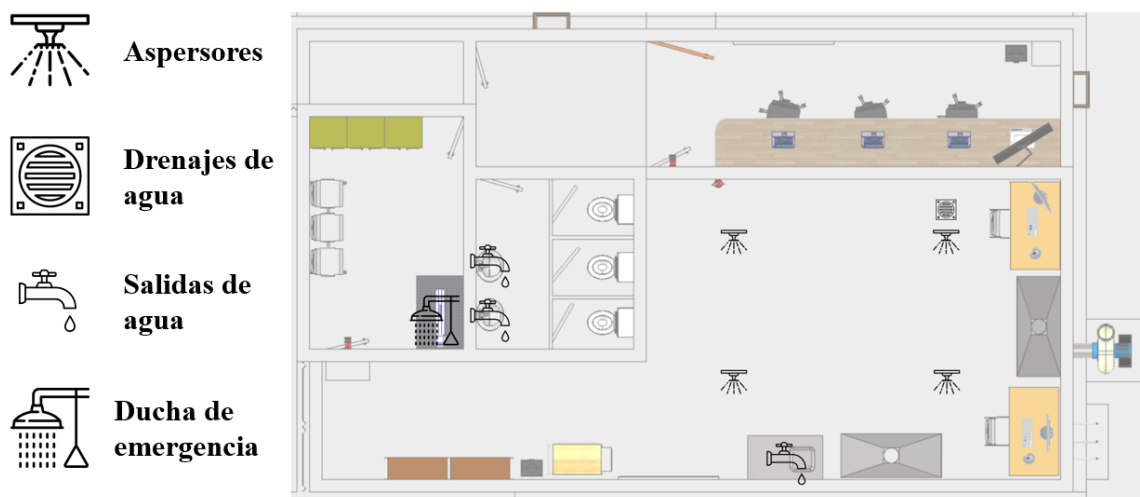


Figura 43: Esquema red de agua.

Es relevante mencionar que se aprovecharán las duchas existentes en los baños/camarines, trabajando en su diseño para integrarlas a la red de agua preexistente. Asimismo, se contempla la presencia de lavamanos en los baños, reforzando las medidas de higiene y seguridad dentro del laboratorio. Esta planificación integral asegura una respuesta eficaz ante distintas situaciones y optimiza la utilización de los recursos hídricos ya disponibles.

6 Recomendaciones para construcción e implementación

Gran parte de estas consideraciones fueron realizadas con proveedores de materiales o construcciones que se debían hacer para el correcto funcionamiento del laboratorio.

6.1 Materiales a utilizar

Este proyecto no solo requería cumplir con condiciones específicas respecto al espacio físico, sino también debía ejecutarse en un plazo determinado y dentro de un presupuesto establecido. En este contexto, la selección de materiales desempeñó un papel crucial para alcanzar los objetivos y cumplir con los plazos establecidos. Se priorizaron materiales de fácil instalación, montaje y adaptación, manteniendo un costo razonable.

La estructura principal, que rodeará la construcción existente, se plantea utilizando perfiles de acero galvanizado para muros estructurales y tabiquería de espesor entre 100 y 200 [mm]. Se incorporarán aislantes, como fibras minerales, poliestireno expandido o espumas de poliuretano, con especial atención a que estén cubiertos o protegidos contra incendios. Todo esto se complementará con placas de yeso-cartón o fibrocemento, así como pintura no inflamable.

Para el techo, se contempla una estructura liviana con aislación térmica y acústica, también mediante perfiles de acero galvanizado, y el uso de aislantes como yeso-cartón o fibrocemento.

Dado que gran parte del piso ya está en buen estado, se propone aplicar un tratamiento de pintura epoxi antideslizante y lavable en las áreas del laboratorio y la zona de monitoreo. En algunas zonas, como el acceso al baño y la bodega, se llevará a cabo un nivelado del suelo para corregir desniveles e irregularidades.

En cuanto a las puertas, se destaca la importancia de que las de acceso y salida de emergencia al laboratorio cumplan con requisitos de resistencia al fuego en caso de incendio.

Para optimizar la eficiencia energética, se recomienda el uso de ventanas de PVC con termo panel en todo el laboratorio. Además, para la ventana de monitoreo, se aconseja una ventana resistente al fuego, ya sea de vidrio templado laminado o vidrio laminado.

6.2 Consideraciones para la construcción e implementación

Como mencioné previamente, nos enfrentamos a limitaciones de espacio dentro del laboratorio, lo cual complica los procesos de instalación de equipos y elementos debido a las dimensiones restringidas y al acceso complicado al laboratorio. Una solución que podría considerarse para abordar este desafío sería la creación de un muro desmontable tipo panel. Este muro permitiría abrir el laboratorio para facilitar el ingreso de elementos, como la microturbina, que tiene un peso superior a los 200 [kg]. Este acceso se realizaría a través de la zona frontal del laboratorio, aunque es importante tener en cuenta que esta solución podría aumentar los costos de construcción.

Otro aspecto crucial en la construcción es la ubicación de los extractores e inyectores sobre el techo del baño. Dado que la zona donde se encuentra el laboratorio es propensa a altas temperaturas, se sugiere la instalación de estos equipos entre un cielo y el techo. Este techo debería tener al menos un metro de altura a partir de la ubicación de los equipos y podría ser diseñado como un techo de aguas o media agua. Esta configuración

proporcionaría aislamiento térmico, permitiría la atenuación del ruido de los equipos y facilitaría el acceso para el mantenimiento.

Una consideración igualmente relevante, como se ha discutido en las reuniones con el equipo, es la consideración de emplear un equipo de extracción adicional. Este tendría la función exclusiva de extraer aire de una sola campana de forma independiente. La idea detrás de esta propuesta es que cada proyecto de investigación cuente con su propio extractor, garantizando así una extracción de aire más eficiente para cada uno. Este enfoque contribuiría a reducir las pérdidas de carga y, al mismo tiempo, ampliaría la capacidad para la realización de experimentos en el laboratorio, facilitando la incorporación de futuros proyectos de investigación.

En último término, pero no menos importante, se destaca la importancia de considerar un sistema de respaldo energético con baterías. Este sistema sería fundamental en situaciones de emergencia o cortes de luz, ya que garantizaría la continuidad en el funcionamiento de elementos esenciales para los experimentos, tales como extractores, iluminación, controladores de flujos, entre otros.

7 Conclusiones

En el análisis del estado del arte, se ha encontrado una abundancia de experiencias relacionadas con la combustión de amoníaco a nivel mundial, especialmente vinculadas a su uso como combustible. No resulta complicado hallar experiencias o desarrollos relacionados con la configuración experimental de estos procesos. Sin embargo, en lo que respecta al diseño físico de los espacios donde se llevan a cabo estos experimentos, la información disponible es escasa, por no decir inexistente. Aunque existen recursos que explican cómo trabajar de manera segura en laboratorios, no se dispone de manuales específicos que detallen la creación de estos espacios destinados a la combustión, siguiendo normativas establecidas. Es importante destacar que la información existente proviene principalmente de laboratorios de índole química o farmacéutica.

En relación con las normativas aplicables al proceso de combustión, se identifican numerosas normas internacionales que rigen la industria del amoníaco en aspectos como refrigeración, transporte, manipulación y almacenamiento. Es fundamental resaltar que el sector marítimo está especialmente regulado en términos del transporte de amoníaco, dada la considerable cantidad que suelen transportar estas embarcaciones. En este contexto, Chile se adhiere mayormente a las normativas internacionales, enfocándose principalmente en regulaciones sobre el almacenamiento, transporte y manipulación del amoníaco, que se emplea principalmente en la industria de fertilizantes y refrigeración. Sin embargo, cabe señalar que no existen normativas específicas relacionadas con la combustión de este compuesto químico.

Respecto a las consideraciones que orientaron el diseño, es importante destacar que estas fueron recopiladas de diversas fuentes, ya que no existe un proceso estándar o etapas claramente definidas para la creación de un laboratorio especializado en la combustión de amoníaco e hidrógeno. Un pilar fundamental en esta etapa de desarrollo fue un manual de seguridad en laboratorios proporcionado por la ACHS, generando así características para las dependencias, edificación y red de servicios básicos como lo son, la red eléctrica, red de agua, red de gases e inmobiliarios. En donde fue crucial añadir características específicas para garantizar el funcionamiento seguro y adecuado de un laboratorio dedicado a la combustión de amoníaco e hidrógeno. Estas consideraciones se derivaron de diversas normativas, conversaciones con expertos en el campo, interacciones con proveedores y participación en cursos especializados para el manejo seguro y apropiado del amoníaco, comprendiendo sus principales características y los riesgos asociados. Estos elementos fundamentales proporcionaron la base esencial para abordar el diseño de manera adecuada en un laboratorio con estas características.

En cuanto a la implementación del diseño, se llevó a cabo un desarrollo preciso en concordancia con el contexto y las condiciones establecidas. Estas condiciones abarcaron el lugar específico y el espacio físico donde se implantaría el laboratorio, los equipos designados para su uso y el presupuesto disponible. Se asignaron espacios para diversas tareas, como el área sanitaria, la antesala, el almacenamiento de equipos y herramientas, así como la oficina de monitoreo. Esta disposición asegura dimensiones adecuadas y un flujo de personal eficiente para garantizar condiciones seguras. Además, se enfrentó el desafío de aprovechar el espacio ya construido, adaptándolo al nuevo diseño y cumpliendo con requisitos específicos mediante modificaciones concretas necesarias para la construcción del laboratorio. Para finalmente entregar las medidas específicas de cada uno de estos espacios. Ver figura 44.

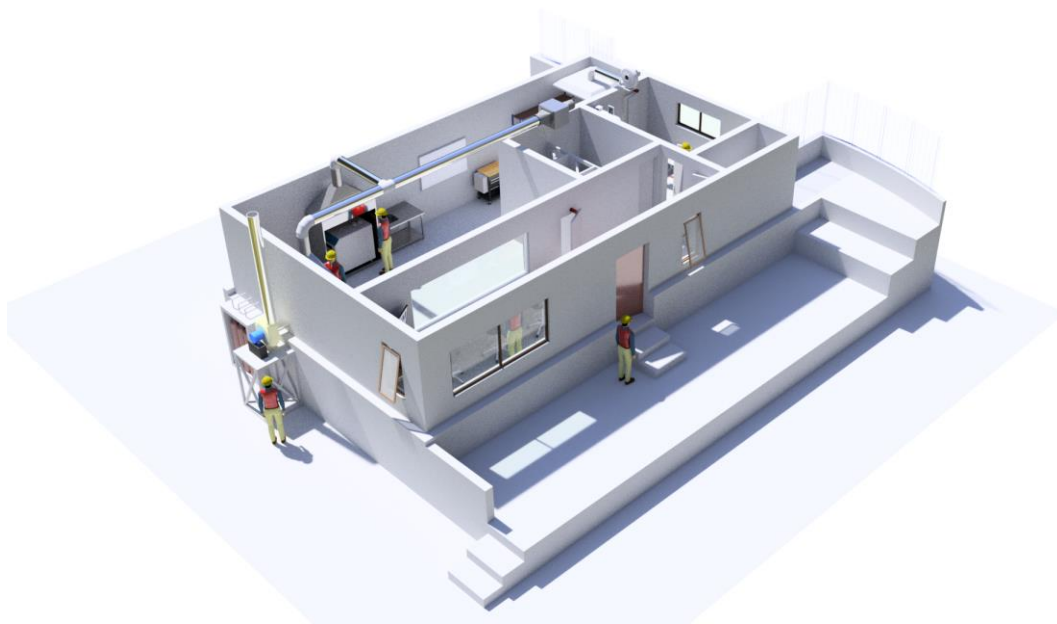


Figura 44: Modelado final laboratorio

Finalmente, se proporcionaron recomendaciones cruciales para la construcción e implementación del laboratorio. Entre estas recomendaciones se destaca la sugerencia de incorporar un respaldo energético que permita el funcionamiento continuo del laboratorio en caso de cortes de energía o emergencias. Asimismo, se ofrecieron orientaciones en el ámbito de la construcción, tales como la elección de materiales para reducir costos y la posición óptima de cada equipo dentro de la estructura. Es fundamental destacar que la consideración de estos aspectos es esencial y debe ser abordada y reevaluada en etapas futuras del proyecto, adaptándose a las necesidades emergentes.

8 Referencias

9 Bibliografía

- [1] “Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- [2] U. Nations, “The Paris Agreement | United Nations.” Accessed: Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- [3] S. P. Filippov and A. B. Yaroslavtsev, “Hydrogen energy: development prospects and materials,” *Russian Chemical Reviews*, vol. 90, no. 6, pp. 627–643, Jun. 2021, doi: 10.1070/RCR5014.
- [4] O. Faye, J. Szpunar, and U. Eduok, “A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 29. 2022. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.112.
- [5] P. Berwal, S. Kumar, and B. Khandelwal, “A comprehensive review on synthesis, chemical kinetics, and practical application of ammonia as future fuel for combustion,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 99. 2021. doi: 10.1016/j.joei.2021.10.001.
- [6] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, and E. C. Okafor, “Science and technology of ammonia combustion,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 1, 2019, doi: 10.1016/j.proci.2018.09.029.
- [7] A. G. Olabi *et al.*, “Large-scale hydrogen production and storage technologies: Current status and future directions,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 45, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.110.
- [8] L. Kang, W. Pan, J. Zhang, W. Wang, and C. Tang, “A review on ammonia blends combustion for industrial applications,” *Fuel*, vol. 332. 2023. doi: 10.1016/j.fuel.2022.126150.
- [9] M. Zhang, X. Wei, J. Wang, Z. Huang, and H. Tan, “The blow-off and transient characteristics of co-firing ammonia/methane fuels in a swirl combustor,” in *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021. doi: 10.1016/j.proci.2020.08.056.
- [10] W. Zhang *et al.*, “Measurements on flame structure of bluff body and swirl stabilized premixed flames close to blow-off,” *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 104, 2019, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.02.010.
- [11] T. Shu, Y. Xue, Z. Zhou, and Z. Ren, “An experimental study of laminar ammonia/methane/air premixed flames using expanding spherical flames,” *Fuel*, vol. 290, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.120003.

- [12] A. Hayakawa, Y. Arakawa, R. Mimoto, K. D. K. A. Somarathne, T. Kudo, and H. Kobayashi, "Experimental investigation of stabilization and emission characteristics of ammonia/air premixed flames in a swirl combustor," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 19, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.046.
- [13] H. Xiao, S. Lai, A. Valera-Medina, J. Li, J. Liu, and H. Fu, "Study on counterflow premixed flames using high concentration ammonia mixed with methane," *Fuel*, vol. 275, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117902.
- [14] H. Li, H. Xiao, and J. Sun, "Laminar burning velocity, Markstein length, and cellular instability of spherically propagating NH₃/H₂/Air premixed flames at moderate pressures," *Combust Flame*, vol. 241, 2022, doi: 10.1016/j.combustflame.2022.112079.
- [15] M. M. Kamal and A. A. Mohamad, "Combustion in porous media," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 220, no. 5, 2006, doi: 10.1243/09576509JPE169.
- [16] M. A. Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. A. Bakar, A. A. Mohamad, R. M. N. Muhad, and M. K. Abdullah, "Combustion in porous media and its applications - A comprehensive survey," *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 8, 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2008.10.009.
- [17] H. Nozari, G. Karaca, O. Tuncer, and A. Karabeyoglu, "Porous medium based burner for efficient and clean combustion of ammonia–hydrogen–air systems," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 21, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.234.
- [18] O. Tunçer, B. Kaynaroglu, M. C. Karakaya, S. Kahraman, O. Çetiner-Yildirim, and C. Baytas, "Preliminary investigation of a swirl stabilized premixed combustor," *Fuel*, vol. 115, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2012.11.085.
- [19] R. C. Rocha, C. F. Ramos, M. Costa, and X. S. Bai, "Combustion of NH₃/CH₄/Air and NH₃/H₂/Air Mixtures in a Porous Burner: Experiments and Kinetic Modeling," *Energy and Fuels*, vol. 33, no. 12, 2019, doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b02948.
- [20] T. Carvalho, M. Costa, C. Casaca, R. C. Catapan, and A. A. M. Oliveira, "Destruction of the tar present in syngas by combustion in porous media," *Energy and Fuels*, vol. 29, no. 2, 2015, doi: 10.1021/ef501807p.
- [21] G. Vignat, B. Akoush, E. R. Toro, E. Boigné, and M. Ihme, "Combustion of lean ammonia-hydrogen fuel blends in a porous media burner," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 39, no. 4, 2023, doi: 10.1016/j.proci.2022.07.054.
- [22] J. Dunnmon, S. Sobhani, M. Wu, R. Fahrig, and M. Ihme, "An investigation of internal flame structure in porous media combustion via X-ray Computed Tomography," *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 3, 2017, doi: 10.1016/j.proci.2016.06.188.
- [23] D. Trimis and F. Durst, "Combustion in a porous medium-advances and applications," *Combustion Science and Technology*, vol. 121, no. 1–6, 1996, doi: 10.1080/00102209608935592.

- [24] Arif Karabeyoglu and Brian Evans, "Fuel Conditioning System for Ammonia-Fired Power Plants," chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nh3fuel.files.wordpress.com/2012/10/evans-brian.pdf.
- [25] A. Valera-Medina, H. Xiao, M. Owen-Jones, W. I. F. David, and P. J. Bowen, "Ammonia for power," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69. Elsevier Ltd, pp. 63–102, Nov. 01, 2018. doi: 10.1016/j.pecs.2018.07.001.
- [26] "Ammonia-as-fuel-final-rev".
- [27] *Industria del Amoníaco: estado actual y oportunidades para la descarbonización*. 2022. [Online]. Available: www.energia.gob.cl
- [28] "Acute Exposure Guideline Levels for Airborne Chemicals | US EPA." Accessed: Dec. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/aegl>
- [29] "HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD NCh 2245 Of. 2015." [Online]. Available: www.indura.net
- [30] "Ammonia_ship_fuel_2020-11_web".
- [31] "Ammonia_as_Marine_Fuel_Whitepaper_20188".
- [32] "NORMA CHILENA OFICIAL NCh382.Of98."
- [33] "NCh2190."
- [34] E. Nacional De Electricidad *et al.*, "NCh1411/4 II."
- [35] "SEÑALÉTICA SUSTANCIAS PELIGROSAS – Serma Chile." Accessed: Dec. 17, 2023. [Online]. Available: <http://www.sermachile.cl/nch2190/>
- [36] wperez, "HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD NCh 2245 Of. 2015 AMONIACO ANHÍDRIDO SECCIÓN 1-IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO Y DE LA EMPRESA." [Online]. Available: www.indura.net
- [37] "Ley Chile - Decreto 43 29-MAR-2016 MINISTERIO DE SALUD - Biblioteca del Congreso Nacional." Accessed: Dec. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1088802>
- [38] "Ley Chile - Decreto 298 11-FEB-1995 MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES - Biblioteca del Congreso Nacional." Accessed: Dec. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=12087&idParte=0>
- [39] "Ley Chile - Decreto 594 29-ABR-2000 MINISTERIO DE SALUD - Biblioteca del Congreso Nacional." Accessed: Dec. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- [40] M. Angélica Gutiérrez Escobar Tecnólogo Médico, M. Sc René Franjola Tepper Tecnólogo Médico Luis Zaror Cornejo Tecnólogo Médico, and M. Sepúlveda Rieloff Químico Farmacéutico Fernando Fábrega González Médico Veterinario, "Manual de Seguridad en Laboratorios."
- [41] "Ley Chile - Decreto 594 29-ABR-2000 MINISTERIO DE SALUD - Biblioteca del Congreso Nacional." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766&idParte=8643150&idVersion=>

- [42] "Hojas técnicas Velocidad del aire – S&P." Accessed: Dec. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-cl/hojas-tecnicas-velocidad-del-aire/>
- [43] "Sistemas de ventilación en laboratorios químicos - Suministros Industriales." Accessed: Dec. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.suministrosindustriales.uy/sistemas-de-ventilacion-en-laboratorios-quimicos/>
- [44] "CAPITULO 3 Entiende la ventilación en todos sus ámbitos."
- [45] "CAPITULO 4 Claves y conceptos de la ventilación localizada."
- [46] "CAPITULO 5 Cálculos y aplicación práctica para una correcta circulación de aire por conductos."

10 Anexos

10.1 Anexo 1

Tabla 9: Normativas internacionales existentes para el NH para sus distintas áreas [27].

Código / Estándar / Regla / Guía	Título	Producción	Acondicionamiento	Almacenamiento	Transporte	Aplicación
Estados Unidos						
US-OSHA 29 CFR 1910.119	Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals Standard	X	X	X	X	X
ANSI K61 / CGA G-2.1-2014	American National Standard Safety Requirement for the Storage and Handling of Anhydrous Ammonia		X	X	X	
CGA G-2.2	Guideline Method for Determining Minimum of 0.2% Water in Anhydrous Ammonia	X	X	X	X	
OSHA – 29 CFR 1910.111	Storage and handling of anhydrous ammonia		X	X	X	
ANSI/IIAR 2-2021	American National Standard for Equipment, Design and Installation of Closed-Circuit Ammonia Mechanical Refrigerating System					X
ANSI/IIAR 3-2012	American National Standard for Ammonia Refrigeration Valves					X
ANSI/IIAR 4-2020	Installation of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems					X
ANSI/IIAR 5-2019	American National Standard for Start-Up of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems					X
ANSI/IIAR 6 2019	Inspection, Testing, and Maintenance of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems					X
ANSI/IIAR 7-2019	Developing Operating Procedures for Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems					X
ANSI/IIAR 8-2020	Decommissioning of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems					X
ANSI/IIAR 9-2020	Standard for Minimum System Safety Requirements for Existing Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems					X
US-Dept. of Transportation 49 CFR Parts 171-180	Transportation of Hazardous Materials				X	
US Code of Federal	Transportations of hazardous liquids by pipeline				X	

Regulations no. 49, part 195						
API 570	Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of In-Service Piping Systems	X	X	X	X	
API 620 R	Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks			X		
ASHRAE 15-2013	Safety Standards for Refrigeration Systems					X
ASHRAE 34-2013	Designation and Safety Classification of Refrigerants					X
US-EPA RMP	Risk Management Plan	X	X	X	X	X
US-EPA SNAP	Sig. New Alt. Policy					X
US-EPA EPCRA	Emergency Community Right-to-know Act			X	X	X
NFPA 400	Fundamental safeguards for the storage, use, and handling of hazardous materials in all occupancies and facilities			X	X	X
NFPA 2	Hydrogen Technologies Code	X				
NFPA 704	Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response	X	X	X	X	X
Europa						
EN 378	Refrigerating systems and heat pumps. Safety and environmental requirements. Basic requirements, definitions, classification and selection criteria					X
EN 14620	Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flatbottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C.			X		
ATEX 94/9/EC	Equipment Directive – Equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres	X	X	X	X	X
ATEX 99/92/EC	Workplace Directive – Minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres.	X	X	X	X	X
EN 60079	Explosive atmospheres. Electrical installations inspection and maintenance	X	X	X	X	X
EN IEC 60079-10-1:2021	Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres	X	X	X	X	X
IEC 60335-2-40	Household and similar electrical appliances – Safety – Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers					X
PED 97/23/EC	The Pressure Equipment Directive	X	X	X	X	
DIRECTIVA 2012/18/UE	Control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas	X	X	X	X	X
EMSA - Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations					X	X
DSB - Guidance on use of dangerous substances						X
Australia						

Act No. 137, 2011	Work Health Safety Act No. 137, 2011	X	X	X	X	X
AS/NZS 2022:2003	Anhydrous ammonia—Storage and handling			X	X	
AS/NZS 60079.10.1:2009	Explosive atmospheres – Classification of areas - Explosive gas atmospheres	X	X	X	X	X
AS/NZS 5149:2016:	Refrigerating systems and heat pumps (part 1-4)					X
AS 3873-2001	Pressure equipment – Operation and maintenance		X	X	X	
AS/NZS 3788:2006	Pressure equipment – In-service inspection		X	X	X	
Model Work Health and Safety Regulations 9 January 2014	Model Work Health and Safety Regulations	X	X	X	X	X
China						
Decree – 591	Regulations on Safe Management of Hazardous Chemicals in China	X	X	X	X	X
GB28009-2011	Safety code for cold store			X	X	
GB50072-2010	Code for design of cold storage			X	X	
India						
DM Act 2005	Disaster Management Act, 2005		X	X	X	X
IS 4544 (2000), ICS 71.060;13.300	Ammonia – Code of Safety [CHD 8: Occupational Safety, Health and Chemical Hazards]		X	X	X	X
Gas Cylinders Rules, 2004	Filling, transport and importation of liquid ammonia or compressed ammonia gas in cylinders				X	
IS 660 (1963)	Safety code for mechanical refrigeration					X
National Policy on Safety, Health and Environment at Workplace		X	X	X	X	X
Internacional						
ASME B31.4-2019	Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries		X	X	X	
ASME B31.3 – 2020	Requirements for piping found in petroleum refineries; chemical, pharmaceutical, textile, paper, semiconductor, and cryogenic plants; and related processing plants and terminals		X	X	X	
ASME – BPVC-VIII-1	Boiler and Pressure Vessel Code – Section VIII, Division 1			X	X	
ASME – BPVC-VIII-2	Boiler and Pressure Vessel Code – Section VIII, Division 2			X	X	
ASME – BPVC-XII	Boiler and Pressure Vessel Code – Section XII			X	X	
ASME B31.3 – 2020	Requirements for piping found in petroleum refineries; chemical, pharmaceutical, textile, paper, semiconductor, and cryogenic plants; and related processing plants and terminals	X	X	X	X	

ISO 5771:2008	Rubber hoses and hose assemblies for transferring anhydrous ammonia – Specification		X	X	X	
ISO 13623 – 2017	Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems		X	X	X	
ISO 3165:1976	Sampling of chemical products for industrial use – Safety in sampling	X				X
ISO 11114-1:2020	Gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents — Part 1: Metallic materials			X	X	
ISO 4276:1978	Anhydrous Ammonia for industrial Use; Evaluation of residue on evaporation: Gravimetric method	X				X
ISO 6957:1988	Copper alloys — Ammonia test for stress corrosion resistance			X	X	X
ISO 17584:2022	Refrigerant properties					X
ISO 7103:1982	Liquefied anhydrous ammonia for industrial use— Sampling—Taking a laboratory sample	X				X
ISO 7105:1985	Liquefied anhydrous ammonia for industrial use— Determination of water content—Karl Fischer method	X				X
ISO 7106:1985	Liquefied anhydrous ammonia for industrial use— Determination of oil content—Gravimetric and infra-red spectrometric methods	X				X
ISO 7108:1985	Ammonia solution for industrial use — Determination of ammonia content — Titrimetric method	X				X
ISO 7109:1985	Ammonia solution for industrial use — Determination of residue after evaporation at 105 degrees C — Gravimetric method	X				X
ISO 20519:2021	Ships and marine technology — Specification for bunkering of liquefied natural gas fuelled vessels				X	X
ISO 28460:2010	Petroleum and natural gas industries — Installation and equipment for liquefied natural gas — Ship-to-shore interface and port operations				X	X
IGC Code – Chapter 16	Use of Cargo as Fuel			X	X	X
IGC Code - regulations 17.12.1 to 7	Special Requirements - 17.12 Ammonia			X	X	
IGC Code – Chapter 6	Materials of Construction and Quality Control			X	X	
IGF Code – part A sec. 2.3	Functional requirements for all appliances and arrangements related to the usage of low-flashpoint fuels				X	X
IGF Code – part A sec. 4.2.1 & 4.2.3	Risks arising from the use of low-flashpoint fuels affecting persons on board, the environment, the structural strength or the integrity of the ship			X	X	X
IGF Code – part	Unintended accumulation of explosive, flammable			X	X	X

A sec. 3.2.6 & 5.2.1.3	or toxic gas concentrations					
IGF Code – part A-1 SEC. 7	Material and general pipe design			X	X	
SOLAS regulation II-1/55	Alternative design and arrangements: methodology for alternative design and arrangements for machinery, electrical installations and low-flashpoint fuel storage and distribution systems			X	X	X
IMO MSC.1/Circ. 1455	Guidelines for the approval of alternatives and equivalents as provided for in various IMO instruments				X	X
IACS – Rec No.142.	LNG Bunkering Guidelines				X	X
IACS – UR M57	Use of ammonia as a refrigerant - 1993					X
DNV – Rules for Classification: Ships – 2022 - Pt.6 Ch.2 Sec.8	Alternative Fuels – Fuel Ready: requirements related to later conversion to one or several alternative fuels other than the fuel the vessel is originally designed for			X	X	X
DNV – Rules for Classification: Ships – 2022 - Pt.6 Ch.2 Sec.14	Gas Fuelled Ship Installations - Gas Fuelled Ammonia: criteria for the arrangement and installation of machinery for propulsion and auxiliary purposes, using ammonia as fuel			X	X	X
ABS – Guide for Gas and Other Low-Flashpoint Fuel Ready Vessels	Optional application to ship types other than those falling under the scope of the IGC Code and the ABS requirements under Part 5C, Chapter 8 of the ABS Rules for Building and Classing Marine Vessels and burning their cargo as fuel.			X	X	X
ABS – Guide for Ammonia Fueled Vessels	Guide for the design, construction, and survey of vessels utilizing anhydrous ammonia (ammonia) as fuel. This guide is focused on systems and arrangements provided for the use of ammonia for propulsion and auxiliary systems.			X	X	X
Korean Register - Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels	Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels			X	X	X
IAPH – LNG Bunker Checklists					X	X
SGMF – Gas as a marine fuel (safety guidelines)					X	X
Bureau Veritas - NR671 - July 2022	Ammonia - Fuelled Ships: Tentative Rules			X	X	X
DNV Recommended Practice G105	Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities				X	X
DNV - Ammonia as a marine fuel safety handbook					X	X

10.2 Anexo 2

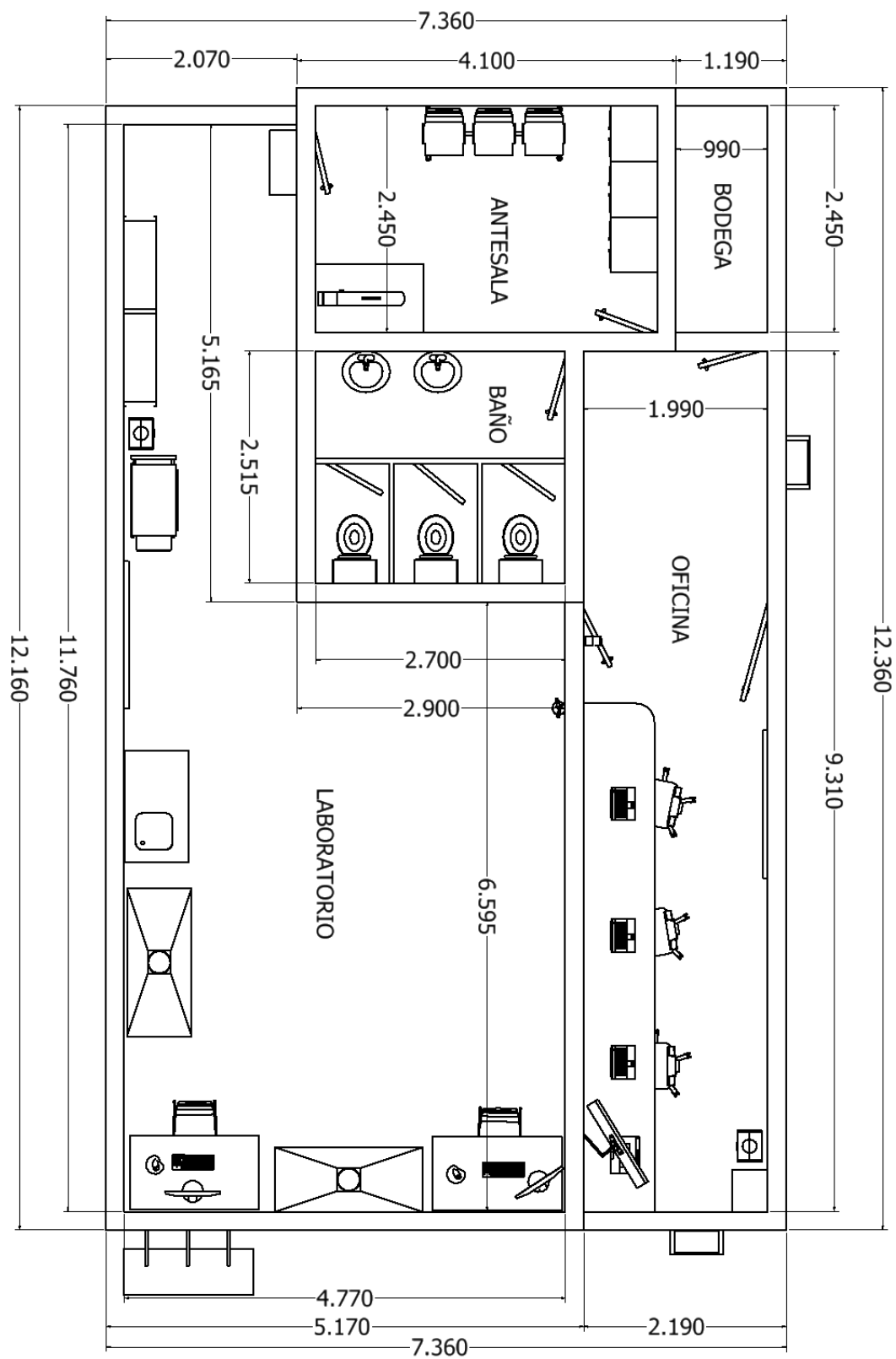


Figura 45: Plano con dimensiones generales edificación. Se consideran muros de 200 [mm].

10.3 Anexo 3

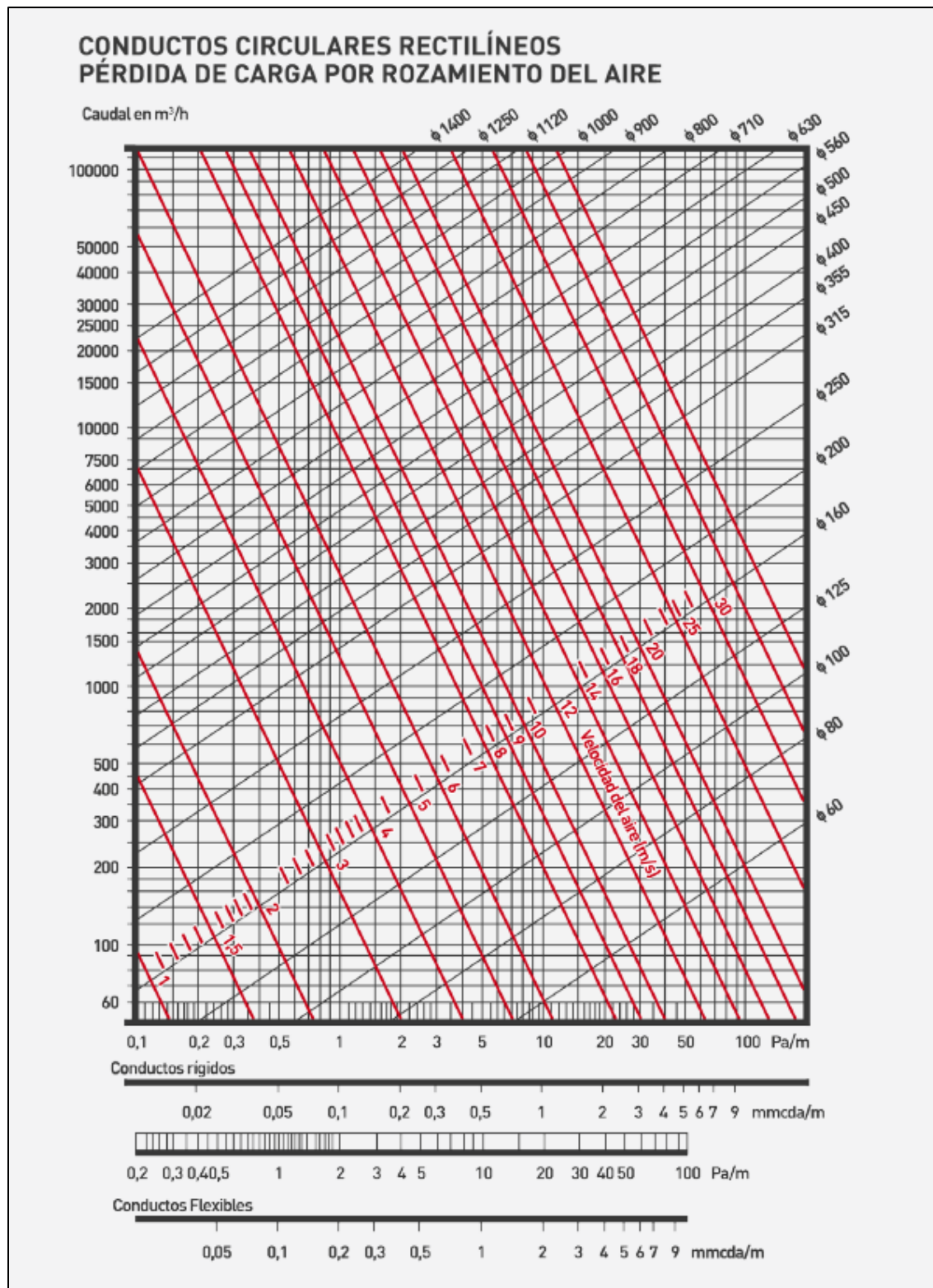


Figura 46: Gráfica para obtención de velocidad de aire[46].

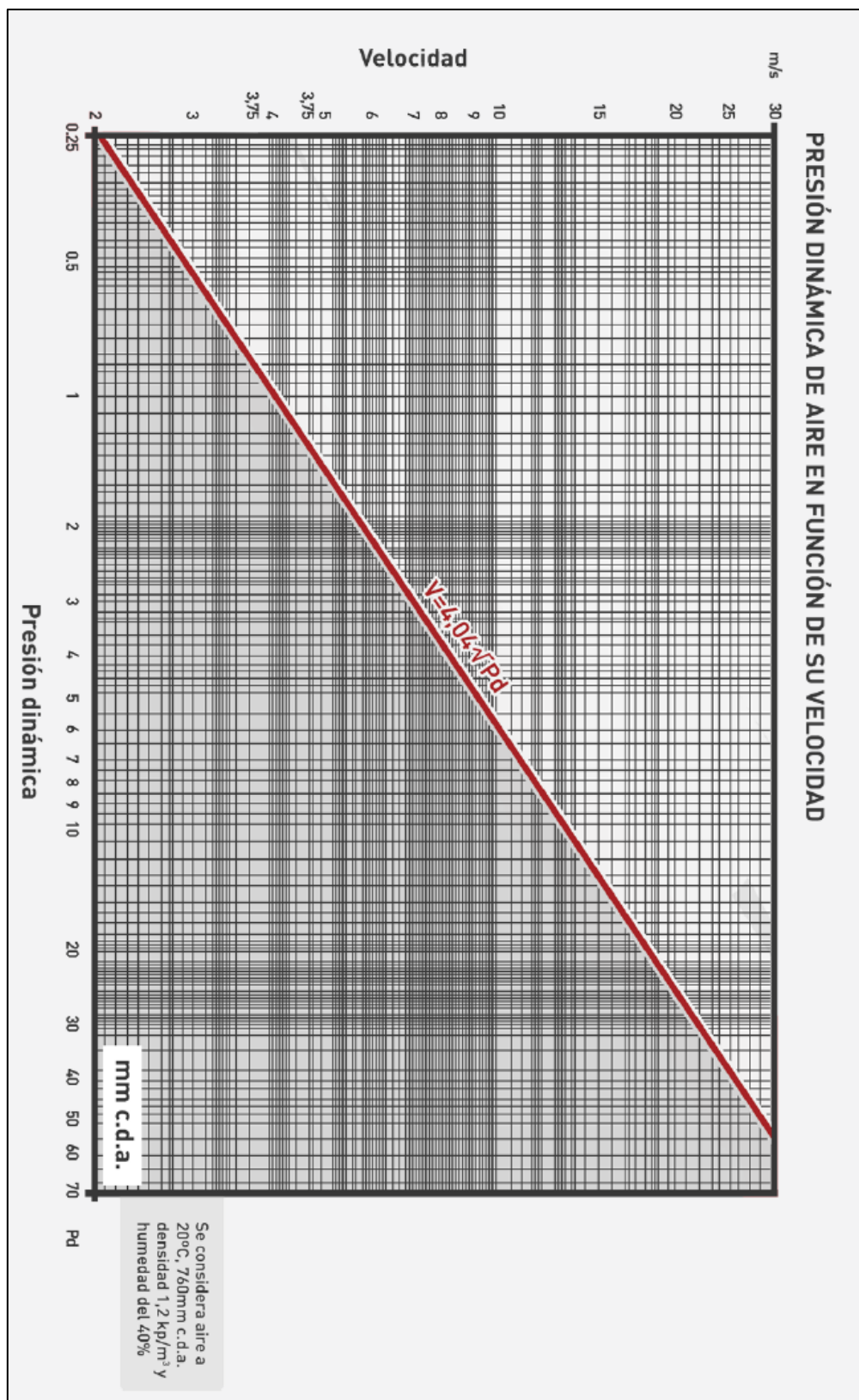


Figura 47: Gráfica para obtención de presión dinámica[46].

ENTRADAS A CONDUCTOS

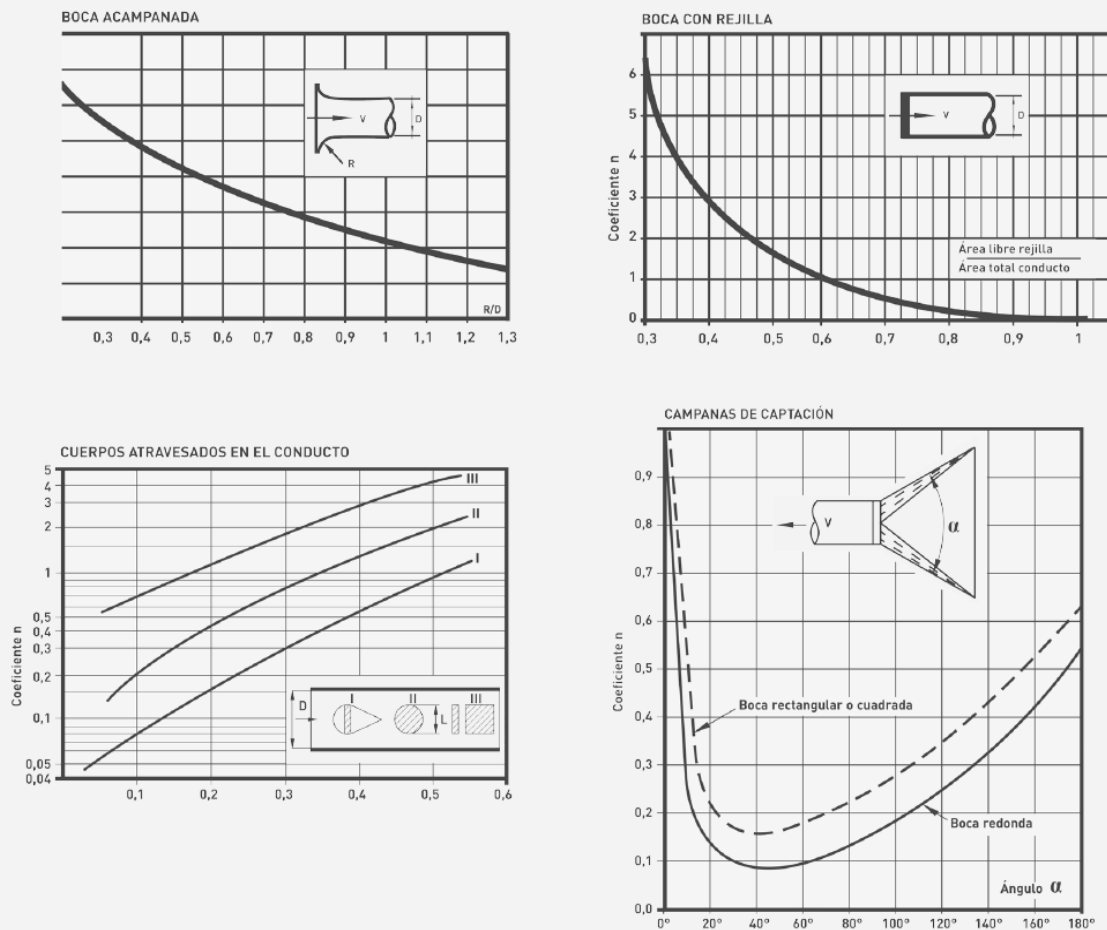


Figura 48: Obtención factor n para entradas a conductos[46].

COEFICIENTES <<n>> DE PÉRDIDAS DE CARGA CODOS

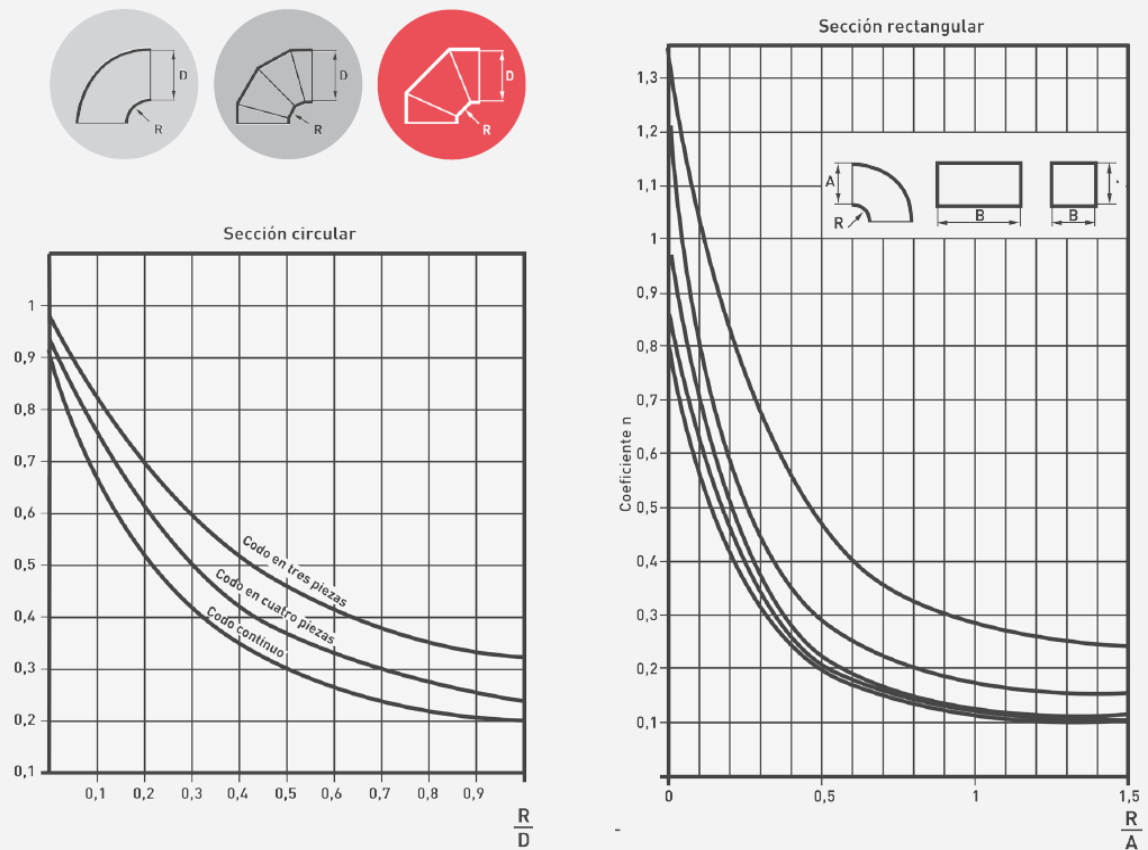


Figura 49: Obtención de factor n para carga en codos[46].