

Diseño y fabricación de un quemador de biogás para el evaporador pirotubular del laboratorio de sistemas térmicos de la UIS

Edgar Santiago Acosta Pinilla

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

PhD. en ingeniería química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería mecánica

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

A mi padre por inculcarme desde pequeño de que en la vida hay que subirse en hombros de gigante y que con poco se puede lograr mucho, a mi madre por su apoyo incondicional, paciencia y los miles de sacrificios que hizo en el trascurso y desarrollo de mi carrera profesional, y le pido perdón por esa vez que le dije que si algún día llegaba a ser ingeniero no quería ser como ella, la vida me mostro que sin ella no hubiera llegado tan lejos, a mi hermano por insistir en que no me rindiera y por su compañía en cada locura que hice en esta Universidad, a Doña Flor Alba Méndez la dueña de la pensión donde viví estos últimos años, por su la alimentación y cuidados. Y todos mis amigos y familiares que creyeron en mí.

**Edgar Santiago Acosta Pinilla**

### **Agradecimientos**

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este proyecto,

A mi director de proyecto Yesid Javier Rueda Ordoñez por su dirección y acompañamiento en el desarrollo de este proyecto, quien me asesoro de la mejor manera posible en cómo debía abarcar cada uno de los temas de este trabajo de investigación.

Al profesor Humberto Escalante Hernández, por gestionar las visitas a la granja, proporcionar la cromatografía del biogás y su asesoramiento en el uso y manejo del biogás, sus recomendaciones fueron de gran ayuda.

Al profesor Diego Luis Franco Jacome por los conceptos impartidos en la materia de combustión industrial que fueron útiles para determinar las propiedades térmicas y de combustión del biogás.

A Harvey veterinario en jefe de la granja Villa Porkinos por permitir el acceso a las instalaciones, hacer el uso biogás y disponer de la ayuda de sus trabajadores de la granja.

A Henry Ariza quien también se encontraba haciendo su proyecto de grado con la granja compartió información valiosa sobre el biogás y me ayudo a llegar a la granja en más de una ocasión

A Mi hermano Duván Acosta por su compañía y colaboración en la toma de datos para determinar la eficiencia del quemador.

A José Suarez e Israel mantilla quienes me ayudaron con el cálculo de los parámetros de operación del evaporador piro tubular

A los técnicos del taller de la escuela de ingeniería mecánica Cesar Velasco, Fredy Vargas y Henry Cruz por su apoyo en la fabricación del quemador

A todos ellos, mi más profundo agradecimiento por su tiempo, conocimientos y apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto.

**Edgar Santiago Acosta Pinilla**

## Contenido

1. Generalidades .....	16
1.1. Planteamiento del problema .....	16
1.2. Justificación .....	17
2. Objetivos .....	18
2.1. Objetivo General .....	18
2.2. Objetivos Específicos .....	18
3. Marco referencial .....	19
3.1. Antecedentes de investigación .....	19
3.2. Referencias teóricas .....	23
3.2.1 Generalidades del biogás .....	23
3.2.1.1. Constituyentes del biogás. e grado.....	23
3.2.2. Aprovechamiento, tratamientos y uso del biogás.....	23
3.2.2.1. Valorización del biogás. ....	23
3.2.2.2. Aprovechamiento directo del biogás. ....	24
3.2.2.3. Aprovechamiento indirecto del biogás.....	24
3.2.3. Acondicionamiento del biogás.....	24
3.2.4. Uso del biogás limpio .....	25
3.2.5. Quemadores y quema de biogás .....	25
3.2.5.1. Quemador de caldera.....	25
3.2.5.2. Quema de Biogás.....	26
3.2.5.3. Quemador de biogás abierto .....	26
3.2.5.4. Quemador de biogás cerrado .....	26
3.2.5.5. Quemador de bigas semicerrado.....	26
3.2.6. Biodigestores .....	26
3.2.6.1. Sistema.bio.....	27

4. Diseño conceptual .....	28
4.2. Proceso de obtención del biogás en la granja Villa Porkinos.....	28
4.2. Despliegue de la función de calidad (QFD).....	31
4.2.1. Requerimientos del Biogás .....	31
4.2.2. Parámetros de operación del evaporador .....	31
4.2.3. Requerimientos de diseño del quemador .....	33
4.2.4. Matriz de calidad (QFD).....	33
4.2.5. Selección de alternativas.....	34
4.2.5.1. Alternativas de diseño .....	35
4.2.6. Matriz pugh .....	43
5. Diseño de detalle del quemador .....	45
5.1. Cálculos .....	45
5.1.1. Análisis de combustión .....	45
5.1.2. Proceso iterativo para obtener una temperatura de llama adiabática inicial: .....	49
5.1.3. Poder calorífico y temperatura de llama adiabática .....	51
5.1.3.1. Entalpías de formación de los productos y reactivos de la reacción.....	51
5.1.3.2. Calor específico de los productos de combustión.....	52
5.1.3.3. Poder calorífico superior e inferior del biogás.....	54
5.1.3.4. Temperatura de llama adiabática. ....	55
5.1.3.5. Temperatura de gases de combustión. ....	55
5.1. Calor requerido por el evaporador.....	56
5.1.3. Análisis termodinámico para el cálculo del calor útil: .....	56
5.1.4. Pérdidas de calor por convección y radiación .....	58
5.1.5. Transferencia de calor por convección natural .....	61
5.1.6. Transferencia de calor por radiación .....	62
5.1.7. Pérdida de calor por gases: .....	63
5.2. Propiedades de la mezcla aire combustible .....	64

5.2.3. Clasificación del biogás.....	65
5.2.4. Flujo volumétrico de combustible.....	67
5.2.5. Flujo volumétrico de aire.....	68
5.2.6. Densidad de la mezcla Aire-biogás.....	68
5.3. Diseño de detalle del quemador.....	70
5.3.3. Diámetro del inyector.....	70
5.3.4. Compresibilidad del biogas.....	70
5.3.5. Potencia específica.....	73
5.3.6. Diámetro de cada puerto o diámetro hidráulico.....	74
5.3.7. Diámetro de enfriamiento de la mezcla aire-gas:.....	74
5.3.8. Tasa de aire primario (Ra):.....	76
5.3.9. Diámetro del cuello del Venturi (dc).....	77
5.3.10. Velocidad de la mezcla a la salida de cada puerto.....	79
6. Fabricación del quemador.....	80
6.1. Fabricación.....	80
6.2. Ensamble.....	83
7.1. Eficiencia térmica.....	85
7.1.1. Presión del Biogás.....	86
7.1.2. Perdidas de calor durante el desarrollo de las pruebas.....	87
7.1.2.1. Propiedades de la combustión con gas natural Vanti.....	89
7.1.3. Eficiencia térmica de los quemadores con las distintas configuraciones.....	92
7.2. Eficiencia de la combustión del quemador fabricado.....	93

### Lista de tablas

Tabla 1. Características generales del biogás.....	21
Tabla 2. Concentración de los constituyentes de biogás de las etapas de producción orgánica. ....	22
Tabla 3. Concentraciones de biogás.....	23
Tabla 4. Tratamiento según el uso del biogás .....	25
Tabla 5. Capacidad productiva de los biodigestores sistema.bio para estiércol de cerdo.....	27
Tabla 7. Descripción de la batería de biodigestores.....	30
Tabla 8. Constituyentes del biogás de la granja villa Porkinos.....	31
Tabla 9. Parametros de operación del evaporador .....	32
Tabla 10. Organización de los requerimientos del consumidor .....	33
Tabla 11. Matriz de calidad para selección de requerimientos de diseño .....	34
Tabla 12. Matriz pugh.....	43
Tabla 13. Análisis último de los elementos que conforman el biogás .....	45
Tabla 14. Fracción molar de los productos de combustión con aires estequiométrico.....	46
Tabla 15. Fracción molar de los productos de combustión con humedad y exceso de aire.....	48
Tabla 16. Poder calorífico de los reactivos de combustión.....	49
Tabla 17. Resultados del proceso iterativo para obtener la temperatura de llama adiabática considerando aire estequiométrico, $q_i$ y $\Delta h$ están en [kJ/kmol].....	50
Tabla 18. Resultados del proceso iterativo para obtener la temperatura de llama adiabática considerando exceso de aire en la estequiometria, $q_i$ y $\Delta h$ están en [kJ/kmol] .....	50
Tabla 19. Entalpías de formación de los reactivos de combustión .....	51
Tabla 20. Entalpías de formación de los productos de la reacción con aire estequiométrico.....	51
Tabla 21. Entalpías de formación de los productos de la reacción con exceso de aire.....	52
Tabla 22. Calor específico de los productos combustión con aire estequiométrico a 2020 k.....	52
Tabla 23. Calor específico de los productos de combustión con aire en exceso a 1730 k.....	53
Tabla 24. Calor específico de los productos de combustión en estado ideal .....	53
Tabla 25. Temperatura superficial de la caldera por zonas [C°] .....	59
Tabla 26. Propiedades del aire a una temperatura de película de 59,55 [C°] .....	60
Tabla 27. Pérdidas de calor hacia el ambiente por convección y radiación.....	63
Tabla 28. Condiciones atmosféricas de Lebrija .....	64
Tabla 29. Clasificación de los gases combustibles según norma NTC 3527 .....	66

Tabla 30. Índice de Wobbe superior e inferior del biogás y el gas natural Vanti .....	66
Tabla 31. Diámetro de enfriamiento para llamas estequiométricas a 1 atm. Y 25C° .....	75
Tabla 32. Dimensiones del quemador .....	78
Tabla 33. Fabricación del Venturi de la cámara de mezclado .....	80
Tabla 34. Fabricación de la cabeza del mezclador .....	82
Tabla 35. Parámetros del arreglo de presiones .....	87
Tabla 36. Propiedades del aire a temperaturas de película de los lugares donde se realizaron las pruebas .....	88
Tabla 37. Pérdidas de calor de la olleta al ambiente por convección natural y radiación .....	88
Tabla 38. Pérdidas de calor por vapor de agua .....	89
Tabla 39. Análisis último del gas natural Vanti .....	89
Tabla 40. Coeficientes estequiométricos, calor específico y peso molecular de los productos de combustión del gas natural .....	91
Tabla 41. Pérdidas de calor por gases de combustión en quemadores .....	92
Tabla 42. Correlación de eficiencias térmicas .....	93
Tabla 43. Dimensiones y parámetros de operación de los quemadores .....	94
Tabla 44. Correlación de eficiencias de combustión .....	96
Tabla 45. Información general del quemador fabricado .....	97
Tabla 46. Costos de materiales del quemador .....	99
Tabla 47. Costo de accesorios de instalación .....	99
Tabla 48. Costos de materiales del manómetro en U .....	100
Tabla 49. Transporte granja villa Porkinos .....	100
Tabla 50. Costos totales .....	100

### Lista de figuras

Figura 1. Mezclador de aire-combustible para un motor de combustión interna .....	20
Figura 3. Esquema de producción de biogás y digerido .....	29
Figura 4. Esquema de producción y aprovechamiento de biogás .....	29
Figura 5. Instalación de biodigestores .....	30
Figura 6. Filtros de H <sub>2</sub> S a la salida de biogás de los biodigestores .....	30
Figura 8. Evaporador del laboratorio de sistemas térmicos.....	32
Figura 9. Quemador atmosférico de premezcla para gas natural.....	35
Figura 10. Inyector de gas calibrado.....	36
Figura 11. Cámara de mezcla de aire y gas.....	36
Figura 12. Flujos y presiones en un tubo Venturi .....	37
Figura 13. Efecto Venturi en un quemador atmosférico de premezcla .....	38
Figura 14. Cabeza de un quemador atmosférico de premezcla .....	38
Figura 15. Quemador de premezcla con aire forzado EQA 76.....	38
Figura 16. Quemador de premezcla con ventilador de tiro forzado .....	40
Figura 17. Quemador Bunsen .....	41
Figura 18. Partes principales.....	41
Figura 19. Tipos de llama en un quemador bunsen .....	42
Figura 20. Boceto del quemador.....	44
Figura 21. Instalación del quemador en el evaporador .....	44
Figura 22. División del evaporador para la toma de temperatura superficial .....	59
Figura 23. División de la caldera para el calculo de perdidas de calor por conveccion .....	60
Figura 24. Configuraciones geométricas y coeficientes de descarga un inyector .....	70
Figura 27. Principales dimensiones de un quemador atmosférico de premezcla .....	77
Figura 28. Venturi del mezclador.....	81
Figura 29. Tapa de aire primario .....	81
Figura 30. Puerto de aire primario .....	81
Figura 31. Tapa superior de la cabeza del mezclador .....	83
Figura 32. Cabeza del mezclador.....	83
Figura 33. Quemador fabricado desarmado.....	84

Figura 34. Quemador fabricado armado .....	84
Figura 35. Contador de gas instalado a la salida de gas de los biodigestores.....	86
Figura 36. Medición de la temperatura del agua calentada con biogás .....	86
Figura 37. Entrada de gas y aire primario.....	94
Figura 38. Quemador fabricado usando a la derecha gas natural y a la izquierda biogás .....	98

### Litas de apéndices

Apéndice A. Ensamble quemador en SolidWorks .....	106
Apéndice B. Dimensiones generales del quemador.....	107
Apéndice C. Vista explosionada del quemador .....	108
Apéndice D. Cabeza del quemador.....	109
Apéndice E. Puerto de aire secundario .....	110
Apéndice F. Venturi de la cámara de mezclado .....	111
Apéndice G. Puerto de aire primario .....	112
Apéndice H. Flujo de volumétrico de gas natural Vanti en la configuración del quemador comercial usando un inyector de 0,8 mm, en el laboratorio de sistemas térmicos .....	113
Apéndice I. Flujo de volumétrico de biogás en la configuración del quemador sistema.bio, usando un inyector de 4 mm, en la granja Villa Porkinos.....	113
Apéndice J. Flujo de volumétrico de gas natural Vanti en la configuración del quemador fabricado usando un inyector de 4 mm en el laboratorio de combustión .....	114
Apéndice K. Flujo de volumétrico de gas natural Vanti en la configuración del quemador fabricado usando un inyector de 0,8 mm en el laboratorio de combustión .....	114
Apéndice L. Flujo de volumétrico de biogas en la configuración del quemador fabricado usando un inyector de 4 mm en la granja villa Porkinos .....	115
Apéndice M. Eficiencia térmica del quemador comercial usando gas natural Vanti y un inyector de 0,8 mm en el laboratorio de sistemas térmicos .....	115
Apéndice N. Eficiencia térmica del quemador sistema.bio usando biogás y un inyector de 4 mm en la granja Villa Porkinos .....	116
Apéndice O. Eficiencia térmica del quemador fabricado usando gas natural y un inyector de 4mm en el laboratorio de combustión.....	116
Apéndice P. Eficiencia térmica del quemador fabricado usando gas natural y un inyector de 4mm en el laboratorio de combustión.....	117
Apéndice Q. Eficiencia térmica del quemador fabricado usando biogás y un inyector de 4mm en la granja villa Porkinos .....	117
Apéndice R. Eficiencia de la combustión del quemador comercial usando gas natural Vanti, un inyector de 0,8mm y una tasa de aireación primaria del 22,5% .....	118

Apéndice S. Eficiencia de la combustión del quemador sistema.bio usando biogás y un inyector de 4mm y una tasa de aireación primaria del 35% .....	118
Apéndice T. Eficiencia de la combustión del quemador fabricado usando gas natural Vanti y un inyector de 4mm y una tasa de aireación primaria del 20% .....	118
Apéndice U. Eficiencia de la combustión del quemador fabricado usando gas natural Vanti y un inyector de 0,8mm y una tasa de aireación primaria del 20% .....	119
Apéndice V. Eficiencia de la combustión del quemador fabricado usando biogás y un inyector de 4mm y una tasa de aireación primaria del 50% .....	119

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN QUEMADOR DE BIOGÁS PARA EL EVAPORADOR PIROTUBULAR DEL LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS DE LA UIS.

**AUTOR:** EDGAR SANTIAGO ACOSTA PINILLA

**PALABRAS CLAVE:** Quemador atmosférico de premezcla, evaporador piro tubular, biogás, correlaciones de eficiencia

### DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo aborda la fabricación de un quemador atmosférico de premezcla que utiliza biogás como combustible para la generación de vapor en evaporador pirotubular del Laboratorio de Sistemas Térmicos de la UIS. Para su diseño, se realizó una revisión bibliográfica con el fin de determinar las propiedades y la concentración de los constituyentes del biogás. Además, de manera experimental, se determinaron los parámetros de operación y el calor requerido para generar vapor en el evaporador del laboratorio.

El biogás empleado en el proyecto proviene de la granja porcina Villa Porquinos, y su cromatografía fue suministrada por el Laboratorio de digestión Anaeróbica de la escuela de ingeniería química, lo que permitió realizar un análisis de combustión y determinar sus propiedades. El dimensionamiento del quemador se basó en el diseño de un quemador atmosférico de premezcla para gas natural.

Una vez fabricado, se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento y se determinó que su operación adecuada requiere un inyector de 4 mm y un ajuste preciso en la tasa de aire primario. se emplearon correlaciones de eficiencia para comparar su desempeño con un quemador comercial de gas natural y un quemador *Sistema.bio* de biogás debido a que no fue posible probar el evaporador con biogás. Los resultados indicaron que el quemador fabricado es viable para la generación de vapor, aunque demanda más biogás que gas natural. No obstante, puede lograr una combustión con bajas emisiones contaminantes, siempre que se regule adecuadamente la tasa de aire primario.

Este estudio contribuye al desarrollo de tecnologías de combustión más sostenibles y al aprovechamiento del biogás como fuente de energía en granjas porcinas.

**ABSTRACT**

**TITLE:** DESIGN AND MANUFACTURE OF A BIOGAS BURNER FOR THE FIRE-TUBE BOILER OF THE UIS THERMAL SYSTEMS LABORATORY.

**AUTHOR:** EDGAR SANTIAGO ACOSTA PINILLA

**KEY WORDS:** Premix atmospheric burner, fire-tube evaporator boiler, biogas, efficiency correlations

**DESCRIPTION:** This paper addresses the manufacture of a premixed atmospheric burner that uses biogas as fuel to generate steam in a fire-tube evaporator at the UIS Thermal Systems Laboratory. For its design, a literature review was conducted to determine the properties and concentration of biogas constituents. In addition, the operating parameters and the heat required to generate steam in the laboratory evaporator were experimentally determined.

The biogas used in the project comes from the Villa Porkinos pig farm, and its chromatography was supplied by the Anaerobic Digestion Laboratory of the School of Chemical Engineering, allowing combustion analysis and determination of its properties. The burner was sized based on the design of a premixed atmospheric burner for natural gas.

Once manufactured, preliminary operational tests were conducted, and it was determined that its proper operation requires a 4 mm injector and precise adjustment of the primary air flow rate. Efficiency correlations were used to compare its performance with a commercial natural gas burner and a Sistema.bio biogas burner because it was not possible to test the evaporator with biogas. The results indicated that the manufactured burner is viable for steam generation, although it requires more biogas than natural gas. However, it can achieve combustion with low pollutant emissions, provided the primary air rate is properly regulated.

This study contributes to the development of more sustainable combustion technologies and the use of biogas as an energy source in pig farms.

## Introducción

En la industria porcina, el manejo inadecuado de los residuos orgánicos representa un problema ambiental significativo. Los desechos generados en las granjas, principalmente excretas, liberan gases contaminantes como el metano y el amoníaco, que contribuyen al efecto invernadero y afectan la calidad del aire. Aunque el biogás, producto de la digestión anaeróbica de estos residuos, representa una alternativa energética viable, su aprovechamiento en procesos térmicos aún enfrenta desafíos técnicos y operativos.

Según lo mencionado, el presente trabajo plantea el desarrollo de un quemador atmosférico de premezcla diseñado para operar con biogás y generar vapor en el evaporador pirotubular del laboratorio de sistemas térmicos de la UIS como modelo de aplicación del biogás. La implementación de este quemador busca ofrecer una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, promoviendo el uso eficiente de los recursos disponibles en las granjas porcinas.

Para su diseño, se analizaron los parámetros de operación del evaporador y se estudiaron las propiedades del biogás mediante una revisión bibliográfica, cromatografía de gases y un análisis de combustión. Con base en esta información, se determinan las condiciones óptimas de la mezcla aire-combustible y se diseñó un sistema capaz de garantizar una combustión eficiente y con bajas emisiones contaminantes.

La fabricación del quemador incluyó la selección de materiales adecuados, el desarrollo de planos de construcción y la implementación de un sistema modulante de aire primario para optimizar la combustión. Posteriormente, se realizaron pruebas experimentales para evaluar su desempeño y validar su viabilidad como fuente de calor en la generación de vapor.

Este estudio no solo busca demostrar que el biogás puede ser utilizado de manera eficiente en aplicaciones térmicas, sino que también pretende contribuir al desarrollo de tecnologías que fomenten la autosuficiencia energética en las granjas porcinas y la reducción del impacto ambiental de sus residuos.

## 1. Generalidades

### 1.1. Planteamiento del problema

Colombia es un país agrícola el cual una de sus actividades es la porcicultura donde se presentó una producido de más de 492.000 toneladas de carne en el año 2021 de manera industrial y tradicional, (Sidartha et al., 2020) sin embargo, esta actividad genera grandes cantidades de desechos que principalmente son las excretas siendo una mezcla de heces y orina, agua con excretas y desperdicios de alimentos los cuales son contaminantes que conllevan a problemas en el medio ambiente ya que se contamina el aire, suelo y agua sino no son tratado adecuadamente (Osejos et al., 2018), en la mayoría de granjas porcinas los desechos de las cerdos son compostados al aire libre para producir fertilizante, ignorando que en su descomposición se liberan cantidades de gas contaminante hacia la atmósfera que está conformado generalmente por metano y amoniaco.

Una de las maneras de tratar y aprovechar los contaminantes producidos durante la descomposición de los desechos orgánicos es la descomposición anaeróbica aplicada al uso de biodigestores para la producción de biogás y sus derivados, la cual en los últimos años ha tenido una acogida en las granjas porcinas con el fin de producir gas y usarlo como fuente de energía para motores de combustión, estufas y lámparas incandescentes. Por otro lado, el vapor que se produce industrialmente es utilizado en el sector energético para la producción de energía eléctrica por medio de turbinas de potencia y en distintos procesos industriales de transformación de materia prima, en la industria alimentaria es utilizado en procesos de cocción y mezclado (Concepto, 2022). Para producir este vapor se requiere de sistemas térmicos a presión como calderas y calderines, los cuales requieren generalmente de combustibles no renovables como el carbón mineral, gas natural, gasolina, madera, entre otros (Sanchis, 2020), durante la combustión de estos combustibles se producen gases y material particulado que se liberan a la atmósfera lo que contribuye a aumentar el efecto invernadero y la temperatura del planeta.

Además de este problema existen granjas dedicadas a la producción y aprovechamiento de cerdos, algunas con vías de difícil acceso y sin líneas de gas, por lo que se ven en la necesidad de comprar cilindros de gas poder realizar sus actividades. Para resolver estos problemas se plantea fabricar un quemador para un evaporador funcional como el del laboratorio de sistemas térmicos

de la UIS que use biogás obtenido del estiércol de cerdo como combustible para la producción de vapor. Por lo que se formula la siguiente pregunta ¿Es viable implementar un quemador de biogás para la producción de vapor?

### **1.2.Justificación**

Este proyecto se hace con el fin de diseñar y fabricar un quemador para el evaporador del laboratorio de sistemas térmicos que utilice como combustible biogás obtenido de biodigestores *sistema.bio* usados en granjas porcinas, también se quiere que con el uso de este quemador se ayude a los propietarios de granjas porcinas que tienen vías de difícil acceso y que no están interconectadas a líneas de gas natural (GLP) dándoles una forma de obtener energía térmica producida por ellos mismos para la calefacción y cocción de sus alimentos utilizando vapor, además se reducirán las emisiones de metano producidas durante la descomposición de los desechos de sus animales.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Fabricar un prototipo de un quemador de biogás para un evaporador piro-tubular del laboratorio de sistemas térmicos de la UIS.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Identificar propiedades del biogás y los requerimientos de funcionamiento del evaporador piro tubular del laboratorio de sistemas térmicos de la UIS.
- Diseñar el quemador en base a las propiedades del biogás obtenidas de un biodigestor y los requerimientos de operación del evaporador pirotubular.
- Fabricar un prototipo del quemador según los criterios de diseño obtenidos para evaluar su alcance en la producción de vapor.
- Evaluar el funcionamiento del quemador poniendo a prueba su desempeño cuando se conecta a una línea de biogás de un biodigestor para determinar su eficiencia.

### **3. Marco referencial**

#### **3.1. Antecedentes de investigación**

##### **3.1.1. Banco de quemadores atmosféricos de premezcla**

El trabajo de grado Banco de quemadores atmosféricos [referencia] se desarrolló con el fin de crear un banco experimental de quemadores para el uso y análisis del gas natural que produce la empresa Transoriente E.S.P la cual proporciona la composición y algunas características del gas natural que produce. Los autores presentan el diseño y la fabricación de quemadores atmosféricos de premezcla, los quemadores inductores y los quemadores de tiro forzado guiándose con la norma del tratamiento del gas natural ISO-6976-19. Además, utilizaron ecuaciones dimensionales basándose en teorías de termodinámica y de transferencia de calor.

Para la fabricación del quemador de biogás, se tomó como referencia la fabricación de un quemador atmosférico de premezcla de gas natural a modo de guía de diseño que parte de la composición del gas natural para poder calcular la potencia térmica requerida del quemador, la cual permite realizar el dimensionamiento y la selección de materiales de fabricación (Abril et al., 1999)

##### **3.1.2. Diseño y fabricación de una minicaldera pirotubular para el laboratorio de transferencia de calor**

Este trabajo de grado habla sobre el diseño y fabricación de una minicaldera que usa como combustible gas natural para la producción de vapor industrial partiendo de unos requisitos de operación: 5,4431 [kg vapor/s] a 2.2855 bar, para el proceso de diseño se basan en conceptos de transferencia de calor, termodinámica y combustión industrial para poder realizar la selección de los materiales de fabricación y el dimensionamiento de la caldera. este trabajo de grado sirve como guía para el cálculo del calor requerido para la producción de vapor, el cual tiene en cuenta el calor sensible y latente requerido para el cambio de fase del agua a vapor y poder alcanzar las características deseadas, al igual que las pérdidas de calor de la caldera hacia el ambiente y por gases de combustión (Iguarán et al., 2008)

### 3.1.3. Adaptación y evaluación de un motor usando biogás

En este trabajo de grado se recogen los resultados obtenidos al usar este combustible en un motor de combustión interna. Ello debido a que el proceso de diseño parte de la composición del biogás que se extrae de un biodigestor marca *Sistema.bio*; luego se realizan los cálculos para obtener una estimación del desempeño del combustible que sirven como base para fabricar el prototipo de un mezclador de aire y combustible; a partir del cual se fabricaron tres prototipos en impresión 3D para determinar cuál arrojó los mejores resultados; una vez seleccionado el prototipo más eficiente, se puso a prueba con respecto a diferentes combustibles, dicha prueba demostró que la eficiencia del biogás en un motor de combustión interna está por debajo del gas natural y de la gasolina. En la tabla 3 se puede ver la concentración del biogás utilizado y en la figura 1 se puede ver el prototipo del mezclador que se adaptó al motor (Patiño et al., 2021)

*Figura 1. Mezclador de aire-combustible para un motor de combustión interna*



*Nota.* Tomado de: (Patiño et al., 2021)

### 3.1.4. Clasificación de tecnologías de micro generación de energía eléctrica a partir de biogás

Este trabajo de investigación documenta las tecnologías de micro generación existentes y adaptables para generar energía eléctrica a partir del uso de biogás proveniente de las excretas de ganado bovino, porcino y avícola producto de actividades agropecuarias. El biogás se obtiene a través de un proceso de fermentación anaerobia en un biodigestor. En la tabla 1 se muestran las características generales del biogás las cuales le permiten ser usado en la generación en dichos equipos y en la tabla 3 se ve la concentración de biogás. (Ruiz et al., 2019)

Tabla 1. Características generales del biogás

Parámetro	Unidades	Valor
Contenido energético	kW*h/m <sup>3</sup>	6 – 6,5
Equivalencia combustible	L petróleo/m <sup>3</sup> biogás	0,6 – 0,65
Límite de explosión	-	6 – 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	°C	650 – 750 (con cantidad de CH <sub>4</sub> mencionado)
Presión crítica	Atm	74 – 88
Temperatura crítica	°C	-82,5
Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,2
Masa molar		16,043 [kg/mol]

*Nota.* Acá se encuentran las principales características energéticas del biogás que le permiten ser usado como combustible en equipos de micro generación de energía eléctrica. Adaptado de:(Ruiz Hernández et al., 2019, p19)

### 3.1.5. Memorias del 2<sup>do</sup> congreso iberoamericano en ciencias veterinarias y bienestar animal

El estudio de este congreso se realizó en una granja de Santa Rosa, Tecamachalco, Puebla, ubicada a 8.2 km de la cabecera municipal, con coordenadas geográficas de longitud -97.781 y latitud 18.880, a una altitud de 2055 msnm. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano y una temperatura media anual de 18 °C.

Se recolectaron excretas de cerdos por etapa productiva y se procesaron en siete reactores de 10 litros, con una carga de 2 kg de excretas por reactor y un tiempo de retención hidráulica de 20 días. Se usó un reactor tipo Batch, y las mezclas contenían 80% de excretas y 20% de agua, asegurando condiciones anaeróbicas.

El análisis cromatográfico, realizado en la BUAP, permitió monitorear la producción de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O a lo largo del tiempo. Se utilizó cromatografía de gases con columna Porapak 500 y nitrógeno como gas acarreador. Además, se midió el pH con un potenciómetro Sartorius.

Los resultados muestran que la producción de biogás está influenciada por la composición de las excretas, la dieta de los cerdos y su etapa fisiológica, en concordancia con estudios previos sobre la relación entre nutrientes y digestión en la generación de biogás. En la tabla 2 se pueden

observar la concentración de los constituyentes del biogás producido en cada etapa de producción.(Sierra et al., 2023)

*Tabla 2. Concentración de los constituyentes de biogás de las etapas de producción porcina.*

Etapa de producción	Constituyente y concentración			TRH (días)
	CH <sub>4</sub> %	CO <sub>2</sub> %	H <sub>2</sub> O%	
Gestación	48	35	35	20
Lactancia	70	15	25	20
Pre-ceba	28	50	25	20
Levante y ceba	27,6	50	25	20

*Nota.* En esta tabla se encuentran el porcentaje de los constituyentes del biogás obtenidos de cada una de las etapas de desarrollo de los cerdos de una granja porcina y también está el tiempo de retención hidráulica del biogás en los biodigestores. Tomado de: (Sierra et al., 2023)

En los resultados de la etapa de gestación las heces presentan una producción menor de biogás, debido a que fisiológicamente la mayoría de las proteínas, carbohidratos y grasas son absorbidos por los fetos, mientras que en las mediciones hechas con las heces de la etapa de lactancia se observó un aumento en la producción de biogás debido a que la dieta de la cerda lactante es rica en carbohidratos y lípidos porque tiene que cubrir altos requerimientos diarios de energía que incluyen la producción de leche, lo que explica que, en esta etapa productiva, la pérdida de energía en orina y heces por parte del animal es mayor, además se tiene influencia de la presencia de heces de lechones en cuya dieta la concentración de proteínas es mayor.

### 3.2.Referencias teóricas

#### 3.2.1 Generalidades del biogás

**3.2.1.1. Constituyentes del biogás.** El biogás es un tipo de gas que se produce gracias a la digestión anaeróbica de materias primas orgánicas como estiércol de animales y residuos agrícolas a través de un proceso mediado por microbios que hacen hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Kapoor et al., 2020, p). Sus componentes varían según la tecnología usada para obtenerlo y la materia orgánica empleada, comúnmente cuenta con una concentración entre (55-70%) metano, (30-45%) CO<sub>2</sub>, (0,1-3%) H<sub>2</sub>S y menos del 5% de trazas de otros gases. Tiene una densidad de 1,2kg/m<sup>3</sup>, un poder calorífico entre 6-6,5 kWh/Nm<sup>3</sup> y una temperatura de ignición de 650 a 750°C (Morillo, 2021), en la tabla 3 se encuentra los constituyentes del biogás obtenido del estiércol de cerdo usados en los diferentes trabajos de grado.

*Tabla 3. Concentraciones de biogás*

Autor	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub> O	%H <sub>2</sub> S	%N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>
María & Cristancho (2021, p.52)	60-65	30-35	1-5	1-2	0-5	0-2	0-2
Kapoor et al. (2020, p.2)	40-65	35-65	1-5	0,1-3	0-5	<2	1
Ruiz Hernández et al. (2019, p.)	50-80	30-50	0-1	0-1	0-1	0-1%	0-2
Fajardo López et al. (2020, p.23)	50-75	25-45	2-7	20.000 ppm	<2	<2	1

*Nota.* la concentración de biogás no está estandarizada debido a las condiciones y métodos de obtención, por lo que en esta tabla se recolectaron algunas concentraciones de investigaciones en la utilización del biogás. Tomado de: elaboración propia

#### 3.2.2. Aprovechamiento, tratamientos y uso del biogás

**3.2.2.1. Valorización del biogás.** El biogás es un combustible versátil que puede usarse en su forma cruda o procesada. Generalmente, se emplea directamente desde el digester para cocinar o iluminación en el sitio de producción. Sin embargo, su composición limita su uso, ya que el CH<sub>4</sub> facilita la combustión, mientras que el CO<sub>2</sub> reduce su valor calorífico y dificulta su transporte.

Otros componentes como el H<sub>2</sub>S, el vapor de agua y los siloxanos pueden causar corrosión y disminuir la eficiencia energética. Por ello, debe eliminarse el CO<sub>2</sub> y otros compuestos mejorando su calidad, elevando su poder calorífico hasta 35,8 MJ/m<sup>3</sup>. Con métodos innovadores,

el biogás puede aprovecharse en generación de energía, como sustituto del gas natural o en la producción de computación.

**3.2.2.2. Aprovechamiento directo del biogás.** La forma más común y económica de utilizar el biogás es en combustión directa para cocinar e iluminación. Es una tecnología establecida, de bajo costo y mantenimiento, que no requiere la eliminación de  $H_2S$  ni humedad. Esta forma de usar el biogas se ha utilizado durante décadas principalmente en hogares rurales, proporcionando una combustión limpia y eficiente, con menor tiempo de cocción en comparación con combustibles tradicionales.

Las cocinas de biogás están comercialmente disponibles y pueden fabricarse localmente. Además, los aparatos de gas convencionales pueden adaptarse al biogás con ajustes en la relación aire-combustible y la boquilla del quemador. La conexión del digestor a la cocina requiere solo tuberías y válvulas. La eficiencia de conversión del biogás en calor en quemadores de combustible dual alcanza entre el 80 y 90 %. (Kapoor et al., 2020, p.2)

**3.2.2.3. Aprovechamiento indirecto del biogás.** Para aumentar el alcance de las aplicaciones del biogás, es necesario procesarlo adecuadamente para que se adapte a diversas aplicaciones. Por lo general, se siguen diferentes vías físicas, químicas y biológicas para tratar o convertir el biogás en otras formas utilizables. Estos enfoques mejoran su calidad o cambian su forma. El método físico generalmente incluye fenómenos como la limpieza y el enriquecimiento del biogás para mejorar básicamente su calidad. Los enfoques químicos y biológicos incluyen métodos en los que los componentes gaseosos del biogás se convierten en diversas formas químicamente (utilizando productos químicos) y biológicamente (con la ayuda de bacterias metanotróficas), respectivamente. (Kapoor et al., 2020, pp. 2-3)

### **3.2.3. Acondicionamiento del biogás**

Las impurezas del biogás como la humedad y el  $H_2S$  deben eliminarse ya que pueden provocar una disminución del poder calorífico, desgaste mecánico, corrosión y emisiones nocivas, El biogás limpio es la única energía renovable que puede usarse para aplicaciones energéticas eléctricas, térmicas y carburantes. (Kapoor et al., 2020, p.)

Para poder utilizar el biogás este debe acondicionarse, en la tabla 4 se muestran los tratamientos necesarios según el uso que se le quiera dar al biogás

Tabla 4. Tratamiento según el uso del biogás

Uso final	Eliminación de agua	Eliminación de CO <sub>2</sub>	Eliminación de H <sub>2</sub> S
Producción térmica en calderas	1	0	0 – 1 - 2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 - 2	0 – 1 - 2	1 o 2
Combustible para vehículos o turbinas	2	2	2
Sustitución del gas natural	2	2	2
Celdas de combustible	2	2	2

*Nota.* En esta tabla se muestran algunas aplicaciones del biogás y el requerimiento de eliminación de los constituyentes del biogás, siendo 0 un requerimiento no necesario y 2 un requerimiento muy necesario. Tomado de:(Fajardo López et al., 2020, p. 65)

el acondicionamiento consiste en secar el biogás es decir quitar la humedad que trae, limpiarlo (quitar el H<sub>2</sub>S) y purificarlo (quitarle el CO<sub>2</sub>) Estos procesos se mencionan a continuación y se escogen los métodos adecuados para realizarlos:

### 3.2.4. Uso del biogás limpio

El biogás limpio es totalmente aplicable a aplicaciones simples como la producción de electricidad y calor. El calor se puede producir mediante el uso de calderas y plantas de cogeneración, mientras que la electricidad se puede generar mediante motores alternativos, celdas de combustible, motores Stirling, turbinas de gas, etc.

### 3.2.5. Quemadores y quema de biogás

**3.2.5.1. Quemador de caldera.** Uno de los elementos principales que componen una caldera, es el quemador, este se encuentra en el interior de la cámara de combustión. Es el encargado de mezclar el combustible (que puede ser líquido o gaseoso) con el comburente, para que se genere la llama que inicia la combustión. La cabeza del quemador consta de dos orificios a través de los que sale la mezcla gas-aire.

Según cómo se produce la llama, podemos dividir los quemadores en dos tipos, atmosféricos y mecánicos. Los primeros, producen la llama gracias a la presión atmosférica que sufre el aire que entra en ellos. Mientras que los otros, el aire para la combustión es introducido a la fuerza gracias a un ventilador. (Mantenimientos Rey, 2020)

**3.2.5.2. Quema de Biogás.** Este proceso se realiza en instalaciones donde el volumen de biogás obtenido y los precios de la energía no justifican el aprovechamiento energético del biogás. El uso final que se le dé al biogás dependerá de las necesidades del contexto; usualmente se conocen tres tipos de quemadores: cerrado, semicerrado o híbrido, y abierto, los cuales se describen a continuación.(Ministerio de vivienda, 2021)

**3.2.5.3. Quemador de biogás abierto.** La ventaja de los quemadores abiertos es que puede verificarse su desempeño a simple vista a través de la llama aparente. Adicionalmente, son de menor precio que los quemadores cerrados. Entre las desventajas están menor eficiencia de combustión y mayor área de seguridad requerida por la radiación de calor que ocasiona la llama (Ministerio de vivienda, 2021, p.14)

**3.2.5.4. Quemador de biogás cerrado.** En los quemadores cerrados la llama queda encerrada en una cámara de combustión, normalmente de acero al carbón, con aislamiento térmico de cerámica que admite temperaturas internas de aproximadamente 1.000 °C y externas a la pared de acero inferiores a 80 °C. (Ministerio de vivienda, 2021, p.14)

**3.2.5.5. Quemador de bigas semicerrado.** los quemadores semicerrados acoplan características de los dos quemadores anteriores, por una parte, no incluyen aislamiento, la cámara de combustión es más pequeña y en algunos modelos la llama es observable, por otra parte, no cuentan con control de la temperatura en la cámara de combustión, las emisiones no pueden ser medidas y el bajo tiempo de permanencia en la cámara, conlleva a una menor eficiencia de combustión de los gases (Ministerio de vivienda, 2021, p. 14)

### **3.2.6. Biodigestores**

Una de las formas de obtener biogás es por medio del uso de biodigestores los cuales vienen en distintos tipos, el más utilizado es el biodigestor de membrana ya que es el más sencillo, económico y fácil de implementar por los agricultores.

La empresa *Sistema.bio* se encarga del asesoramiento, fabricación e instalación de biodigestores de membrana en granjas para la producción de biogás a base de estiércol de cerdo y ganado bovino, en la tabla 5 se muestra la cantidad de biogás y digerido producidas por cada modelo de biodigestor. (Pineda Alejandra, 2021)

**3.2.6.1. Sistema.bio.** Es una empresa mexicana con sedes en varias partes de Latino América que tiene como objetivo apoyar a los pequeños productores para que puedan transformar los desechos naturales de los animales en energía renovable, misma que genera electricidad para no tener que comprar gas LP y así no dañar al medio ambiente.

*Tabla 5. Capacidad productiva de los biodigestores sistema.bio para estiércol de cerdo*

Modelo	Estiércol L/día	Cabezas	Biogás producido		Digerido producido		
			Producción diaria de biogás (m <sup>3</sup> /d) *	Tiempo de cocción promedio diario en un quemador (h/día) **	Equiv. en Gas LP (Lb/mes)	(L/día)	(ha/año)
Sistema 20	120	74	7.4	14.8	212	540	19.7
Sistema 30	180	111	11.1	22.3	319	810	29.6
Sistema 40	235	148	14.8	29.7	416	1058	38.6
Sistema 80	470	296	29.7	59.3	832	2115	77.2
Sistema 120	705	444	59,3	118,7	1663	4230	154.4
Sistema 160	940	592	74,2	148,3	2079	5288	193.0

*Nota:* Se considera una relación desecho-agua de 1:3.5. \* La producción de biogás es un estimado promedio basado en un uso de biodigestor estándar. \*\* La producción de biogás es variable dependiendo de condiciones en las que el sistema opere. Tomado de: (Sistema.bio, 2020)

#### 4. Diseño conceptual

Para el diseño conceptual del quemador, se consideraron varios factores clave, como la fuente de obtención del biogás, la concentración de sus constituyentes que y los parámetros de operación del evaporador. A partir de esta información, se establecen los requerimientos de diseño que debe cumplir el quemador. Luego, se proponen diversas soluciones, las cuales se analizan mediante una matriz QFD para identificar los criterios más influyentes en el diseño. Posteriormente, se plantean tres alternativas de diseño, y mediante una matriz Pugh se selecciona la opción más adecuada, por último, se realiza un boceto del quemador y del ensamble en el evaporador.

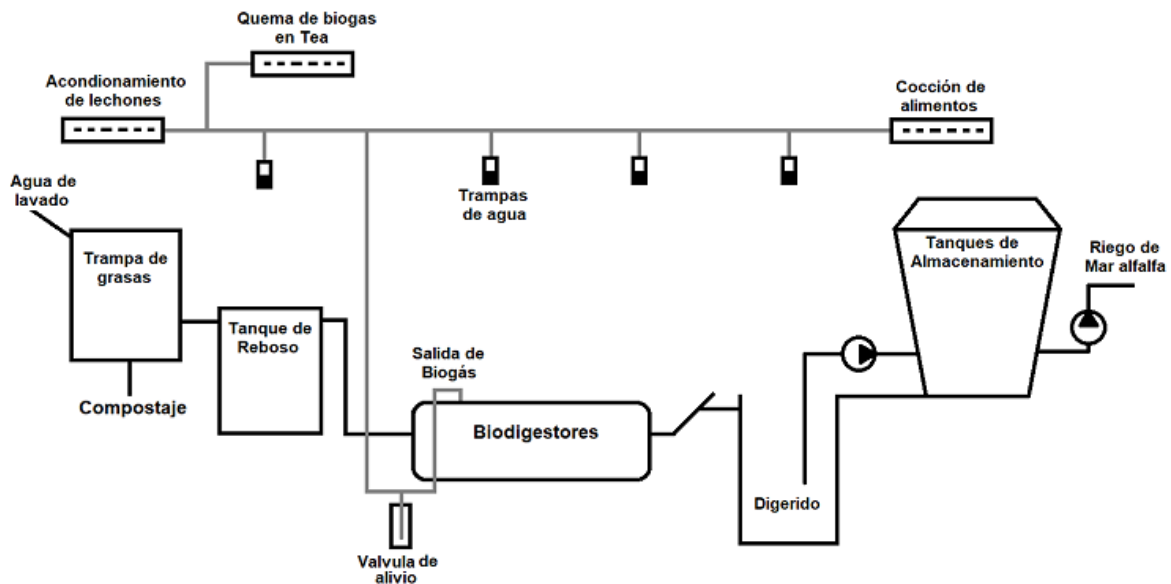
##### 4.2. Proceso de obtención del biogás en la granja Villa Porkinos

La fuente biogás proviene de la granja villa Porkinos de la empresa agro inversiones S.A ubicada en la vereda la Puente en el municipio de Lebrija-Santander ( $7^{\circ}03'33.2''$  N;  $73^{\circ}12'54.9''$  W; 1055m S.N.M) que por medio del profesor Humberto Escalante Hernández jefe del laboratorio de digestión anaeróbica de la escuela de ingeniería química de la UIS y el veterinario en jefe de la granja Harvey [apellido] se permitió hacer uso del biogas sin tener un convenio de por medio.

El biogás se genera en 4 biodigestores de  $40\text{ m}^3$ , que procesan el agua de lavado de los corrales de las etapas de gestación, lactancia y pre-ceba de los cerdos. Cada biodigestor mantiene un 70-75% de digerido y un 25-30% de biogás, regulando la presión mediante válvulas de alivio.

El biogás producido se utiliza en la cocción de alimentos y en el acondicionamiento de lechones. Antes de su uso, se filtra el  $\text{H}_2\text{S}$  y se controla la humedad mediante filtros de esponjillas metálicas y trampas de agua. En la figura 3 se muestra un esquema de las instalaciones de la granja para la producción de biogas y el destino de sus subproductos.

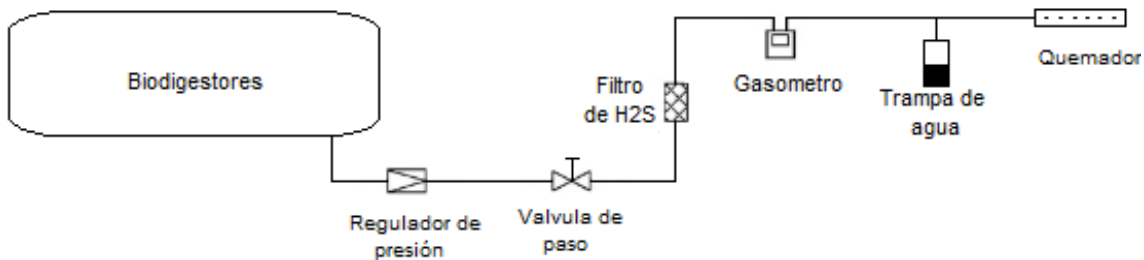
Figura 2. Esquema de producción de biogás y digerido



Nota. Tomado de: elaboración propia

En la figura 4 se muestra de manera más detallada el sistema de producción de biogás y los elementos que hacen parte de su acondicionamiento para poder ser utilizado.

Figura 3. Esquema de producción y aprovechamiento de biogás



Nota. Son los elementos requeridos para controlar la presión del biodigestor, distribuir, limpiar y medir el caudal el biogás antes de ser quemado. Tomado de: elaboración propia

En las figuras 5 y 6 se pueden la instalación de los biodigestores, el filtro de H<sub>2</sub>S y la Tea que quema el biogás excedente.

*Figura 4. Instalación de biodigestores*

*Nota.* Los biodigestores están interconectados a una sola línea que transporta el biogás. Tomado de: Fotografía, granja villa Porkinos

*Figura 5. Filtros de H<sub>2</sub>S a la salida de biogás de los biodigestores*

*Nota.* Retiene parte del H<sub>2</sub>S y está hecho principalmente de esponjillas metálicas, en la salida de biogás de cada biodigestor hay uno instalado. Tomado de: fotografía, granja villa Porkinos.

En la tabla 7 se encuentra las características y los parámetros de operación de los biodigestores que se utilizan en la granja.

*Tabla 6. Descripción de la batería de biodigestores*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Tipo	Membrana tubular	-
Longitud biodigestor	m	16
Diámetro biodigestor	m	2.2
Volumen biodigestor	m <sup>3</sup>	40
Volumen de operación	m <sup>3</sup>	30
Número de biodigestores	Unidad	4

Caudal Sustrato	m <sup>3</sup> /d	0,94
Caudal Digerido	m <sup>3</sup> /d	4,23
Caudal Biogás	m <sup>3</sup> /d	59,3
TRH	Días	25
Presión interna	kPa	99,776

*Nota.* Tomado de: (Ariza & Medina, 2025)

## 4.2. Despliegue de la función de calidad (QFD)

### 4.2.1. Requerimientos del Biogás

Los estudiantes encargados de estabilizar la dieta de los biodigestores de la granja villa Porkinos para la valorización del digerido Henry Ariza y Dayana Medina junto con el laboratorio de digestión anaeróbica de la escuela de ingeniería química obtuvieron la concentración de los constituyentes de biogas por medio de un análisis de cromatografía de gases, a continuación, se en la tabla 8 se presentan los resultados de los constituyentes del biogas

*Tabla 7. Constituyentes del biogas de la granja villa Porkinos*

Componente	Porcentaje
CH <sub>4</sub>	71%
CO <sub>2</sub>	28%
H <sub>2</sub> O(g)	0,7%
H <sub>2</sub> S	0,3%

*Nota.* Este biogas es de buena calidad porque su contracción de metano es muy alta debido a que se filtra gran parte del H<sub>2</sub>S y la humedad se recolecta en trampas de agua a lo largo de la línea de transporte de biogas, Tomado de: Laboratorio cormas UIS (Ariza & Medina, 2025)

### 4.2.2. Parámetros de operación del evaporador

Los parámetros de operación del evaporador corresponden a los datos obtenidos experimentalmente al evaporar un litro de agua en el evaporador del laboratorio de sistemas térmicos de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS, a continuación, en la tabla 9 se presentan los datos recolectados.

Tabla 8. Parametros de operación del evaporador

Datos de entrada	
$P_o$ : Presión manométrica	25 psi (172,369kPa)
$P_{atm}$ : presión atmosférica de Bucaramanga	13,147 psi (90,65 kPa)
$P_{abs}$ : presión absoluta	33,147 psi (228,5 kPa)
$T_o$ : Temperatura ambiental de Bucaramanga	25 C°(298k)
t: tiempo de evaporación	25min
$V_o$ : volumen de agua inicial	1 lt
Datos de salida	
Presión de vapor	228,5 kPa
Flujo de vapor a 20 Psi	2,4 lt/h

Nota. Tomado de: elaboración propia

Figura 6. Evaporador del laboratorio de sistemas térmicos



Nota. Este evaporador es una minicaldera que está constituida por las líneas de suministro de gas y agua y cuenta con elementos de inspección y seguridad, un nivel de agua, un manómetro de caratúlatela y una válvula de seguridad. Tomado de: fotografía, laboratorio de sis. térmicos UIS

### 4.2.3. Requerimientos de diseño del quemador

Teniendo en cuenta las condiciones de la granja y los parámetros de operación del evaporador se plantean los siguientes requerimientos de diseño del quemador.

Tabla 9. Organización de los requerimientos del consumidor

Concepto	Características
Aspecto	Económico
	Sencillo
	Fácil de fabricar
Operación y uso	Combustible renovable
	Fácil de usar
	Seguro
	Uso continuo
Vida útil	Fácil mantenimiento: desarmable, limpieza sencilla, repuestos asequibles.
	Resistente a la corrosión y el desgaste: capaz de soportar altas temperaturas y que no se oxide fácilmente
	Versátil: Permita el uso de elementos para tratar el biogás.

*Nota.* Tomado de: elaboración propia

### 4.2.4. Matriz de calidad (QFD)

Una vez conocidos los requerimientos del quemador se organizan de mayor a menor prioridad y se les asigna un número, luego se plantean criterios de diseño que satisfacen estos requerimientos, tanto requerimientos y criterios se tabulan en un matriz de calidad como se muestra en la tabla 11 para determinar cuáles son los criterios más influyentes en el diseño del quemador.

Tabla 10. Matriz de calidad para selección de requerimientos de diseño

Solución ingenieril		Funcionamiento a condiciones ambientales			Régimen de operación estacionario		Llama de combustión estable		Combustión baja en emisiones de contaminantes		Adecuación para control de presión flujo y temperatura		Materiales resistentes y conductores de calor		Acondicionamiento de biogás (H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> )	
Requerimientos del cliente		Prioridad	1		2		3		4		5		6		7	
Combustible renovable		10	9	90	9	90	9	90	9	90	9	90	9	90	9	90
Económico		9	9	81	3	27	3	27	9	81	9	81	9	81	3	27
Seguro		8	9	72	9	72	9	72	9	72	9	72	9	72	9	72
Eficiente		7	9	63	3	21	9	63	9	63	9	63	9	63	9	63
Resistente a la corrosión y al desgaste		6	3	18	3	18	9	54	9	54	9	54	9	54	9	54
Uso continuo		5	9	45	9	45	9	45	9	45	3	15	9	45	3	15
Fácil mantenimiento		4	3	12	3	12	3	12	9	36	3	12	9	36	9	36
Sencillo		3	9	27	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9	3	9
Fácil de usar		2	9	18	9	18	9	18	3	6	3	6	3	6	9	18
Versátil		1	9	9	3	3	9	9	9	9	3	3	3	3	3	3
Total		-	435		315		399		465		405		459		387	

*Nota.* Los criterios de diseño ganadores fueron aquellos que obtuvieron la mayor puntuación de la sumatoria de los productos entre la prioridad del requerimiento del cliente por una calificación que se le asignaba a cada criterio siendo 9 alto, 3 medio, 1 bajo y cero nulo. Tomado de: elaboración propia

#### 4.2.5. Selección de alternativas

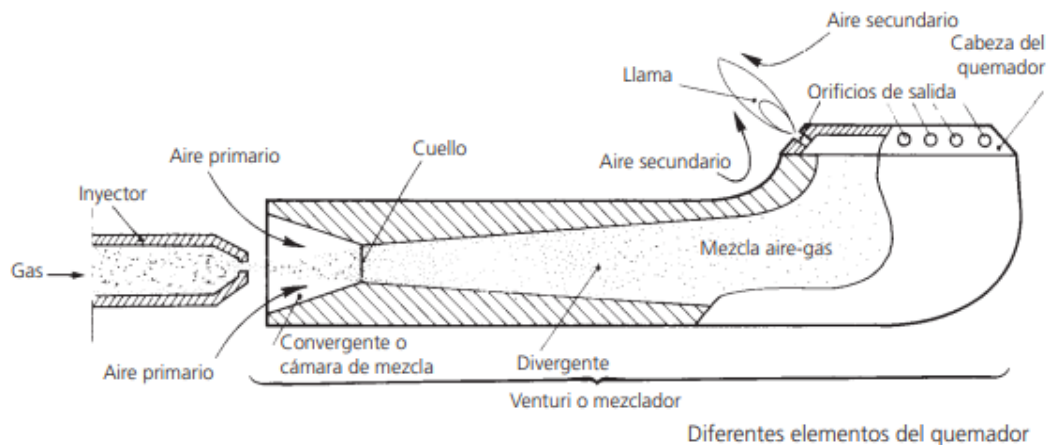
Los requerimientos de diseño más críticos y considerados a implementar fueron el funcionamiento a condiciones ambientales para trabajar con aire atmosférico y evitar el uso de ventiladores; la combustión con baja emisiones de contaminantes para garantizar un proceso limpio y amigable con el ambiente; y el uso de materiales resistentes y conductores de calor para asegurar

un desempeño adecuado del quemador y su vida útil. A continuación, se presentan las alternativas para el diseño del quemador, teniendo en cuenta los requerimientos de las cuales se escogerá la más adecuada por medio de una matriz pugh

#### 4.2.5.1. Alternativas de diseño

##### Alternativa numero 1

Figura 7. Quemador atmosférico de premezcla para gas natural



Nota. Tomado de: (Hernández & García, 2008, p.4)

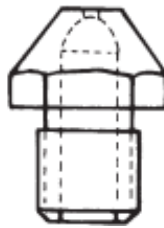
Funciona con aire del ambiente sin la necesidad de utilizar ventiladores, el aire que se precisa para realizar una combustión completa se aporta en dos etapas: en la primera una parte del aire se mezcla con el gas antes de la combustión (aire primario) y en la segunda, el resto del aire se aporta a la altura de la llama (aire secundario). Las llamas de estos quemadores cuando están bien reguladas son estables y de color azul y la combustión es completa. Al existir una mezcla previa entre el combustible y comburente, se obtienen llamas cortas de color azulado y de alta temperatura. En caso de que el comburente incorporado no sea suficiente para garantizar la combustión completa, se produce una segunda zona de llama incolora, dando lugar a un penacho que recubre la anterior. (Hernández & García, 2008, pp.3-4).

## Principales partes de un quemador atmosférico de premezcla:

### Inyector:

El inyector es la pieza mediante la cual se fija la potencia del quemador. Tiene un orificio que determina el caudal de gas según la presión de alimentación. Cualquier modificación del diámetro del orificio provoca la variación de la potencia del quemador. Si un inyector funciona correctamente, no debe modificarse su calibre ya que podría dar origen a una combustión defectuosa. (Hernández & García, 2008, p.4)

Figura 8. Inyector de gas calibrado

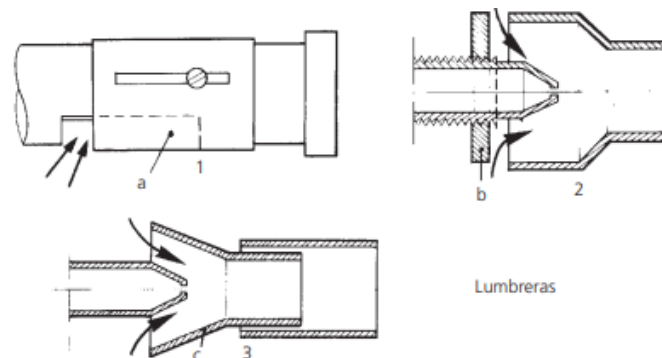


Nota. Tomado de: (Hernández & García, 2008, p.4)

### Cámara de mezcla

La cámara de mezcla es el espacio donde se realiza la mezcla del aire primario y el gas. El aire primario entra en la cámara por la misma tobera que el gas o a través de unos agujeros practicados en las paredes del tubo, los cuales se llaman lumbreras. Las lumbreras pueden tener unos mecanismos que permiten regular la entrada de aire primario. El aire primario entra en la cámara de mezcla gracias al efecto Venturi. (Hernández & García, 2008, p.5)

Figura 9. Cámara de mezcla de aire y gas



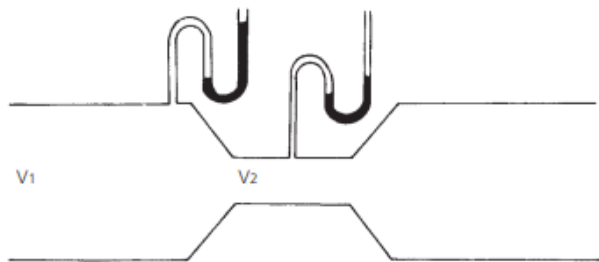
Diferentes dispositivos de reglaje del aire primario  
1. Por brida (a); 2. Por disco roscado (b); 3. Por venturi regulable (c)

Nota. Tomado de: (Hernández & García, 2008, p.5)

### Efecto Venturi

Un fluido que circule por un conducto horizontal de sección constante tiene la misma presión en todos sus puntos, ya que al ser horizontal la conducción, no hay diferencias de presión debidas a la altura. Cuando en una conducción horizontal hay una variación de sección, como el caudal es el mismo en toda su longitud debe cumplir que:  $Caudal = S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2$  Si la sección  $S$  es menor en un punto determinado de la conducción, la velocidad  $V$  aumenta en este punto en la misma proporción, porque el caudal debe mantenerse constante. En este caso se produce un efecto muy curioso, contrario a lo que pudiera esperarse por intuición. La presión que el fluido ejerce sobre el tubo en su parte angosta es inferior a la presión que ejerce el mismo fluido en la parte ancha del tubo. Es decir, la presión disminuye allí donde la velocidad aumenta en una conducción en la que no varíe su nivel. Este efecto puede comprobarse mediante la construcción que se representa en la figura 20, en la que se observa que el manómetro que mide la presión en la parte estrecha indica menor presión que la que mide el manómetro instalado en la parte ancha. (Hernández & García, 2008, p.5)

Figura 10. Flujos y presiones en un tubo Venturi



*Nota.* Tomado de: (Hernández & García, 2008, p.5)

Veamos cual es la aplicación que tiene el efecto Venturi en los quemadores. El agujero del inyector es muy pequeño, y el gas cuando sale por éste lo hace a una velocidad muy elevada, lo que produce una depresión que absorbe aire que entra por las lumbreras mezclándose con el gas dentro del tubo. (Hernández & García, 2008)



Este quemador funciona por premezcla es decir mezcla el aire y el gas antes de su combustión, su diseño permite ser instalado en aquellos lugares donde se requiera una llama clara, dura, relativamente corta y de alto poder calorífico. Como en Hornos de temple, forjado o cementación; crisoles; etc. Trabaja con gas natural de baja presión (100 a 500 mm.CA.) y aire forzado (120 a 700 mm.CA.), y su funcionamiento es altamente eficiente en un amplio rango de potencia, permite obtener capacidades mínimas de hasta un 10 % con la misma efectividad; para ello viene provisto de un tornillo regulador-limitador de caudal ubicado en el mismo cuerpo del quemador (excepto el mod.76-1”).(EQA Saic, 2013)

### **Automáticos**

Viene en el modelo EQA 76 el cual se fabrica: recto, acodado, fijo o giratorio, en 7 distintos tamaños, que satisfacen prácticamente todas las necesidades de calor, pudiendo obtenerse capacidades de hasta 2.000.000 Kcal/hora. Se provee con boquilla lanzallamas de alta retención, para baja temperatura (700°C) y para alta temperatura de acero inoxidable calidad 304 o 310. Como mezclador aire-gas para alimentar varias boquillas lanzallamas, quemadores de llama vertical, continua o infrarrojos, su uso es muy generalizado, ya que permite efectuar una única regulación para todo el horno o para grandes sectores del mismo.(EQA Saic, 2013)

### **Instalación**

Se proveen opcionalmente con placa frontal sellada o de registro de aire secundario, a la cual queda firmemente sujeto el quemador, sirviendo además ésta para el montaje de pilotos y detectores de llama que fueron proyectados para su automatización. (EQA Saic, 2013)

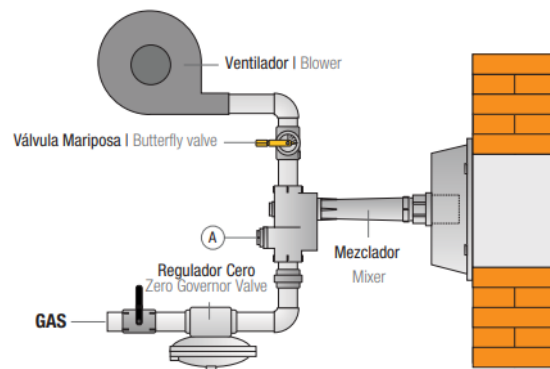
### **Automatización**

Los quemadores EQA 76 pueden trabajar en forma proporcionante, es decir, mantener la proporción aire-gas en todo su rango de capacidades. Para ello es necesario colocar un Regulador Proporcionante CERO en la línea de gas antes del mezclador, y bastará regular la válvula mariposa de aire, que está provista de una escala graduada que facilita la repetición de operaciones, para variar la capacidad del quemador, sin modificar la posición de la válvula de gas y lograr mantener la misma relación de aire y gas. (EQA Saic, 2013)

## Modulante

También es posible hacer trabajar los quemadores de premezcla EQA 76 en forma modulante; para ello es necesario colocar una motorización a la válvula mariposa, que será comandada por los controles modulantes de temperatura o presión, cuyas señales harán aumentar o disminuir el pasaje de aire (y con ello la potencia del quemador) de acuerdo a la demanda de calor; de esta forma la curva de variación de temperatura (o presión) es suave y se mantiene dentro de valores diferenciales mínimos.(EQA Saic, 2013)

Figura 14. Quemador de premezcla con ventilador de tiro forzado



Nota. Tomado de: (EQA Saic, 2013)

## Materiales de fabricación

Se recomienda usar los siguientes materiales para la cabeza por donde sale la llama según la temperatura y para evitar el retroceso de la llama.

Fundición de Hierro - Hasta 900°C

Fundición de Acero inoxidable 304 - Hasta 1200°C

Fundición de Acero inoxidable 310 - Hasta 1600°C

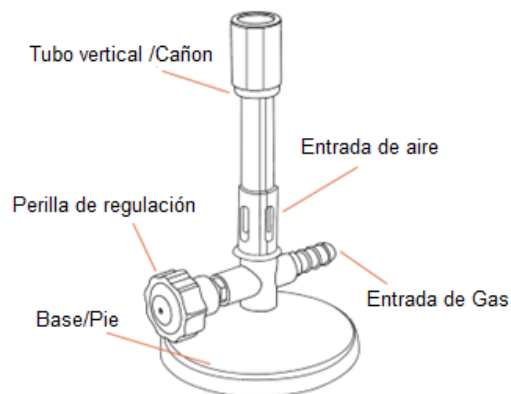
(EQA Saic, 2013)

**Alternativa 3:***Figura 15. Quemador Bunsen*

*Nota.* Tomado de: (Labbox, 2024)

Un quemador Bunsen es un dispositivo ampliamente empleado en laboratorios científicos para realizar tareas como calentamiento, esterilización y combustión de muestras o reactivos químicos. Este tipo de quemador utiliza gas natural o gases licuados derivados del petróleo, como propano, butano o sus mezclas. Su principio de funcionamiento se basa en la combustión de una mezcla regulable de gas y aire, lo que permite un control eficiente de la llama.

El diseño del quemador consta de una base sólida donde se conecta el suministro de gas, el cual fluye a través de un pequeño orificio en el fondo de un tubo vertical. En los laterales de este tubo se encuentran perforaciones que, mediante el efecto Venturi, permiten la entrada de aire al flujo de gas, generando una mezcla inflamable que se quema en la parte superior del tubo. Esta combustión regulada resulta especialmente útil para aplicaciones avanzadas en química. (Labbox, 2024).

*Figura 16. Partes principales*

*Nota.* Tomado de: (Labbox, 2024)

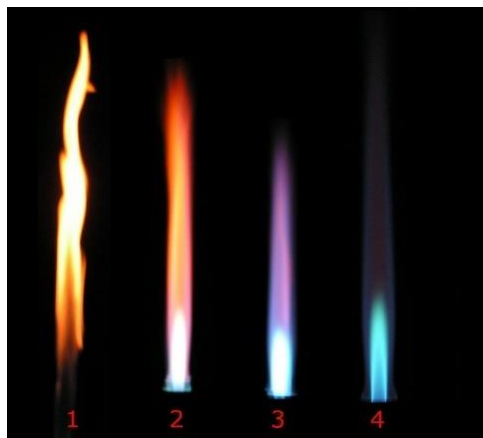
El quemador puede alcanzar temperaturas de hasta 1500 °C, dependiendo de la mezcla de gas y aire. Su estructura incluye una válvula de aguja para controlar el flujo de gas (en los modelos más sofisticados), una entrada de aire ajustable y un tubo de combustión conectado a la base mediante una rosca. El suministro de gas se realiza a través de un tubo de goma con una llave que permite abrir o cerrar el flujo. Los orificios laterales son ajustables y controlan la cantidad de aire que se mezcla con el gas, lo que influye directamente en la temperatura y el tipo de llama.

Cuando la mezcla contiene una mayor proporción de aire, la combustión genera una llama de color azul, que es más caliente y eficiente. Por otro lado, al reducir la entrada de aire, el gas se mezcla únicamente con el oxígeno atmosférico en el punto de combustión, produciendo una llama de menor temperatura y color amarillento o rojizo, conocida como "llama segura" o "llama luminosa". Esta última es menos eficiente, ya que genera partículas de hollín incandescentes que pueden depositarse en las superficies calentadas, dejándolas con residuos de carbono.

El tamaño y la intensidad de la llama pueden ajustarse aumentando el flujo de gas mediante la válvula de aguja. Sin embargo, si no se regula simultáneamente la entrada de aire, la llama pierde temperatura debido a una mezcla insuficiente de oxígeno. Por esta razón, la llama azul, rica en oxígeno, es preferida para procesos que requieren altas temperaturas. Finalmente, el encendido del mechero se realiza comúnmente con un fósforo o un encendedor de chispa.

Dependiendo del flujo de aire ambiental entrante en la válvula de admisión se pueden obtener distintos tipos de llama en un quemador Bunsen en la figura 19 se pueden observar(Ciencia y datos.org, 2024)

*Figura 17. Tipos de llama en un quemador bunsen*



*Nota.* Estas son las llamas que se producen en el quemador según el flujo de aire que entra al quemador 1. Válvula del aire cerrada (llama segura), 2. Válvula medio abierta, 3. Válvula abierta al 90 %, 4. Válvula abierta por completo (llama azul crepitante; se recomienda su uso ya que no deja residuos de carbón sobre el material calentado). Tomado de:(Ciencia y datos.org, 2024)

#### 4.2.6. Matriz pugh

Con esta matriz se seleccionará la alternativa de diseño más adecuada que cumpla con los criterios de diseño seleccionados anteriormente en la matriz QFD de la tabla 11, a continuación, se presenta la matriz pugh en la 12.

*Tabla 11. Matriz pugh*

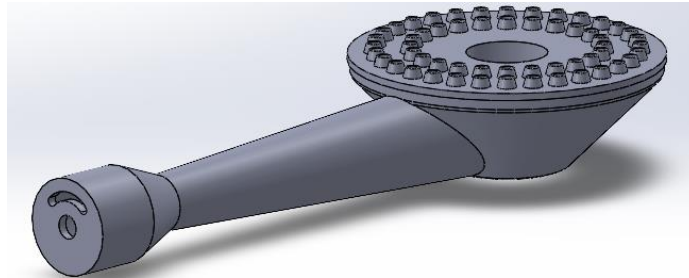
Criterio de evaluación	Porcentaje	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Nota	Porcentaje	Nota	Porcentaje	Nota	Porcentaje
Combustión con bajas emisiones de contaminantes	21,50%	5	1,075	3	0,645	4	0,860
Materiales resistentes y conductores de calor	21,22%	5	1,061	5	1,061	4	0,849
Funcionamiento con condiciones ambientales	20,11%	5	1,006	5	1,006	5	1,006
Adecuación para control de presión, flujo y temperatura	18,72%	4	0,749	4	0,749	4	0,749
Llama de la combustión estable	18,45%	3	0,553	2	0,369	5	0,922
			4,401		3,829		4,386

*Nota.* El resultado de las alternativas se obtiene de la sumatoria de los productos entre el porcentaje de cada criterio por la nota que se le asigna a cada alternativa siendo 5 la nota más alta y 1 la más baja. Tomado de: Elaboración propia

La alternativa de diseño ganadora fue la del quemador atmosférico de premezcla debido a que funciona a condiciones atmosféricas, permite una modulación del aire para obtener una combustión es completa y así reducir la emisión de contaminantes, puede ser adecuado con implementos para realizar un control de las condiciones de operación (presión, flujo y temperatura), se ve que no tiene una buena estabilidad de llama, pero será un detalle que se tendrá

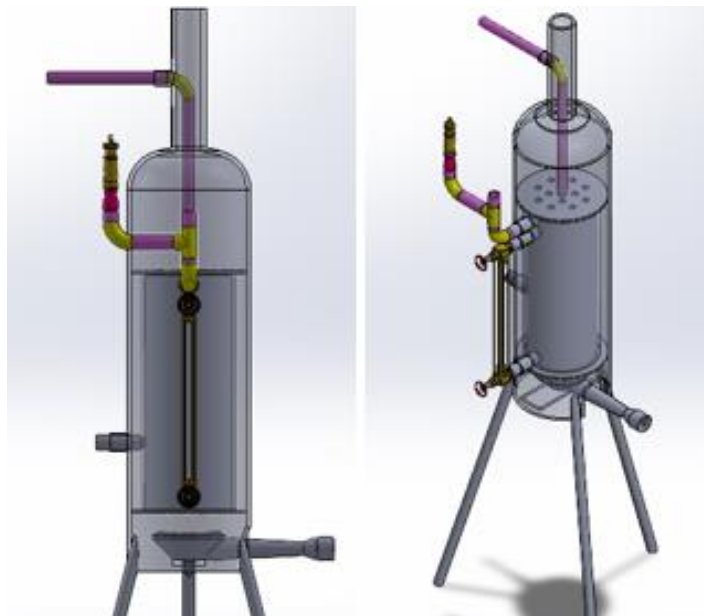
en cuenta para su correcto funcionamiento y evitar la condición de retro llama y enfriamiento de la llama. En la figura 20 se observa un boceto del quemador atmosférico de premezcla que se quiere fabricar y en la figura 21 un ensamble del quemador en el evaporador

*Figura 18. Boceto del quemador*



*Nota.* Tomado de: Elaboración propia en SolidWorks

*Figura 19. Instalación del quemador en el evaporador*



*Nota.* En este ensamble se ve el lugar donde se debe instalar el quemador. Tomado de: SolidWorks

## 5. Diseño de detalle del quemador

### 5.1. Cálculos

#### 5.1.1. Análisis de combustión

Después de obtener los constituyentes del biogás por cromatografía de gases registrados en la tabla 8 y ver que están en los rangos de la tabla 3 se procede a realizar el análisis de combustión que consiste en determinar la relación de aire combustible, el poder calorífico y la temperatura de llama de este biogás, a continuación, se presenta el cálculo de estos parámetros.

#### Análisis último del combustible del biogás seleccionado

Tabla 12. Análisis último de los elementos que conforman el biogás

<i>Componente</i>	<i>Composición</i>	<i>M</i>	<i>n<sub>i</sub></i>	<i>n<sub>i</sub>*M<sub>i</sub></i>
	<i>%Vol/Vol</i>	<i>[kg/kmol]</i>		
<i>CH<sub>4</sub></i>	71	16,04	0,71	11,39
<i>CO<sub>2</sub></i>	28	44,01	0,28	12,323
<i>H<sub>2</sub>O(g)</i>	0,7	18,015	0,007	0,126
<i>H<sub>2</sub>S</i>	0,3	34	0,003	0,102
<i>Total</i>	100		-	

Nota. Tomado de: tabla A-1 (Cengel Yunes A, 2012, p.908)

Esta tabla se realizó aplicando la siguiente ecuación:

$$M_{Biogas} = \sum n_i * M_i$$

$$M_{Biogas} = 23,945[kg/kmol]$$

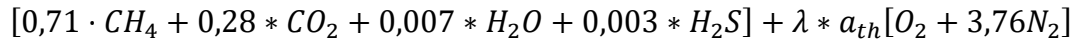
#### Estequiometría con aire teórico:

$a_{th}$ : coeficiente de aire

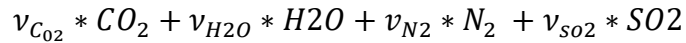
$\lambda$ : coeficiente de exceso de aire

$\nu_{CO_2}, \nu_{H_2O}, \nu_{N_2}, \nu_{SO_2}, \nu_{O_2}$ : coeficientes estequiométricos de los productos de combustión

**Reactivos:**  $\lambda = 1$



**Productos:**



$$C: 0,71 + 0,28 = v_{CO_2}$$

$$H: 0,71 \cdot 4 + 0,007 \cdot 2 + 0,003 \cdot 2 = v_{H_2O} \cdot 2$$

$$O: 0,28 \cdot 2 + 0,007 + \lambda \cdot a_{th} \cdot 2 = v_{CO_2} \cdot 2 + v_{H_2O} + v_{SO_2} \cdot 2$$

$$S: 0,003 = v_{SO_2}$$

$$N_2: 3,76 \cdot a_{th} \cdot \lambda = v_{N_2}$$

- $v_{CO_2} = 0,99$
- $v_{SO_2} = 0,003$
- $v_{H_2O} = 1,43$
- $a_{th} = 1,425$
- $v_{N_2} = 5,356$

**Fracción molar de los productos de combustión con aire estequiométrico:**

$$n_t = v_{CO_2} + v_{H_2O} + v_{N_2} + v_{SO_2}$$

$$Y = \frac{n_i}{n_t}$$

Tabla 13. Fracción molar de los productos de combustión con aires estequiométrico

<i>Componente</i>	<i><math>v_i</math></i>	<i><math>Y_i</math></i>
<i>CO<sub>2</sub>(g)</i>	<i>0,99</i>	<i>0,127</i>
<i>H<sub>2</sub>O(g)</i>	<i>1,43</i>	<i>0,184</i>
<i>N<sub>2</sub>(g)</i>	<i>5,356</i>	<i>0,688</i>
<i>SO<sub>2</sub>(g)</i>	<i>0,003</i>	<i>3,856E-04</i>
<i><math>v_t</math></i>	<i>7,779</i>	<i>-</i>

Nota. Tomado de: elaboración propia

**Relación aire-combustible teórica:**

$$A/C = \frac{\lambda \cdot a_{th} \cdot M_{Aire\ seco}}{\sum N_i \cdot M_i}$$

$$A/C = \frac{1 \cdot 1,425 \cdot 4,76 \cdot 28,96}{0,71 \cdot 16,043 + 0,28 \cdot 44,01 + 0,007 \cdot 18,015 + 0,003 \cdot 34}$$

$$A/C = 8,205 [kg_{aire}/kg_{combustible}]$$

**Estequiometria real**

Para una estequiometria real se trabajó con un 20% de exceso de aire y con una humedad relativa del 80%

$N_{aire}$ : número de moles de aire seco [kmol]

$$N_{aire} = \lambda \cdot a_{th} \cdot 4,76$$

$$N_{aire} = 1,2 \cdot 1,425 \cdot 4,76$$

$$N_{aire} = 8,14 \text{ kmol}$$

$\phi_{aire}$  = humedad relativa.

$P_{sat @ 25^\circ C}$  = presión de saturación del agua [kpa].

$P_{v,aire}$  = presión parcial del vapor de agua en el aire [kPa].

$$P_{sat @ 25^\circ C} = 3,1698 \text{ kPa} \quad (\text{Tabla A-4 Libro de Cengel})$$

$$P_{v,aire} = \phi_{aire} \cdot P_{sat @ 25^\circ C}$$

$$P_{v,aire} = 0,8 \cdot 3,1698 \text{ kPa}$$

$$P_{v,aire} = 2,536 \text{ kPa}$$

$N_{v,aire}$  = Moles de vapor de agua en el aire [kmol]

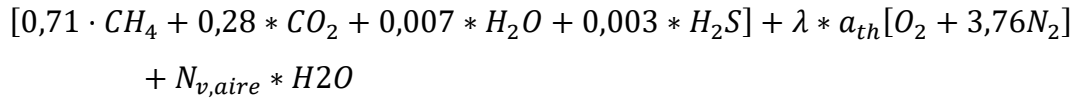
$P_{total}$  = Presión atmosférica [kPa]

$$N_{v,aire} = \left( \frac{P_{v,aire}}{P_{total}} \right) \cdot N_{total} = \left( \frac{P_{v,aire}}{P_{total}} \right) \cdot (N_{aire} + N_{v,aire})$$

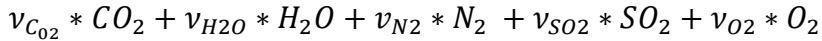
$$N_{v,aire} = \left( \frac{2,536 \text{ kPa}}{89,64 \text{ kPa}} \right) \cdot (8,14 \text{ kmol} + N_{v,aire})$$

$$N_{v,aire} = 0,237 \text{ kmol}$$

**Reactivos:**  $\lambda = 1,2$



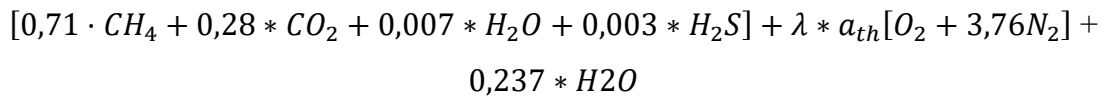
**Productos:**



- $v_{CO_2} = 0,99$
- $v_{SO_2} = 0,003$
- $v_{H_2O} = 1,667$
- $v_{O_2} = 0,285$
- $v_{N_2} = 6,43$

**Reacción total:**

**Reactivos:**  $\lambda = 1,2$ ;  $a_{th} = 1,425$



**Productos:**

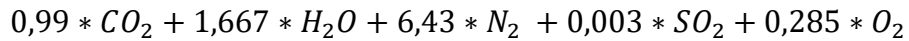


Tabla 14. Fracción molar de los productos de combustión con humedad y exceso de aire

<i>Componente</i>	$v_i$	$Y_i$
<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>0,99</i>	<i>0,1056</i>
<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>1,667</i>	<i>0,1778</i>
<i>N<sub>2</sub></i>	<i>6,43</i>	<i>0,6858</i>
<i>O<sub>2</sub></i>	<i>0,285</i>	<i>0,03045</i>
<i>SO<sub>2</sub></i>	<i>0,003</i>	<i>3,2E-04</i>
<i>v<sub>t</sub></i>	<i>9,375</i>	

Nota. Tomado de: elaboración propia

**Relación aire-combustible real:**

$$A/C = \frac{m_{air}}{m_{comb}}$$

$$A/C = \frac{\lambda \cdot a_{th} \cdot M_{Aire\ seco}}{\sum N_i \cdot M_i}$$

$$A/C = \frac{1,2 \cdot 1,425 \cdot 4,76 \cdot 28,96}{0,71 \cdot 16,043 + 0,28 \cdot 44,01 + 0,007 \cdot 18,015 + 0,003 \cdot 34}$$

$$A/C = 9,845 \text{ [kg aire/ kg combustibile]}$$

**5.1.2. Proceso iterativo para obtener una temperatura de llama adiabática inicial:**

Inicialmente se obtuvo el poder calorífico de la mezcla con la sumatoria del producto del número de moles por el poder calorífico de los reactivos de combustión:

$$q_{biogas} = \sum_{reactivos} n_i \cdot (q_i)$$

Tabla 15. Poder calorífico de los reactivos de combustión

<i>Componente</i>	<i>n<sub>i</sub></i>	<i>q<sub>i</sub></i> [kJ/kmol]	<i>n<sub>i</sub> * q<sub>i</sub></i>
<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>0,71</i>	<i>802,2</i>	<i>569,562</i>
<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>0,28</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>0,007</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>H<sub>2</sub>S</i>	<i>0,003</i>	<i>648,646</i>	<i>1,946</i>

Nota. Adaptado de: (Cengel Yunes A, 2012, p.949)

$$q_i = 571,51 \text{ [kj/kmol]}$$

Una vez conocido el poder calorífico inferior de la mezcla y con el valor de las entalpías de los productos de combustión se realizó un proceso iterativo utilizando la siguiente ecuación hasta que el valor de la izquierda coincida con el de la derecha (Maradey Charris, 2002, pp.440-442)

$$q_{gases} = \sum_{productos} n_p \cdot (\Delta h_p)$$

Tabla 16. Resultados del proceso iterativo para obtener la temperatura de llama adiabática considerando aire estequiométrico,  $q_i$  y  $\Delta h$  están en [kJ/kmol]

$q_i$ [kJ/kmol]	$T_{ad}$ k	$\Delta h_{CO_2}$	$\Delta h_{H_2O}$	$\Delta h_{N_2}$	$\Delta h_{SO_2}$	$\Sigma n \cdot \Delta h$
571,51	2100	106,864	87,735	68,417	286,47	598,557272
571,51	2050	103,835	85,156	66,612	205,7	581,960702
571,51	2040	103,221	84,637	66,247	201,798	578,644026
571,51	2030	102,611	84,121	65,885	197,971	575,351893
571,51	2020	102,005	83,608	65,524	194,21	572,073564
571,51	2010	101,403	83,099	65,166	190,53	568,821226
571,51	2000	100,804	82,593	64,81	186,92	565,58707
571,51	1990	100,203	82,081	64,448	181,67	562,305298

Nota. Adaptado de: (Cengel Yunes A, 2012, p. 939, p.941, p.946)

$$T_{\text{llama adiabatica}} = 2020 \text{ k}$$

Tabla 17. Resultados del proceso iterativo para obtener la temperatura de llama adiabática considerando exceso de aire en la estequiometria,  $q_i$  y  $\Delta h$  están en [kJ/kmol]

$q_i$ [kJ/kmol]	$T_{ad}$ k	$\Delta h_{CO_2}$	$\Delta h_{H_2O}$	$\Delta h_{N_2}$	$\Delta h_{O_2}$	$\Delta h_{SO_2}$	$\Sigma n \cdot \Delta h$
571,51	1760	86,42	70,535	56,227	58,88	147,909	581,931
571,51	1750	85,823	69,544	55,87	58,506	146,301	577,281
571,51	1740	85,231	68,567	55,516	58,136	144,71	572,680
571,51	1730	84,619	69,046	55,155	57,761	143,137	570,439
571,51	1720	84,043	69,55	54,807	57,394	141,581	568,362
571,51	1710	83,439	68,071	54,447	57,019	140,042	562,872
571,51	1700	82,856	67,589	54,099	56,652	138,52	559,145

Nota. Adaptado de: (Cengel Yunes A, 2012, p. 937, p. 939, p.941, p.946)

$$T_{\text{gases}} = 1730 \text{ k}$$

### 5.1.3. Poder calorífico y temperatura de llama adiabática

A continuación, se calcula el poder calorífico superior e inferior, la temperatura de llama adiabática y la temperatura de gases de combustión usando los valores de tablas termodinámicas a las temperaturas calculadas anteriormente y las siguientes ecuaciones.

**5.1.3.1. Entalpias de formación de los productos y reactivos de la reacción.** Las entalpias de los reactivos y productos de la reacción de combustión corresponden la sumatoria de los productos del número de moles del elemento por su entalpia de formación (Cengel Yunes A, 2012, pp. 782-784), estas entalpias se registran en las tablas 19, 20 y 21

$$H_{reac} = \sum n_i * (hf^\circ)_{i\ reac}$$

$$H_{prod} = \sum v_i * (hf^\circ)_{i\ prod}$$

Tabla 18. Entalpias de formación de los reactivos de combustión

Reactivos	$n_i$	$\bar{h}^\circ f$ [kJ/kmol]	$n_i * (hf^\circ)_i$
CH <sub>4</sub>	0,71	-74850	-53143,5
CO <sub>2</sub>	0,28	-393520	-110185,6
H <sub>2</sub> O	0,007	-241820	-1692,74
H <sub>2</sub> S	0,003	0	0

Nota. Tomado de: tabla A-26 (Cengel Yunes A, 2012, p.948)

$$H_{reac} = -165021,84 \text{ [kJ/kmol]}$$

Tabla 19. Entalpias de formación de los productos de la reacción con aire estequiométrico

Productos	$v_i$	$\bar{h}^\circ f$ [kJ/kmol]	$v_i * (hf^\circ)_i$
CO <sub>2</sub>	0,99	-393520	-389584,8
H <sub>2</sub> O	1,43	-241820	-345802,6
N <sub>2</sub>	5,356	0	0
SO <sub>2</sub>	0,003	0	0

Nota. Adaptado de: tabla A-26 (Cengel Yunes A, 2012, p.948)

$$H_{prod} = -735387,4 \text{ [kJ/kmol]}$$

Tabla 20. Entalpias de formación de los productos de la reacción con exceso de aire

<i>Productos</i>	$v_i$	$\bar{h}^{\circ}f$ [kJ/kmol]	$v_i * \bar{h}^{\circ}f$
$CO_2$	0,99	-393520	-389584,8
$H_2O$	1,667	-241820	-403113,94
$N_2$	6,43	0	0
$O_2$	0,2855	0	0
$SO_2$	0,003	0	0

Nota. Tomado de: tabla A-26(Cengel Yunes A, 2012, p.948)

$$H_{prod} = -792698,74 \text{ [kJ/kmol]}$$

**5.1.3.2. Calor específico de los productos de combustión.** El calor específico de los gases de combustión corresponde a la sumatoria del producto entre el coeficiente estequiométrico de los productos por su calor específico en base molar,

$$Cp_{gases} = \sum v_i * \bar{C}_{p_i\text{produ}}$$

Tabla 21. Calor específico de los productos combustión con aire estequiométrico a 2020 k

<i>Productos</i>	$v_i$	$C_p$ [kJ/kmol*k]	$v_i * C_p$ [kJ/kmol*k]
$CO_2$	0,99	60,49	59,885
$H_2O$	1,43	51,27	73,316
$N_2$	5,356	36,02	192,923
$SO_2$	0,003	58,153	0,174
	7,779		326,3

Nota. Tomado de: (Turns, 2000, p. 688-697)

Tabla 22. Calor específico de los productos de combustión con aire en exceso a 1730 k

<i>Productos</i>	$v_i$	$C_p$ [kJ/kmol*k]	$v_i * C_p$ [kJ/kmol*k]
CO <sub>2</sub>	0,99	59,442	58,85
H <sub>2</sub> O	1,667	49,141	81,92
N <sub>2</sub>	6,43	35,431	227,82
SO <sub>2</sub>	0,003	56,526	0,17
O <sub>2</sub>	0,2855	37,114	10,60
	9,3755		379,35

Nota. Tomado de: (TURNS, 2000, p.688-697)

Para corroborar el valor de los  $C_p$  anteriores se comparan con los  $C_p$  de la tabla de calores específicos de varios gases comunes en estado ideal los cuales se encuentran en la tabla 24. Donde  $\bar{C}_p$  esta en base molar y  $C_p$  en base másica

$$\bar{C}_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3$$

Tabla 23. Calor específico de los productos de combustión en estado ideal

Sustancia	T	A	B	C	d	$\bar{C}_p$ [kJ/kmol*k]	$C_p$ [kJ/kg*k]
CO <sub>2</sub>	1000					54,53	1,239
CO <sub>2</sub>	1730	22,26	5,98E-02	-3,50E-05	7,47E-09	59,62	1,355
CO <sub>2</sub>	2020					61,78	1,404
H <sub>2</sub> O	1000					41,12	2,28
H <sub>2</sub> O	1730	32,24	1,92E-03	1,06E-05	-3,595E-09	48,53	2,69
H <sub>2</sub> O	2020					49,54	2,75
N <sub>2</sub>	1000					32,537	1,161
N <sub>2</sub>	1730	28,9	-1,57E-03	8,08E-06	-2,87E-09	35,492	1,266
N <sub>2</sub>	2020					35,020	1,249
SO <sub>2</sub>	1000					54,222	0,846
SO <sub>2</sub>	1730	25,78	5,795E-02	-3,812E-05	8,612E-09	56,535	0,882
SO <sub>2</sub>	2020					58,278	0,910

O <sub>2</sub>	1000					34,84	1,09
O <sub>2</sub>	1730	25,48	1,52E-02	-7,16E-06	1,31E-09	37,15	1,161
O <sub>2</sub>	2020					37,80	1,181

*Nota.* Adaptado de: tabla A-2 (Cengel Yunes A, 2012, p.911)

**5.1.3.3. Poder calorífico superior e inferior del biogás.** El poder calorífico de un combustible es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión del combustible. Es decir,

$$Poder\ calorifico = |hc| \quad (\text{kJ/kg combustible})$$

El poder calorífico depende de la fase del H<sub>2</sub>O en los productos. El poder calorífico recibe el nombre de poder calorífico superior (PCS o HHV por sus siglas en inglés higher heating value) cuando el H<sub>2</sub>O en los productos está en forma líquida, y se llama poder calorífico inferior (PCI o LHV por sus siglas en inglés, lower heating value) cuando el H<sub>2</sub>O en los productos está en forma de vapor. Los dos poderes caloríficos se relacionan por medio de:

$$PCS = PCI + (mh_{fg})_{H_2O} \quad (\text{kJ/kg combustible})$$

Donde  $m$  es la masa de H<sub>2</sub>O en los productos por unidad de masa de combustible y  $h_{fg}$  es la entalpía de vaporización del agua a la temperatura especificada. (Cengel Yunes A, 2012, p.784)

a continuación, se muestra cómo se obtuvieron el poder calorífico superior e inferior del biogás en base a las anteriores ecuaciones y las entalpías de formación de los reactivos y productos de la reacción considerando aire estequiométrico y condensación de vapor de agua a 25°C registrados en las tablas 19 y 20.

### Poder calorífico superior

$$PCS_{Biogas} = \bar{h}_c = |H_{Prod} - H_{react}| = \sum N_p \bar{h}_{fp}^\circ - \sum N_r \bar{h}_{fr}^\circ$$

$$PCS_{Biogas} = | - 735387,4 \text{ [kJ/kmol]} - (-165021,84 \text{ [kJ/kmol]} )|$$

$$PCS_{Biogas} = 570365,56 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$PCS_{Biogas} = \frac{570365,56 \text{ [kJ/kmol]}}{23,94 \text{ [kg/kmol]}}$$

$$PCS_{Biogas} = 23824,794 [kJ/kg]$$

#### Poder calorífico inferior del biogás

$$PSC_{Biogas} = PCI_{Biogas} + \frac{n_{H2O}}{M_{H2O}} * hfg_{H2O}$$

$$PCI_{Biogas} = PSC_{Biogas} - \frac{n_{H2O}}{M_{H2O}} * hfg_{H2O}$$

$$hfg_{H2O} = 2441 [kJ/kg]$$

$$PCI_{Biogas} = 23824,794 [kJ/kg] - \frac{1,667[kmol]}{18[\frac{kmol}{kg}]} * 2441 [kJ/kg]$$

$$PCI_{Biogas} = 23598,73[kJ/kg]$$

**5.1.3.4. Temperatura de llama adiabática.** La temperatura de llama adiabática se calcula con la entalpia de formación y el calor específico de los productos de combustión a 2020 k de las tablas 20 y 22 cuando la reacción de combustión se hace con aire estequiométrico.

$$T_{ad} = T_{ref} + \frac{H_{reac} - H_{prod}}{Cp_{gases}}$$

$$T_{ad} = T_{ref} + \frac{\sum Vi * (hf^\circ)_{i react} - \sum Vi * (hf^\circ)_{i prod}}{\sum Vi * (Cp)_{i prod}}$$

$$T_{ad} = 298k + \frac{-165021,84 [kJ/kmol * k] - (-735387,4[kJ/kmol * k])}{326,3 [kJ/kmol * k]}$$

$$T_{ad} = 2045,98 k$$

**5.1.3.5. Temperatura de gases de combustión.** La temperatura de los gases de combustión se calcula con la entalpia de formación y el calor específico de los productos de combustión a 1750 k de las tablas 23 y 24 cuando la reacción de se hace con exceso de aire.

$$T_{gases} = 298k + \frac{-165021,84 [kJ/kmol * k] - (-792698,74[kJ/kmol * k])}{379,35 [kJ/kmol * k]}$$

$$T_{gases} = 1952,612 \text{ k}$$

Una vez calculado el poder calorífico del biogás se plantea la siguiente ecuación para poder hallar la masa de combustible:

$$m_{Biogas} = \frac{Q_{Total}}{PCI_{Biogas}}$$

$$Q_{Total} = m_{Biogas} * PCI_{Biogas}$$

### 5.1. Calor requerido por el evaporador

El calor requerido se calcula con el fin de obtener el flujo masico de combustible necesario para el funcionamiento del evaporador, el calor requerido equivale a la suma del calor útil y las pérdidas de calor hacia el ambiente, a continuación, se muestra una serie de cálculos para obtenerlo.

#### 5.1.3. Análisis termodinámico para el cálculo del calor útil:

El calor útil se determinó experimentalmente al evaporar un litro de agua en el evaporador. Durante el proceso, se registraron el tiempo total de vaporización, la temperatura superficial del evaporador, la temperatura del vapor producido y la temperatura de los gases de combustión a la salida del tubo de escape.

El tiempo necesario para alcanzar la temperatura de evaporación se estimó, ya que no fue posible observar el interior del evaporador ni medir su temperatura interna. Para el cálculo de la energía involucrada, se utilizaron tablas de vapor para obtener las entalpías del líquido comprimido, de vaporización y del vapor saturado.

$t_e$ : Tiempo en alcanzar la temperatura de ebullición

$t_{total}$ : tiempo que se demoro en evaporar el litro de agua

$V_{H2O}$ : volumen de agua a evaporar

$\rho_{H2O}$ : densidad del agua

$m_{H2O}$ : masa del agua

$$t_e = 4 \text{ [min]}$$

$$t_{total} = 25 \text{ [min]}$$

$$V_{H_2O} = 1 \text{ lt} = 0,001 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\rho_{H_2O} = 997,1 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$m_{H_2O} = V_{H_2O} * \rho_{H_2O}$$

$$m_{H_2O} = 0,9971 \text{ [kg]}$$

### Condiciones de líquido comprimido:

$T_o$ : temperatura ambiente de Bucaramanga

$P_o$ : presión manométrica del evaporador

$P_{atm}$ : presión atmosférica de Bucaramanga

$P_{abs}$ : presión absoluta del evaporador

$h_{f1}$ : entalpia de líquido a condiciones de líquido comprimido

$$T_o = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_o = 172,369 \text{ Kpa}$$

$$P_{atm} = 90,65 \text{ kpa}$$

$$P_{abs} = P_o + P_{atm} = 263 \text{ kpa}$$

$$h_{f1} = 105 \text{ kJ/kg}$$

### Condición de vapor saturado:

$T_1$ : Temperatura de vapor saturado

$v_1$ : Volumen específico de vapor saturado

$h_{f2}$ : entalpía del líquido a condiciones de vapor saturado

$h_g$ : entalpia de vapor saturado

$h_{fg}$ : entalpia de vaporización

$$T_1 = 109 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_1 = 0,001051 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{f2} = 457,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_g = 2690,2 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg} = 2233 \text{ kJ/kg}$$

$Q_{sensible}$ : flujo calor sensible

$Q_{latente}$ : flujo calor latente

$Q_{Util}$ : flujo calor útil

$$Q_{sensible} = (h_{f2} - h_{f1}) * \frac{m_{H2O}}{t_e}$$

$$Q_{sensible} = (457,2 - 105)kJ/kg * \frac{0,9971 [kg]}{240 [s]}$$

$$Q_{sensible} = 1,463 [kJ/s]$$

$$Q_{latente} = h_{fg} * \frac{m_{H2O}}{t_{Total}}$$

$$Q_{latente} = 2233 kJ/kg * \frac{0,9971 [kg]}{1260 [s]}$$

$$Q_{latente} = 1,7670 [kJ/s]$$

$$Q_{Util} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{Util} = 3,23 [kJ/s]$$

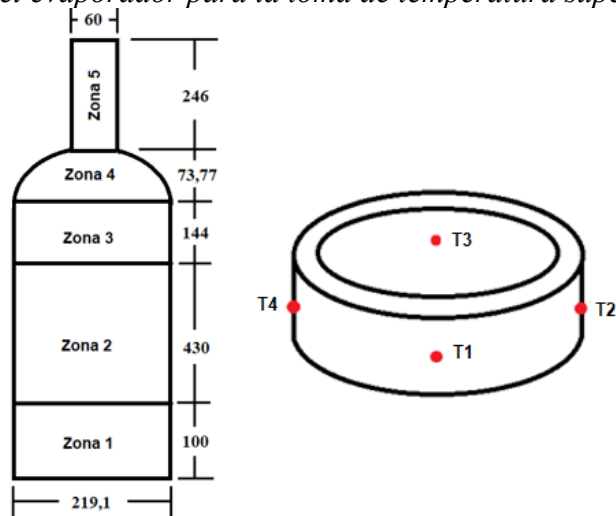
#### 5.1.4. Pérdidas de calor por convección y radiación

Esta etapa se desarrolló en el laboratorio de sistemas térmicos de la UIS por lo cual se trabajó a condiciones ambientales de Bucaramanga, este análisis de transferencia de calor se realizó entre la superficie del evaporador y el entorno del laboratorio y se asume como un sistema de transferencia de calor por convección natural sobre una superficie cilíndrica vertical.

- Presión atmosférica: 90,65 kPa
- Temperatura ambiente: 25 C°
- Gravedad: 9,81 m/s

En la figura 22 se muestra cómo se dividió el evaporador por zonas de las cuales a cada una se le midieron 4 temperaturas con el fin de obtener una temperatura promedio superficial, estas temperaturas fueron registradas en la tabla 25.

Figura 20. División del evaporador para la toma de temperatura superficial



Nota. las unidades están en mm. Tomado de: elaboración propia.

Tabla 24. Temperatura superficial de la caldera por zonas [C°]

N°	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
1	91	100	86	93	92
2	96	104	86	92	93
3	96	106	89	92	93
4	92	105	89	95	92
Tprom zona	93,75	103,75	87,5	93	92,5
Tprom general	94,1				

Nota. Tomado de: Elaboración propia

Con la temperatura superficial del evaporador y la temperatura ambiente se saca una nueva temperatura promedio de la cual se obtienen las propiedades del aire que están registradas en la tabla 26.

$k$ : conductividad térmica

$\alpha$ : difusividad térmica

$\mu$ : viscosidad dinámica

$\nu$ : viscosidad dinámica

$Pr$ : número de Prantl

$T_s$ : Temperatura de la superficie

$T_\infty$ : temperatura ambiente del laboratorio de sistemas térmicos

$T_f$ : temperatura de película (temperatura promedio entre la superficie y el ambiente)

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2}$$

$$T_f = \frac{94,1 - 25}{2}$$

$$T_f = 59,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

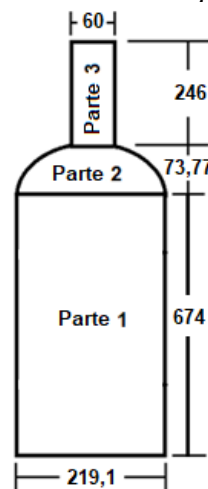
Tabla 25. Propiedades del aire a una temperatura de película de 59,55 [C°]

Propiedad	Unidades	Valor
K	W/m*K	0,02808
$\alpha$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	2,632E-05
$\mu$	kg/m*s	2,008E-05
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	1,896E-05
Pr	-	0,7202

Nota. Estos valores corresponden a las propiedades del aire a 1 Atm de la tabla A-15 tomado de: (Cengel Yunes A, 2012, p.860)

Para el cálculo de las pérdidas de calor hacia el ambiente se dividió el evaporador en tres partes por la diferencia de geometría como se muestra en la figura 23, y se tuvieron en cuenta las ecuaciones de transferencia de calor por convección natural y radiación que a continuación se presentan

Figura 21. División de la caldera para el cálculo de pérdidas de calor por conveccion



Nota. Tomado de: elaboración propia.

### 5.1.5. Transferencia de calor por convección natural

Como anteriormente se había dicho, el evaporador se trabajará como un caso de convección forzada natural sobre un cilindro vertical y se tendrán en cuenta las correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt y demás números adimensionales para hallar el coeficiente convectivo del aire y así poder usar la ecuación de transferencia de calor por convección de la Ley de Enfriamiento de Newton.

$\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica de un gas ideal

$Gr_L$ : número de Grashof

$Ra_L$ : número de Rayleigh

$L_c$ : longitud característica

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$Gr_L = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2}$$

$$Ra_L = Gr_L * Pr = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L_c^3}{\nu^2} * Pr$$

$A_{s_{cil}}$ : área superficial del evaporador

$D_{evap}$ : diámetro exterior del evaporador

$Nu$ : número de Nusselt

$h$ : coeficiente convectivo del aire

$Q_{conv}$ : flujo de la pérdida de calor por convección

$Q_{paredes}$ : flujo de las pérdidas de calor por paredes

Debido a que se cumple la siguiente condición: un cilindro vertical puede tratarse como una tabla vertical

$$D \geq \frac{35 * L}{Gr^{1/4}}$$

Se utiliza la siguiente correlación promedio de Nusselt de una placa vertical (CENGEL, 2007, p. 511, tabla 9-1)

$$Nu = \left[ 0,825 + \frac{0,387 * Ra^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{2/7}} \right]^2$$

lo que nos permite obtener el coeficiente convectivo del aire

$$h = \frac{k}{Lc} * Nu$$

una vez conocido el coeficiente  $h$ , el área superficial  $As_{cil}$  y las temperaturas de superficie  $T_s$  y ambiente  $T_{\infty}$  ya se puede calcular el flujo de calor por convección aplicando la siguiente ecuación los resultados están en la tabla 27.

$$As_{cil} = \pi * D * h$$

$$Q_{conv} = h * As_{cil} * (T_s - T_{\infty})$$

### 5.1.6. Transferencia de calor por radiación

Para hallar las pérdidas de calor por radiación se hará uso de la ecuación de transferencia de calor por radiación, basada en la Ley de Stefan-Boltzmann para la emisión de calor radiante de una superficie. (CENGEL, 2007, p.515)

La emisividad de la caldera se asumió como el valor de una superficie pintada de gris lustroso obtenida de la tabla A-18 (CENGEL, 2007, p.864)

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann

$\epsilon$ : emisividad de la superficie del evaporador

$Q_{rad}$ : flujo de la perdida de calor por radiación

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W/m^2 * k^4]$$

$$\epsilon = 0,92$$

$$\beta = 0,00310 [k^{-1}]$$

$$Q_{rad} = \epsilon * As_{cil} * \sigma * (T_s^4 - T_{\infty}^4)$$

$$Q_{rad} = \epsilon * As_{cil} * \sigma * ((T_s + 273)^4 - (T_{\infty} + 273)^4)$$

En la tabla 27 se muestran los cálculos de pérdidas de calor por convección natral y radiación que se dan en las tres partes en las que se separó el evaporador mencionadas en la figura 23.

Tabla 26. Pérdidas de calor hacia el ambiente por convección y radiación

$N^\circ$	$D_{evap}$ [m]	$L$ [m]	$GrL$ [Ra/Pr]	$RaL$	$D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}}$	$Nu$	$h$ [W/m <sup>2</sup> *C°]	$As$ [m <sup>2</sup> ]	$Q_{conv}$ [W]	$Q_{rad}$ [W]
1	0,2191	0,674	1,74E+09	1,22E+08	0,116	130,244	5,426	0,464	173,95	248,654
2	0,2191	0,07377	2,28E+06	1,59E+06	0,066	18,729	7,129	0,599	295,076	321,047
3	0,06	0,246	8,44E+07	5,91E+07	0,09	52,147	5,952	0,046	19,072	24,853
<b>Total</b>									488,099	594,554

Nota. adaptado de: (Cengel, 2007)

$$Q_{conv} = 0,488 [kW]$$

$$Q_{rad} = 0,595 [kW]$$

$$Q_{paredes} = Q_{conv} + Q_{rad}$$

### 5.1.7. Pérdida de calor por gases:

Para el cálculo de la pérdida de calor por gases de combustión de la caldera al ambiente se registraron la temperatura ambiente y la temperatura de los gases a la salida de la caldera se planteó la siguiente ecuación:

$$T_{tubo} = 174 \text{ c}^\circ$$

$$T_{amb} = 25 \text{ c}^\circ$$

$$Q_{gases} = Cp_{gases} * m_{gases} * \Delta T$$

$$Q_{gases} = \frac{Cp_{gases}}{M_{gases}} * m_{gases} * \Delta T$$

Una vez conocido el poder  $PCI$  del biogás, la relación de aire combustible  $A/C$ , el calor requerido para producir vapor  $Q_{util}$ , las pérdidas de calor por gases de combustión  $Q_{gases}$  y por paredes  $Q_{rad}$  y  $Q_{conv}$  se plantea el siguiente balance de energía para calcular el calor total requerido.

$$Q_{Totla} = Q_{gases} + Q_{paredes} + Q_{util}$$

$$\dot{m}_{Biogás} * PCI_{Biogas} = Cp_{gases} * m_{gases} * \Delta T + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{util}$$

$$\dot{m}_{Biogás} * PCI_{Biogas} = Cp_{gases} * (m_{aire} + m_{biogas}) * \Delta T + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{util}$$

$$\dot{m}_{Biogás} * PCI_{Biogas} = Cp_{gases} * (m_{biogas} * A/C + m_{biogas}) * \Delta T + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{util}$$

$$\dot{m}_{Biogás} * PCI_{Biogas} - Cp_{gases} * (m_{biogas} * A/C + m_{biogas}) * \Delta T = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{util}$$

$$\dot{m}_{Biogás} * (PCI_{Biogas} - Cp_{gases} * (A/C + 1)) * \Delta T = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{util}$$

$$\dot{m}_{Biogás} = \frac{Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{util}}{PCI_{Biogas} - \frac{Cp_{gases}}{M_{gases}} * (A/C + 1) * \Delta T}$$

$$\dot{m}_{Biogás} = \frac{0,488 [kJ/s] + 0,595 [kJ/s] + 3,23 [kJ/s]}{23824,794 [kJ/kg] - \frac{326,3 \left[ \frac{kJ}{kmol} * k \right]}{263 [kg/kmol]} * (9,845 + 1) * (174 - 25) [k]}$$

$$\dot{m}_{Biogás} = 1,976 \times 10^{-4} [kg/s]$$

$$m_{aire} = 1,946 \times 10^{-3} [kg/s]$$

$$m_{gases} = 2,143 \times 10^{-3} [kg/s]$$

$$Q_{gases} = 0,4 [kJ/s] = 0,4 [kW]$$

$$Q_{Total} = 4,713 [kJ/s] = 4,713 [kW]$$

## 5.2. Propiedades de la mezcla aire combustible

Estas propiedades corresponden a las de la premezcla de aire y gas que ocurre en el Venturi de la cámara de mezclado del quemador antes de la combustión, principal mente se calculan las propiedades del aire del lugar de donde se obtiene el biogas, luego se clasifican el biogas y el gas natural Vanti según la norma NTC 3527 y por último se calculan el flujo de biogas y de aire para determinar la densidad de la mezcla aire-biogas.

Tabla 27. Condiciones atmosféricas de Lebrija

Concepto	Símbolo	Unidades	Valor
Presión atmosférica estándar	$P_o$	kPa	101,325
Altura sobre el nivel del mar	$h$	m	1055
Presión manométrica del biodigestor asumida	$P_{Biodigestor}$	kPa	10
Gravedad	$g$	$m/s^2$	9,81
Densidad del aire	$\rho_{aire}$	$Kg/m^3$	1,185
Temperatura de Lebrija	$T_{Lebrija}$	$C^\circ$	25

Nota. Estas son las condiciones atmosféricas de la granja. Tomado de:(Alcaldía de Lebrija, 2024)

$P_{Lebrija}$ : Presión atmosférica de Lebrija

$$P_{Lebrija} = P(h) = P_0 * e^{-\frac{M * g}{R * T} * h}$$

$$P_{Lebrija} = P(h) = 101,325 [kpa] * e^{-\frac{0,02897 \left[ \frac{kg}{mol} \right] * 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 1055 [m]}{8,314 \left[ \frac{J}{mol * k} \right] * 298 [k]}}$$

$$P_{Lebrija} = 89,774 [kpa]$$

$$P_{Biogas} = P_{lebrija} + P_{Biodigestor}$$

$$P_{Biogas} = 89,776 [kpa] + 10 [kpa]$$

$$P_{Biogas} = 99,776 [kpa]$$

$$\rho_{Biogas} = \frac{P_{Biogas} * M_{Biogas}}{R_u * T_L}$$

$$\rho_{Biogas} = \frac{99,776 [kpa] * 23,94 [kg/kmol]}{8,314 [kJ/kmol * k] * 298k}$$

$$\rho_{Biogas} = 0,964 [kg/m^3]$$

### 5.2.3. Clasificación del biogás

Los gases combustibles se clasifican según normas internacionales, en familias de acuerdo con la propiedad característica denominada índice de Wobbe, estos se definen por las siguientes ecuaciones:

$$d = \frac{\rho_{Biogas}}{\rho_{Aire}}$$

$$W_s = \frac{PCS}{\sqrt{d}}$$

$$W_i = \frac{PCI}{\sqrt{d}}$$

Donde  $d$  es la densidad relativa,  $W_s$  es el índice de Wobbe superior y  $W_i$  es el índice de Wobbe inferior, en la tabla 29. Se puede observar la clasificación internacional por familias de los gases combustibles que permitirá clasificar al biogás (Bosch Colombia et al., 2004)

Tabla 28. Clasificación de los gases combustibles según norma NTC 3527

<i>Índice de Wobbe superior a 15.C° y 1013,25 mbar (MJ/m<sup>3</sup>)</i>		
<i>Familia y grupos de gas</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>Primera familia</i>		
- <i>Grupo a</i>	22,4	24,8
<i>Segunda familia</i>	39,1	54,7
- <i>Grupo H</i>	45,7	54,7
- <i>Grupo L</i>	39,1	44,8
- <i>Grupo E</i>	40,9	54,7
<i>Tercera familia</i>	72,9	87,3
- <i>Grupo B/P</i>	72,9	87,3
- <i>Grupo P</i>	72,9	76,8
- <i>Grupo B</i>	81,8	87,3

*Nota.* El índice de Wobbe permitirá clasificar el biogás en un grupo y familia según estándares energéticos. Tomado de: (Bosch Colombia, 2004, p.5)

Una vez conocidas las propiedades del biogás y del gas natural Vanti se procede a clasificarlos según la norma NTC 3527 de la tabla 29, estos resultados se ven en la tabla 30.

Tabla 29. Índice de Wobbe superior e inferior del biogás y el gas natural Vanti

<b>Gas</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho_{\text{Aire.Es}}</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>PCS [MJ/m<sup>3</sup>]</b>	<b>PCI [MJ/m<sup>3</sup>]</b>	<b>d</b>	<b>Ws [MJ/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Wi [MJ/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Clasificación</b>
Biogás	0,964	1,293	22,971	22,753	0,745	26,613	26,361	1 <sup>a</sup> familia Grupo a
GN Vanti	0,709	1,293	42,8	35,4	0,6	52,7	46,6	2 <sup>a</sup> familia Grupo H

*Nota.* Esta tabla permite comparar las propiedades del biogás con las del gas natural Vanti. Tomado de: (Vanti S.A ESP., 2022)

### Flujo masico de gas natural Vanti requerido

Con el calor total requerido para la generación de vapor calculado anteriormente y con las propiedades de la tabla 30 se calcula el flujo masico de gas natural Vanti necesario para la generación de vapor.

$$\dot{m}_{GN} = \frac{Q_{Total}}{PCI_{Biogas}}$$

$$\dot{m}_{GN} = \frac{4,713[kJ/s]}{35,4MJ/m^3} * \frac{0,709[kg/m^3]}{1000[kJ/MJ]}$$

$$\dot{m}_{GN} = 9,439E-05 \text{ kg/s}$$

Al calcula este caudal se evidencia que se requiere el doble de biogás para la generación de vapor.

#### 5.2.4. Flujo volumétrico de combustible

$\dot{V}_n$ : caudal nominal de biogás

$\dot{V}_L$ : caudal de biogás a condiciones de Lebrija

$T_n$ : temperatura a condiciones estándar de un gas ideal

$T_L$ : temperatura ambiente de Lebrija

$P_n$ : presión a condiciones estándar de un gas ideal

$P_L$ : Presión atmosférica de Lebrija

$$\dot{V}_n = \frac{m_{Biogas}}{\rho_{Biogas}}$$

$$\dot{V}_n = \frac{1,976x10^{-4}[kg/s]}{0,964[kg/m^3]}$$

$$\dot{V}_n = 2,049x10^{-4} [m^3/s]$$

Una vez obtenido el flujo de combustible se realiza un ajuste a condiciones estándar de presión y temperatura de un gas ideal utilizando la relación de Boyle y Gay-Lussac para indicar el caudal que ocupara el gas bajo condiciones de referencia

$$P_1V_1T_2 = P_2V_2T_1$$

a continuación, se muestra el juste del flujo de biogás a condiciones normales de un gas ideal

$$P_L * \dot{V}_L * T_n = P_n * \dot{V}_n * T_L$$

$$\dot{V}_L = \frac{P_n * \dot{V}_n * T_L}{P_L * T_n}$$

$$\dot{V}_L = \frac{101,325[kpa] * 2,049 \times 10^{-4} [m^3/s] * 298k}{89,776[kpa] * 273k}$$

$$\dot{V}_L = 2,524 \times 10^{-4} [m^3/s]$$

Debido a que el caudal nominal  $\dot{V}_n$  se aproxima más al caudal que se registró con el gasómetro a la salida de los biodigestores se trabajara con este para los cálculos de diseño.

### 5.2.5. Flujo volumétrico de aire

$$\dot{V}_a = \frac{m_{aire}}{\rho_{aire.N}}$$

$$\dot{V}_a = \frac{1,946 \times 10^{-3} [kg/s]}{1,185 [kg/m^3]}$$

$$\dot{V}_a = 1,642 \times 10^{-3} [m^3/s]$$

### 5.2.6. Densidad de la mezcla Aire-biogás

Una vez ingresa el gas a través del inyector este induce aire atmosférico que se mezcla con el gas en la cámara de mezclado, la mezcla sale por los puertos del quemador que, al entrar en contacto con una fuente de calor externa, realiza el proceso de combustión y empieza a quemarse generando el calor de combustión, a continuación, se muestra el cálculo para obtener la densidad de la mezcla aire-biogás:

$N_{biogas}$ : número de moles de biogás

$X_{Biogas}$ : fracción molar del biogás

$N_{mix}$ : número de moles de la mezcla aire-biogás

$M_{mixA/c}$ : peso molecular de la mezcla aire-biogás

$\rho_{mixA/c}$ : densidad de la mezcla aire-biogás

$$N_{aire} = \lambda * a_{th} * 4,76$$

$$N_{aire} = 1,2 * 1,425 * 4,76$$

$$N_{aire} = 8,14[kmol]$$

$$N_{biogas} = \frac{N_{aire} * M_{aire}}{A/F * M_{biogas}}$$

$$N_{biogas} = \frac{8,14[kmol] * 28,97[kg/kmol]}{9,845 * 23,94[kg/kmol]}$$

$$N_{biogas} = 1[kmol]$$

$$N_{mix} = N_{aire} + N_{Biogas}$$

$$N_{mix} = 8,14 + 1$$

$$N_{mix} = 9,14 [kmol]$$

$$X_{Biogas} = N_{Biogas}/N_{mix}$$

$$X_{Biogas} = 1/9,14$$

$$X_{Biogas} = 0,1094$$

$$X_{aire} = N_{aire}/N_{mix}$$

$$X_{aire} = 8,14/9,14$$

$$X_{aire} = 0,8906$$

$$\rho_{mixA/c} = \frac{P_L * M_{mixA/c}}{R_u * T_m}$$

$$\rho_{mixA/c} = \frac{P_L * (X_{Biogas} * M_{Biogas} + X_{aire} * M_{aire})}{R_u * T_m}$$

$$\rho_{mixA/c} = \frac{89,774[kpa] * (0,1094 * 23,94[kg/kmol] + 0,8906 * 28,96 [kmol])}{8,314[kJ/kmol * k] * 298k}$$

$$\rho_{mixA/c} = 1,029 [kg/m^3]$$

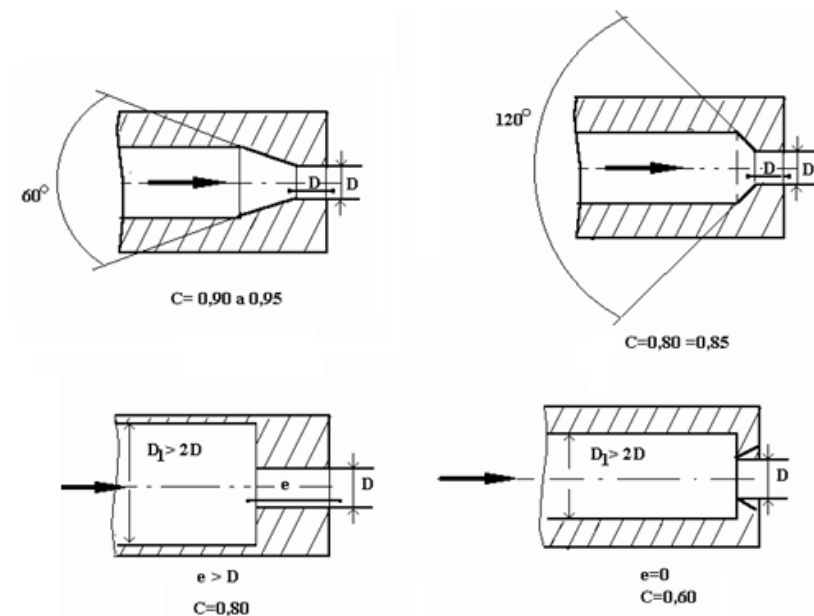
### 5.3. Diseño de detalle del quemador

Para el dimensionamiento del quemador se tomó como guía la metodología del manual de quemadores atmosféricos de premezcla de la universidad de Antioquia y el trabajo de grado banco de quemadores atmosféricos de la UIS.

#### 5.3.3. Diámetro del inyector

El diámetro del inyector ha de calcularse para satisfacer la potencia nominal del quemador. Su magnitud permite dimensionar al inyector, para lo cual debe tenerse cuidado de definir configuraciones geométricas que garanticen un alto coeficiente de gasto del inyector, en la figura 24 se ven los coeficientes de descarga del inyector. (Amell et al., 1997, p.38)

Figura 22. Configuraciones geométricas y coeficientes de descarga un inyector



Nota. Tomado de: (Andrés et al., 1997, p.18)

#### 5.3.4. Compresibilidad del biogás

Debido a que la presión de suministro de biogás es baja los efectos de compresibilidad del biogás se desprecian ósea que su densidad permanece constante, esta situación permite la aplicación del principio de Bernoulli para analizar el flujo de gas por el inyector. a continuación, se presenta como se obtiene el caudal de biogás que pasa por el inyector

utilizando el principio de Bernoulli y el ajuste de presión, densidad y temperatura a condiciones estándar de un gas ideal.(Amell et al., 1997, p.19)

### Ecuación de Bernoulli

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho * V_1^2 + \rho * g * h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho * V_2^2 + \rho * g * h_2$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho * V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho * V_2^2$$

Donde:

$P_1$  : presión a la entrada del inyector

$P_2$ : presión a la salida del inyector

$\rho$ : densidad del gas

$V_1$  : velocidad del gas a la entrada del inyector

$V_2$ : velocidad del gas a la salida del inyector

$g$ : aceleración debido a la gravedad

$h_1$  y  $h_2$ : son las alturas relativas

Para un inyector podemos suponer que la variación en altura y la velocidad a la entrada son muy bajas, por lo que los términos gravitacionales y de velocidad inicial desaparecen, por lo tanto, se simplifica la ecuación y nos permite obtener la velocidad a la salida del inyector:

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho * V_2^2$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 * (P_1 - P_2)}{\rho}}$$

La diferencia de presiones  $P_1 - P_2$  puede definirse como  $\Delta P$  o  $\delta P$ , entonces:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 * \delta P}{\rho}}$$

Si multiplicamos nuestra velocidad por el área del inyector y por el factor de descarga obtenemos

$$\dot{V}_n = C * A * \sqrt{\frac{2 * \delta P}{\rho}}$$

Ahora se realiza el ajuste de presión, densidad y temperatura entre las condiciones normales del biogás y el estándar de un gas ideal

### Condiciones estándar del aire como un gas ideal

$$T = 273 [K]$$

$$P = 101325 [Pa]$$

$$\rho_{aire} = 1,293 [kg/m^3]$$

$$\dot{V}_n = C * A * \sqrt{\left(\frac{2 * \delta P}{1,293 * d}\right) * \left(\frac{P_o}{101325}\right) * \left(\frac{273}{T_o}\right)}$$

$\delta P$ : Presión de su ministro del biodigestor, se asume como la presión la salida de un regulador de presión de gas natural domestico

$d$ : Densidad relativa del biogás

$C$ : Coeficiente de descarga de un inyector de 60° a la salida [ 0,9 a 0,95]

$A$ : Área de salida del inyector en [ $m^2$ ]

$D$ : diámetro del inyector [mm]

$T_o$ : temperatura absoluta del gas en el inyector, temperatura ambiental de Lebrija

$P_o$ : presión absoluta del gas en el inyector, asumida como la presión atmosférica de Lebrija

$\rho_{aireE}$ : densidad del aire a condiciones estándar

$$\delta P = 23 [mbar] = 2300 [Pa]$$

$$\rho_{aireE} = 1,293 [kg/m^3]$$

$$d = 0,767$$

$$C = 0,93$$

$$P_o = 89776 [Pa]$$

$$T_o = 298 [k]$$

Conocidos el caudal para una determinada potencia, la presión de suministro del gas, la temperatura del gas en el inyector y la presión atmosférica del sitio donde funcionará el inyector, el diámetro de éste puede ser calculado con la siguiente ecuación

$$A = \frac{\dot{V}_n}{C * \sqrt{\left(\frac{2 * \delta P}{1,293 * d}\right) * \left(\frac{P_o}{101325}\right) * \left(\frac{273}{T_o}\right)}}$$

$$A = \frac{2,049 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}}{0,93 * \sqrt{\left(\frac{2 * 2300 \text{ [Pa]}}{1,293 \text{ [kg/m}^3\text{]} * 0,745}\right) * \left(\frac{89776 \text{ [Pa]}}{101325 \text{ [Pa]}}\right) * \left(\frac{273 \text{ [K]}}{298 \text{ [K]}}\right)}}$$

$$A = 3,54 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A = \frac{\pi}{4} * D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * \dot{V}_n}{\pi * C} * \sqrt{\frac{1,293 * d}{2 * \delta P} * \frac{101325}{P_o} * \frac{T_o}{273} * 1000}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 2,049 \times 10^{-4} \text{ [m}^3/\text{s]}}{\pi * 0,93} * \sqrt{\frac{1,293 * 0,745}{2 * 2300 \text{ [Pa]}} * \frac{101325 \text{ [Pa]}}{89776 \text{ [Pa]}} * \frac{298 \text{ [K]}}{273 \text{ [K]}} * 1000}}$$

$$D = 2,135 \text{ [mm]}$$

### 5.3.5. Potencia específica

La potencia específica  $Pe$  de un quemador es función del área total de la boquilla, esto es, la suma de la sección de los puertos, que pueden tener diferentes configuraciones geométricas: circulares, ranurados, cuadrados, etc. según las aplicaciones. La geometría de los puertos incide en la estabilidad de la llama; para evitar la ocurrencia de retro llama o desprendimiento debe tenerse en cuenta la relación entre: potencia específica y la dimensión característica del puerto (diámetro si es un orificio). (Amell et al., 1997, p.25). Potencias específicas recomendadas con base en el poder calorífico superior son:

Gas natural: 1,3 → 1,6 kW/cm<sup>2</sup>

Otros gases: 0,7 → 1 kW/cm<sup>2</sup>

$A_t$ : área total de salida del gas

$Pe$ : potencia específica de un quemador

$$P_e = 0,85 [kW/cm^2]$$

$$P_e = \frac{Q_{total}}{A_t}$$

$$A_t = \frac{4,713 [kW]}{0,85 [kW/cm^2]}$$

$$A_t = 5,545 [cm^2]$$

### 5.3.6. Diámetro de cada puerto o diámetro hidráulico.

Para garantizar una mayor difusión del aire secundario a la llama, una distribución uniforme del calor a la carga y estabilidad de llama, el área total de salida se distribuye en secciones menores, entonces:

$$A_t = \sum_{i=1}^n N * A_i$$

$N$ : número de orificios a la salida del quemador

$A_i$ : área del  $i$ -ésimo orificio

### 5.3.7. Diámetro de enfriamiento de la mezcla aire-gas:

Es el diámetro mínimo al cual la llama se puede propagar, depende de la composición de la mezcla aire-gas y del material del puerto. Para un diámetro menor que el diámetro de enfriamiento la llama no se propagará y se estaría en un régimen de inestabilidad de llama o extinción de ésta. (Amell et al., 1997, pp. 34-37) Debido a lo antedicho el diámetro de diseño del puerto debe ser mayor que el diámetro de enfriamiento de la mezcla aire-gas, esto es:

$$\emptyset > de$$

La tabla 31 da información sobre el diámetro crítico para los diferentes gases:

Tabla 30. Diámetro de enfriamiento para llamas estequiométricas a 1 atm. Y 25C°

Mezcla	d <sub>e</sub> (mm)
H <sub>2</sub> – aire	0.9
CH <sub>4</sub> – aire	3.9
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> – aire	1.9
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> – aire	0.8
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> – aire	3.2
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> – aire	2.9
i – C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> – aire	4.0

Nota. Tomado de: (Amell et al., 1997, p.37)

El número de puertos del quemador en los que distribuirá la mezcla aire-gas, se determina con la siguiente ecuación asumiendo 40 orificios, donde N=40

$$A_t = \sum_{i=1}^n N * A_i$$

$$A_i = \frac{A_t}{N}$$

$$A_i = \frac{5,545[cm^2]}{40}$$

$$A_i = 0,1386[cm^2]$$

Una vez obtenida el área de cada puerto se procede a calcular su diámetro, siendo  $\emptyset$  el diámetro de cada puerto.

$$A_i = \frac{\pi}{4} * \emptyset^2$$

$$\emptyset = \sqrt{\frac{4 * A_i}{\pi}}$$

$$\emptyset = \sqrt{\frac{4 * 0,1386[cm^2]}{\pi}}$$

$$\emptyset = 0,4201[cm] = 4,201 [mm]$$

Ya que el principal constituyente del biogás es el  $\text{CH}_4$  se cumple la condición  $\phi > \phi_{\text{de}}$ , para el diámetro de los puertos de llama debido a que el diámetro de enfriamiento para la mezcla de  $\text{CH}_4$ -aire según la tabla 31 es menor que este, por lo tanto, la llama se propagará y estará en un régimen de estabilidad.

Cumpliendo lo anterior se calcula el diámetro de la cabeza del quemador  $DI$  con la siguiente ecuación

$$DI = \frac{2,5 * \phi * N}{\pi}$$

$$DI = \frac{2,5 * 4,201 [mm] * 40}{\pi}$$

$$DI = 133,726 [mm]$$

$\beta$ : constante que evalúa las pérdidas de gasto en el inyector y mezclador respectivamente  
Resultados experimentales asignan un valor de  $\beta \leq 1$ , por lo tanto, se trabajará con un:

$$\beta = 0,8$$

### 5.3.8. Tasa de aire primario (Ra):

Corresponde al flujo de aire inducido por el flujo de gas por generalmente representa al rededor del 60% de la tasa de aire estequiométrico. Cuando la temperatura del cuerpo del mezclador se incrementa la tasa de aire primario decrece, situación que se torna crítica cuando el quemador funciona por un largo período de tiempo. La regulación de la tasa de aire primario de un quemador de inducción atmosférica se efectúa por la reducción de la entrada de aire, permitiéndose de esa manera disponer únicamente de la cantidad de aire estrictamente necesaria. Esto se consigue con un mecanismo ubicado en la entrada al mezclador o próximo a ella. (Amell et al., 1997, p.24)

Para un quemador constituido por un puerto de diámetro  $D$  en mm domésticos se recomienda una tasa de aireación primaria entre 0.5 y 0.6, para quemadores industriales debe tender a 1. (Amell et al., 1997, p.33). Con la siguiente ecuación se calcula la tasa de aire primario.

$$Ra = 0,6 * \frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_n} \text{ experimentalmente se recomienda un } 60\%$$

$$Ra = 0,6 * \frac{1,642 \times 10^{-3} [\text{m}^3/\text{s}]}{2,049 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]}$$

$$Ra = 4,808$$

### 5.3.9. Diámetro del cuello del Venturi (dc)

Ha de calcularse para satisfacer la relación aire-gas  $R$  a la que funcionará el quemador de acuerdo con la potencia nominal y la rata de aireación primaria especificada. Si el quemador funciona libre de contrapresiones en la zona de combustión y las presiones de suministro del gas son menores de 100 mbar., el diámetro del cuello del Venturi se obtiene aplicando la siguiente ecuación.

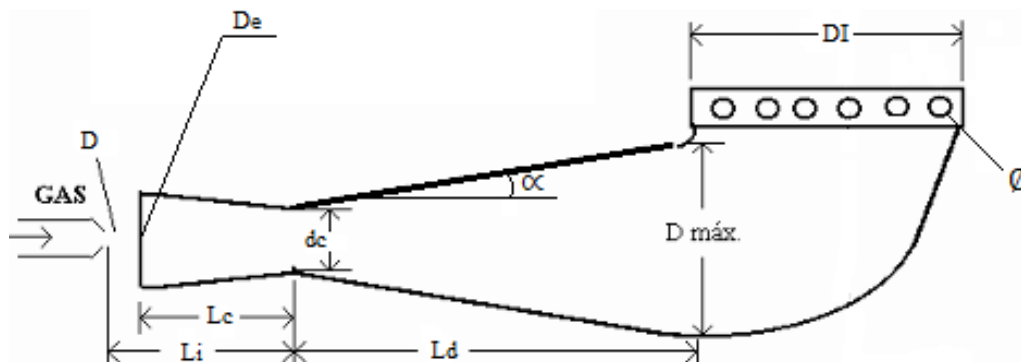
$$dc = D * Ra * \frac{\sqrt{\frac{\rho_{\text{aire}}}{\rho_{\text{biogas}}}}}{\beta}$$

$$dc = 2,123 [\text{mm}] * 4,808 * \frac{\sqrt{\frac{1,293 [\text{kg}/\text{m}^3]}{0,9642 [\text{kg}/\text{m}^3]}}}{0,8}$$

$$dc = 14,777 [\text{mm}]$$

Una vez conocidas las dimensiones básicas se calculan las demás que se derivan de ellas estas se muestran en la figura 27 y se obtienen aplicando las siguientes relaciones y con recomendaciones experimentales que se muestran en la tabla 32.

Figura 23. Principales dimensiones de un quemador atmosférico de premezcla



Nota. Tomado de: (Amell et al., 1997, p.41)

Tabla 31. Dimensiones del quemador

Parámetro	Símbolo	Relación	Recomendación	Unidades	Valor
Longitud del tramo convergente	$L_c$	$L_c = 2,2 * d_c$	$L_c < D_c$	mm	31,51
Diámetro de la sección de entrada del aire	$D_e$	$D_e = (1,5 \text{ a } 2,5) * d_c$ $D_e = 2 * d_c$	$1,5 * D_c < D_e < 2,5 * D_c$	mm	29,55
Longitud del tramo divergente	$L_d$	$L_d = (6 \text{ a } 12) * d_c$ $L_d = 6,5 * d_c$	-	mm	96,053
Distancia del inyector al cuello del Venturi	$L_i$	$L_i = (2,2 * d_c + 15)$	$2,5 * D_c < L_i < 4 * D_c$	mm	47,51
Distancia entre ejes de los orificios	$L_e$	$L_e = 2,5 * \phi$	-	mm	10,502
Área del cuello del Venturi	$A_c$	$A_c = \frac{\pi}{4} * d_c^2$	-	mm <sup>2</sup>	171,508
Área de la salida de la mezcla	$A_s$	$A_s = (1,7 \text{ a } 2,2) * A_c$ $A_s = 1,95 * A_c$	-	mm <sup>2</sup>	334,441
Diámetro del mezclador	$D_{max}$	$D_{max} = \sqrt{\frac{4 * A_s}{\pi}}$	$1,5 * D_c < D_{max} < 2,5 * D_c$	mm	20,635
Ángulo de divergencia	$\alpha$	$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\frac{D_{max}}{2} - d_c}{L_d}\right)$	$6^\circ < \alpha < 10^\circ$	°	6,009

*Nota.* Para el cálculo de estas dimensiones se acomodaron las relaciones para cumplir con las recomendaciones de diseño. Adaptado de: (Amell et al., 1997, pp.40-43)

**5.3.10. Velocidad de la mezcla a la salida de cada puerto**

$Q_{mix}$ : Caudal de la mezcla aire primario-biogás

$Q_i$ : Caudal de la mezcla aire primario-biogás a la salida de cada puerto

$V_i$ : Velocidad de la mezcla aire-biogás a la salida de un i-ésimo puerto

$$m_{gases} = 2,143E - 03 [kg/s]$$

$$Q_{mix} = \frac{0,6 * m_{gases}}{\rho_{mixA/c}}$$

$$Q_{mix} = \frac{2,143E - 03 [kg/s]}{1,029 [kg/m^3]}$$

$$Q_{mix} = 2,0826x10^{-3} [m^3/s]$$

$$A_t = 5,545 [cm^2] = 0,05545 [m^2]$$

$$Q_{mix} = V_{mix} * A_t$$

$$V_{mix} = \frac{Q_{mix}}{A_t}$$

$$V_{mix} = \frac{2,093x10^{-3} [m^3/s]}{0,05545 [m^2]}$$

$$V_{mix} = 0,0385 [m/s]$$

$$Q_i = \frac{Q_{mix}}{N}$$

$$Q_i = \frac{2,093x10^{-3} [m^3/s]}{40}$$

$$Q_i = 5,234x10^{-5} [m^3/s]$$

$$Q_i = V_i * A_i$$

$$V_i = \frac{Q_i}{A_i}$$

$$V_i = \frac{5,234x10^{-5} [m^3/s]}{1,357x10^{-5} [m^2]}$$

$$V_i = 3,857 [m/s]$$

## 6. Fabricación del quemador

### 6.1. Fabricación

La etapa de fabricación del quemador se realizó en el taller de la escuela de ingeniería mecánica con la ayuda de los técnicos, Cesar Velazco, Henry cruz y Fredy Vargas los cuales colaboraron con las actividades de torneado y ornamentación siguiendo los planos de fabricación que se encuentran en los apéndices del A al G, cabe resaltar que el quemador es un prototipo por lo tanto se optó por utilizar acero al carbono para su fabricación. las operaciones de fabricación que se realizaron se describen en las tabas 33 y 34.

Tabla 32. Fabricación del Venturi de la cámara de mezclado

Pieza	Material	Cantidad	Dimensiones iniciales
Venturi	Acero 1020	1	Barra de 2"x18cm
<b>Máquinas para el proceso</b>		Torno convencional	
<b>Operación</b>		<b>Herramienta</b>	
Cilindrado exterior de la barra completa		Butil de acero rápido para exteriores de 3/4"	
Cilindrado exterior del hombro que introduce al Venturi en la cabeza del quemador		Butil de acero rápido para exteriores de 3/4"	
Refrentado exterior en cada extremo de la barra para dar longitud del Venturi		Butil de acero rápido para exteriores de 3/4"	
Cilindrado cónico interno convergente		Barra de alesado de 3/4"	
Cilindrado cónico interno divergente con pendiente de 6,01°		Barra de alesado de 3/4"	
Cilindrado interno continuo de 5 mm de longitud para alojar la tapa interna del puerto de aire primario		Barra de alesado de 3/4"	
Cilindrado y corte de la tapa y el puerto de aire primario		Butil de acero rápido para exteriores de 3/4"	
Perforación de la tapa de aire primario		Broca de 10 mm y broca de 1/4"	
Perforación del puerto de aire primario		Broca de 10 mm y broca de 1/4"	

*Nota.* En esta tabla se encuentran las especificaciones de fabricación de la cámara de mezclado que incluye el tipo de material usado con sus dimensiones iniciales, las máquinas para realizar el proceso, las operaciones y las herramientas. Tomado de: elaboración propia

Figura 24. Venturi del mezclador



*Nota.* Es acá donde se mezclan el gas y el aire primario específicamente en la zona divergente, Al Venturi solo se le realizaron cilindrados cónicos internos y el exterior se cilindro y refrento para dar dimensiones finales. Tomado de: elaboración propia

Figura 25. Tapa de aire primario



*Nota.* La tapa de aire primario es la obstrucción de la entrada de aire y su vez es donde se inserta el inyector, tiene un agujero adicional que permite el giro del puerto de aire primario. Esta tapa se insertó al Venturi a presión. Tomado de: elaboración propia

Figura 26. Puerto de aire primario



*Nota.* Este puerto se coloca sobre la tapa de aire primario y se ajusta con un tornillo, su sección semi anular es la que permite la entrada de aire primario, esta se gira y de esta manera se controla la entrada de aire, en el agujero central se inserta el inyector. Tomado de: elaboración propia

Tabla 33. Fabricación de la cabeza del mezclador

Pieza	Material	Cantidad	Dimensiones iniciales
Cabeza del quemador	Acero al carbono	1	-Tubo Schedule 80 de 6" -Tubo Schedule 80 de 2" -Lámina de 2cm de espesor
Máquinas para el proceso			Equipo de oxicorte Torno convencional Equipo de soldadura por arco eléctrico Taladro de árbol
Operación	Herramienta		
Corte de los tubos de 6" y 2" a las longitudes de 5,5 cm y 6,7 cm respectivamente	Soplete de oxicorte		
Refrentado de los extremos de los tubos de 6" y 2" hasta alcanzar longitudes requeridas	Butil de acero rápido para exteriores de 3/4"		
Corte de dos circunferencias de 15 cm de la lámina para hacer las tapas superior e inferior	Soplete de oxicorte		
Perforación de las tapas	Broca de 1/2" y 1"		
Cilindrado interno y externo de las tapas para dar dimensiones finales	Butil de acero rápido para exteriores de 3/4"		
Insertar y soldar la tapa inferior en el tubo de 6"	Pinzas y electrodos 6013		
Perforar tangencialmente el tubo de 6" para insertar el Venturi	Broca de 45 mm en taladro		
40 perforaciones de la tapa superior del quemador	Broca de 4 mm en taladro		

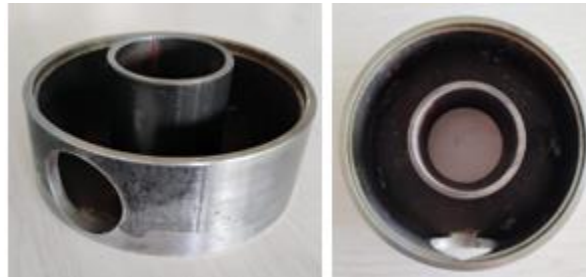
*Nota.* En esta tabla se encuentran las especificaciones de fabricación de la cabeza del mezclador que incluye los materiales usados con sus dimensiones iniciales, las máquinas para realizar los procesos, las operaciones y las herramientas. Tomado de: elaboración propia

*Figura 27. Tapa superior de la cabeza del mezclador*



*Nota.* En esta tapa están los puertos por donde sale la premezcla de gas y aire primario que luego se mezcla con el aire de los alrededores para ser encendida con una chispa y genera una combustión con una llama de color azul. Tomado de: elaboración propia

*Figura 28. Cabeza del mezclador*



*Nota.* En esta pieza se aumenta el área de distribución de la premezcla antes de salir por los puertos de la tapa. En el agujero tangente se inserta el Venturi. Tomado de: elaboración propia

## **6.2. Ensamble**

Después de fabricar las piezas del quemador, se suelda la tapa de aire primario en el extremo convergente del Venturi. Luego, el Venturi se inserta a presión en la cavidad de 45 mm de la cabeza del quemador. A continuación, se coloca la tapa superior del puerto de orificios en la cabeza del quemador y, por último, se atornilla el puerto de aire primario a la tapa de aire primario del Venturi. El conjunto de las piezas se puede observar en las figuras 33 y 34.

*Figura 29. Quemador fabricado desarmado*



*Nota.* Tomado de: elaboración propia

*Figura 30. Quemador fabricado armado*



*Nota.* Tomado de: elaboración propia

Este fue el quemador que se fabricó, en cuanto a los planos de fabricación la única diferencia es el mecanizado exterior del Venturi, lo cual no afecta su desempeño, ya que las dimensiones críticas son las del interior, en cuanto al material de fabricación no es factor que afecte al desempeño del quemador, Sin embargo, si se considera una producción en masa es recomendable utilizar materiales inoxidables para alargar la vida del quemador y evitar posibles problemas de salud, en el siguiente capítulo se mostraran las pruebas de desempeño del quemador al utilizar biogás y gas natural.

## 7. Desempeño y eficiencia del quemador

Antes de realizar las pruebas de desempeño del quemador se seleccionaron inyectores y se ajustó el puerto de aire primario de tal manera que al utilizar gas natural y biogas se obtuviera una llama de color azul, para el gas natural se seleccionó un inyector de 0,8 mm y para el biogas inicialmente se utilizó un inyector de 2 mm; Sin embargo, este fue descartado debido a que la llama presentaba un color amarillo. Por esta razón, se reemplazó por un inyector de 4 mm el cual permitió alcanzar los resultados esperados.

A continuación, se mostrará el desempeño del quemador fabricado el cual se determinó con las eficiencias térmica y de combustión que este alcanzó, luego por medio de correlaciones de eficiencia se determinará la proximidad del quemador fabricado a un quemador comercial usando gas natural Vanti y a un quemador *sistema.bio* usando biogas.

### 7.1.Eficiencia térmica

Se determinó experimentalmente en cada una de las configuraciones de los quemadores al calentar un litro de agua desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición y se tuvieron en cuenta las pérdidas de calor, en los apéndices del *H* al *L* se registraron la temperatura inicial y de ebullición del agua, el volumen de gas consumido y el tiempo transcurrido en el cambio de fase, con la siguiente ecuación se determinó el flujo de gas durante el experimento, donde:

$V_1$ : volumen inicial de gas

$V_2$ : volumen final de gas

*t*: tiempo transcurrido en el cambio de fase

$\dot{V}_C$ : flujo de gas consumido en el cambio de fase

$$\dot{V}_C = \frac{V_2 - V_1}{t}$$

Figura 31. Contador de gas instalado a la salida de gas de los biodigestores



Nota. Se usó para el registro del volumen de biogás utilizado en las pruebas del quemador fabricado y del quemador sistema.bio. Tomado de: fotografía, granja villa Porkinos

Figura 32. Medición de la temperatura del agua calentada con biogás



Nota. Se usó un multímetro y una termocupla tipo k para registrar la temperatura inicial y final del agua y la temperatura de llama. Tomado de: fotografía granja villa Porkinos

### 7.1.1. Presión del Biogás

La presión de suministro de biogás se determinó con el siguiente arreglo de presiones del catálogo de quemadores atmosféricos (Amell et al., 1997) y con los datos en la tabla 35.

$$\frac{\dot{V}_{C_{Biogas}}^2}{\dot{V}_{C_{GN}}^2} = \frac{P_{Biogas} * D_{GN}}{P_{GN} * D_{Biogas}}$$

Tabla 34. Parámetros del arreglo de presiones

Concepto	Unidades	Valor
Flujo de biogás	m <sup>3</sup> /s	1,803E-04
Flujo de gas natural	m <sup>3</sup> /s	9,505E-05
Presión de suministro de gas natural	mbar	23
D <sub>GN</sub>	mm	0,8
D <sub>Biogas</sub>	mm	4

*Nota.* Los valores de esta tabla corresponden a los datos recolectados de la configuración del quemador comercial y del quemador sistema.bio de los Apéndices H y I Tomado de: elaboración propia.

$$P_{Biogas} = \frac{\dot{V}_{C_{Biogas}}^2 * P_{GN} * D_{Biogas}}{\dot{V}_{C_{GN}}^2 * D_{GN}}$$

$$P_{Biogas} = 413,73 [mbar] = 0,408 [atm]$$

Esta presión en comparación con la asumida inicialmente en la etapa de diseño es muy baja debido a que en el transcurso de la maguera hay ciertas perdidas de presión que no se habían asumido inicialmente

### 7.1.2. Perdidas de calor durante el desarrollo de las pruebas

Para determinar le eficacia térmica de las configuraciones de los quemadores se tuvieron en cuenta las pérdidas de calor y el lugar donde se desarrollaron las pruebas. Una vez recolectados los flujos de gas consumido y las temperaturas registradas en los apéndices del *H* al *L* se determina la eficiencia de los quemadores teniendo en cuenta la potencia suministrada por el combustible, y la potencia requerida que es la sumatoria de la potencia útil para el cambio de fase y las pérdidas de calor por (convección natural, radiación, gases de combustión, escape de vapor de agua)

#### Lugares:

Las pruebas de las confutaciones de los quemadores se realizaron en diferentes lugares los culés presentaban condiciones ambientales diferentes como presión atmosférica

y temperatura ambiente que impactan a los quemadores de diferente manera, estos lugares se designan de la siguiente manera:

- Laboratorio de Combustión: 1
- Laboratorio sistemas térmicos: 2
- Villa Porkinos 1er visita: 3
- Villa Porkinos 2da visita: 4

Tabla 35. Propiedades del aire a temperaturas de película de los lugares donde se realizaron las pruebas

Lugar	T <sub>amb</sub> °C	T <sub>s</sub> °C	T <sub>prom</sub> °C	ρ kg/m <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> kJ/kg*k	k w/m*k	α m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	μ kg/m*s	v m <sup>2</sup> /s	Pr
1	27,4	87,65	57,525	1,067	1,007	0,027898	2,596E-05	1,996E-05	1,871E-05	0,7208
2	24,9	87,65	56,275	1,071	1,007	0,027805	2,577E-05	1,991E-05	1,859E-05	0,7212
3	26,3	87,65	56,975	1,068	1,007	0,027857	2,587E-05	1,994E-05	1,866E-05	0,7209
4	24,9	88,72	56,81	1,694	1,007	0,027845	2,584E-05	1,994E-05	1,864E-05	0,7210

Nota. Estas son las propiedades del aire a 1 atm y a las temperaturas de cada lugar. Adaptado de: Tabla A-15 (Cengel, 2007)

A continuación, se calculan las pérdidas de la olleta por convección y radiación en los lugares mencionados anteriormente teniendo en cuenta que la emisividad de la olleta se asemeja a la de una superficie de aluminio anodizada debido a que se encontraba estropeada y a sus dimensiones, tabla A-18 (Cengel, 2007, p. 865).

$$\varepsilon = 0,8$$

$$D=15\text{cm}$$

$$L=25\text{cm}$$

Tabla 36. Perdidas de calor de la olleta al ambiente por convección natural y radiación.

Lugar	β [1/k]	Ra <sub>L</sub>	Gr <sub>L</sub> [Ra/Pr]	$D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}}$	Nu	h w/m2*°C	As [m2]	Q <sub>conv</sub> [kW]	Q <sub>rad</sub> [kW]
1	3,025E-03	5,75E+07	7,98E+07	0,0926	51,93	5,795	0,118	0,0411	0,0469
2	3,037E-03	6,10E+07	8,45E+07	0,0913	52,83	5,876	0,118	0,0434	0,0483
3	3,031E-03	5,90E+07	8,19E+07	0,092	52,32	5,830	0,118	0,0421	0,0475
4	3,032E-03	6,16E+07	8,54E+07	0,0910	52,98	5,901	0,118	0,0444	0,0494

Nota. Adaptado de: (Cengel, 2007, p.)

Tabla 37. *Perdidas de calor por vapor de agua*

Lugar	$\rho_{H_2O}$ kg/m <sup>3</sup>	$V1_{H_2O}$ m <sup>3</sup>	$V2_{H_2O}$ m <sup>3</sup>	$h_{fg@101,4}$ °C	$T_{vapor}$ s	$Q_{vapor}$ kW
1	997	0,001	0,00095	2252,66	60	1,872
2	997	0,001	0,00096	2252,66	60	1,497
3	997	0,001	0,00098	2252,66	90	0,499
4	997	0,001	0,00098	2252,66	90	0,499

Nota. Adaptado de: tabla A-15 (Cengel Yunes A, 2012, p.914)

### 7.1.2.1. Propiedades de la combustión con gas natural Vanti

Para determinar las pérdidas de calor por gases de combustión durante las pruebas en las configuraciones de los quemadores que usan gas natural es necesario conocer la relación de aire combustible y la densidad de la mezcla aire gas, las cuales se determinan a partir del análisis último del gas Vanti de la tabla 39, a continuación, se presentan el proceso para hallar dichas propiedades.

Tabla 38. *Análisis último del gas natural Vanti*

Componente	Composición	M	$n_i$	$n_i * M_i$
	%Vol/Vol	kg/kmol		kg/kmol
CH <sub>4</sub>	81,86	16	0,819	13,108
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	11,61	30	0,116	3,486
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,92	44	0,0192	0,845
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,23	58,12	0,0023	0,134
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,22	58,12	0,0022	0,128
N <sub>2</sub>	0,9	28	0,009	0,252
CO <sub>2</sub>	3,18	44	0,0318	1,400
Total	100	-	-	19,354

Nota. Adaptado de: (Vanti S.A. ESP., 2022)

### Reacción de combustión con aire estequiométrico y gas natural

Reactivos:  $\lambda = 1$ ;  $a_{th} = 2,095$

$$[0,819 * CH_4 + 0,116 * C_2H_6 + 0,0192 * C_3H_8 + 0,0023 * iC_4H_{10} + 0,0022 * nC_4H_{10} + 0,009 * N_2 + 0,0318 * CO_2] + \lambda * a_{th}[O_2 + 3,70N_2]$$

### Relación de arie combustible con aire estequiométrico

$$A/C = \frac{\lambda \cdot a_{th} \cdot M_{Aire\ seco}}{\sum N_i \cdot M_i}$$

$$A/C$$

$$= \frac{1 * 2,095 * 4,76 * 28,96}{0,819 * 16 + 0,116 * 30 + 0,0192 * 44 + 0,0023 * 58,12 + 0,0022 * 58,12 + 0,009 * 28 + 0,0318 * 44}$$

$$A/C = 16,88 [kg_{aire}/kg_{combustible}]$$

### Densidad de la mezcla aire-gas natural

$N_{GN}$ : número de moles de gas natural Vanti

$X_{GN}$ : fracción molar de gas natural

$N_{mixGN}$ : número de moles de la mezcla aire-gas natural

$M_{mixA/GN}$ : peso molecular de la mezcla aire-biogás

$\rho_{mixA/GN}$ : densidad de la mezcla aire-gas natural

$P_{Buc}$ : presión atmosférica de Bucaramanga

$$N_{aire} = \lambda * a_{th} * 4,76$$

$$N_{aire} = 1,2 * 2,095 * 4,76$$

$$N_{aire} = 11,97[kmol]$$

$$N_{GN} = \frac{N_{aire} * M_{aire}}{A/F_{GN} * M_{GN}}$$

$$N_{GN} = \frac{11,97[kmol] * 28,97[kg/kmol]}{16,31 * 19,38[kg/kmol]}$$

$$N_{GN} = 1[kmol]$$

$$N_{mixGN} = N_{aire} + N_{GN}$$

$$N_{mixGN} = 11,97 + 1$$

$$N_{mixGN} = 12,97 [kmol]$$

$$X_{GN} = N_{GN}/N_{mixGN}$$

$$X_{GN} = 1/12,97$$

$$X_{GN} = 0,07712$$

$$X_{aire} = N_{aire}/N_{mixGN}$$

$$X_{aire} = 11,87/12,87$$

$$X_{aire} = 0,9229$$

$$\rho_{mixA/GN} = \frac{P_{Buc} * M_{mixA/c}}{Ru * Tm}$$

$$\rho_{mixA/GN} = \frac{P_{Buc} * (X_{GN} * M_{GN} + X_{aire} * M_{aire})}{Ru * Tm}$$

$$\rho_{mixA/GN} = \frac{90,65[kpa] * (0,07712 * 19,38[kg/kmol] + 0,9229 * 28,96 [kmol])}{8,314[kJ/kmol * k] * 298k}$$

$$\rho_{mixA/GN} = 1,033 [kg/m^3]$$

Tabla 39. Coeficientes estequiométricos, calor específico y peso molecular de los productos de combustión del gas natural

Productos	$v_i$	$C_{Pi}$ kJ/kmol*k	$M_i$ kg/kmol	$v_i * C_{Pi}$ kJ/kmol*k	$v_i * M_i$ kg/kmol
CO2	1,158	57,983	44	67,144	50,952
H2O	2,429	46,599	18	113,189	43,722
O2	9,462	36,345	32	343,896	302,784
N2	0,3452	34,64	28	11,958	9,666
<b>Total</b>				<b>536,187</b>	<b>407,124</b>

Nota. Adaptado de: Tabla A-1 (Cengel Yunes A, 2012, p.908)

Una vez conocidos el calor específico de los productos de combustión, el flujo de masico de gas y la temperatura de los gases de combustión de cada una de las configuraciones de los quemadores se calculan las pérdidas de calor por gases de combustión de la siguiente manera y en la tabla 41 se registran.

$$\dot{m}_{gas} = \rho_{gas} * \dot{V}_{gas}$$

$$Q_{gases} = Cp_{gases} * m_{gases} * \Delta T$$

$$Q_{gases} = \frac{Cp_{gases}}{M_{gases}} * m_{gases} * \Delta T$$

Tabla 40. Perdidas de calor por gases de combustión en quemadores

N°	Quegador	A/F real	$\dot{V}_{gas}$ m <sup>3</sup> /s	$\rho_{gas}$ kg/m <sup>3</sup>	$\dot{m}_{gas}$ kg/s	$\dot{m}_{aire}$ kg/s	$\dot{m}_{gases}$ kg/s	T <sub>gases</sub> °C	T <sub>amb</sub> °C	Q <sub>gases</sub> kW
1	Comercial, GN, Inyector de 0,8mm	17,88	9,50E-05	0,7092	6,741E-05	1,205E-03	1,273E-03	609	27,4	0,975
2	Sistema.bio, biogás, Inyector de 4 mm	9,845	1,80E-04	0,9642	1,739E-04	1,712E-03	1,886E-03	745	26,4	1,955
3	Fabricado, GN, Inyector de 4mm	17,88	1,77E-03	0,7092	1,255E-03	2,244E-02	2,370E-02	800,16	27,4	24,116
4	Fabricado, GN, Inyector de 0,8mm	17,88	1,77E-04	0,7092	1,257E-04	2,247E-03	2,373E-03	556,53	27,4	1,653
5	Fabricado, biogás, Inyector de 4mm	9,845	3,38E-04	0,9642	3,254E-04	3,204E-03	3,529E-03	698,5	24,9	3,43

Nota. El flujo volumétrico y las temperaturas de los gases se obtiene de los apéndices del H al L. Tomado de: Elaboración propia

### 7.1.3. Eficiencia térmica de los quemadores con las distintas configuraciones

Con los datos recolectados en los apéndices del H al L y con las tablas de vapor de agua se obtienen las entalpías por unidad de masa correspondientes a las temperaturas  $T_i$  y  $T_f$ , con esto se calcula la diferencia de entalpías  $\Delta H$ , la potencia útil  $Pot_{util}$ , la potencia requerida  $Pot_{requer}$ , la potencia entregada por el combustible  $Pot_S$  y por ultimo la eficiencia del quemador, a continuación, se prestan el cálculo de la eficiencia térmica de las configuraciones de los quemadores las cuales se presentan en los apéndices del M al Q. (Abril et al., 1999, pp.87-90)

$$\Delta H = h_2 - h_1$$

$$Pot_{util} = \frac{\Delta H}{t}$$

$$Pot_{Requer} = Pot_{util} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{Vapor} + Q_{gases}$$

$$Pot_S = PCS * \dot{V}_C$$

$$\eta = \frac{Pot_{Requer}}{Pot_S}$$

$$\eta = \frac{Pot_{Util} + Q_{Conv} + Q_{rad} + Q_{gases} + Q_{vapor}}{Pot_S}$$

Una vez obtenidas la eficiencia térmica de las configuraciones de los quemadores se procede a hacer una comparación de su rendimiento por medio de una correlación de eficiencias térmicas las cuales se presentan en la tabla 42: (Van Wylen, 1999, pp. 542-544)

$$\eta_{correlacion} = \frac{\eta_{termica.configuración}}{\eta_{termica.configuracin}} * 100$$

Tabla 41. Correlación de eficiencias térmicas

Nº	Quegador	Eficiencia	Correlación	Valor correlación
1	Comercial, GN, inyector de 0,8mm	86,23%	3 entre 1	74,28%
2	Sistema bio, biogás, inyector de 4mm	78,46%	4 entre 1	40,46%
3	Fabricado, biogás, inyector de 4mm	64,1%	5 entre 1	60,68%
4	Fabricado, GN, inyector de 4mm	34,9%	3 entre 2	81,63%
5	Fabricado, GN, inyector de 0,8mm	52,3%	2 entre 1	90,99%

*Nota.* Se pueden observar la eficiencia térmica de las configuraciones y las correlaciones que se obtienen al dividir la eficiencia de las configuraciones del quemador fabricado entre los niveles de referencia. Tomado de: elaboración propia

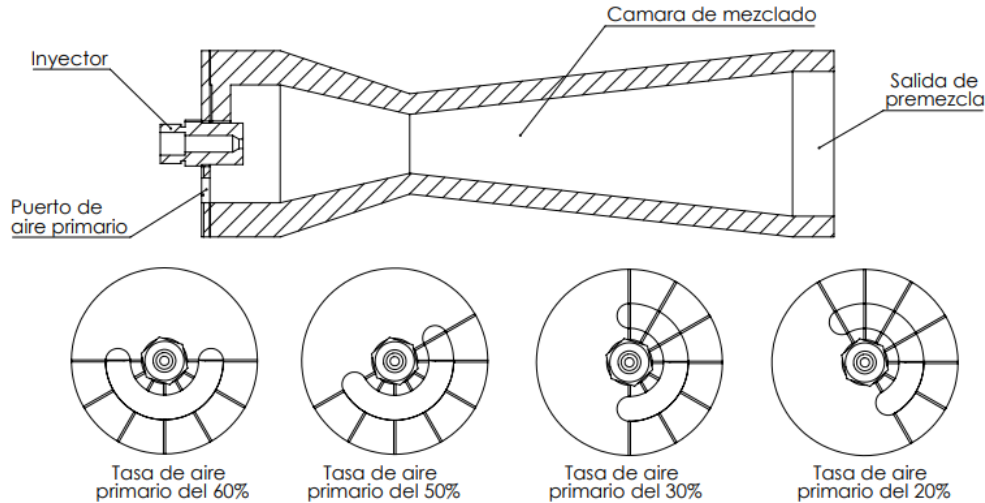
El desempeño del quemador fabricado utilizando biogás se aproxima más al del quemador *sistema.bio* debido a la similitud de sus configuraciones y que la aproximación al quemador comercial de GN es cercana lo que quiere decir que el quemador fabricado utilizando biogas puede ser usado en el evaporador para la generación de vapor, aunque requiera una mayor cantidad de biogas.

## 7.2.Eficiencia de la combustión del quemador fabricado

En la fase de diseño del quemador de biogás se utilizó la tasa de aire primario  $Ra$  para quemadores de gas natural la cual equivale al 60% de relación de aire-combustible teórica  $A/F_{Teorica}$ , pero esta tuvo que cambiarse al variar la apertura del puerto de aire primario en las diferentes configuraciones de los quemadores con el fin de obtener un flujo de aire adecuado y una combustión limpia con bajas emisiones de contaminantes la cual se obtenía

al tener una llama azul,(Amell et al., 1997, p.24) la variación del puerto de aire primario puede verse en la figura 37.

Figura 33. Entrada de gas y aire primario



Nota. Tomado de: Elaboración propia en SolidWorks

En la tabla 43 se registraron las dimensiones, parámetros de operación y el porcentaje de apertura del puerto de aireación primaria tal como se muestra en la figura 37.

$d_i$ : Diámetro inyector

$A_i$ : Área inyector

$D_{max}$ : Diámetro del mezclador del quemador

$A_{max}$ : Área del mezclador

$\rho_i$ : Densidad del gas

$A/F$ : Relación aire combustible teórica

$\rho_{A/F}$ : Densidad de la mezcla aire-combustible teórica

%Ra: Porcentaje de la tasa de aire primario

Ra: tasa de aire primario

Tabla 42. Dimensiones y parámetros de operación de los quemadores

N°	Quemador	$A_i$ m <sup>2</sup>	$D_{max}$ mm	$A_{max}$ m <sup>2</sup>	$\rho_i$ kg/m <sup>3</sup>	$A/F$ kg <sub>air</sub> /kg <sub>gas</sub>	$\rho_{A/F}$ Kg/m <sup>3</sup>	%Ra	Ra kg <sub>air</sub> /kg <sub>gas</sub>
1	Comercial, GN, inyector de 0,8mm	5,03E-07	25	4,91E-04	0,709	16,31	1,033	22,5	3,67

2	Sistema bio, biogás, inyector de 4mm	1,26E-05	22	3,80E-04	0,964	8,205	1,029	35	2,872
3	Fabricado, biogás, inyector de 4mm	1,26E-05	35	9,62E-04	0,964	8,205	1,029	50	4,103
4	Fabricado, GN, inyector de 4mm	1,26E-05	35	9,62E-04	0,709	16,31	1,033	20	3,262
5	Fabricado, GN, inyector de 0,8mm	5,03E-07	35	9,62E-04	0,709	16,31	1,033	20	3,262

*Nota.* Tomado de: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 42, y la medición de la velocidad del gas a la salida del inyector y de la mezcla aire-gas a la salida del mezclador que se midieron con un anemómetro, se procede a calcular la relación de aire combustible real  $A/F_{real}$  y la eficiencia de la combustión de las configuraciones de los quemadores, la relación de aire combustible real se obtiene al dividir la relación de flujos masicos aire-gas  $R$  entre la tasa de aire primaria obtenida anteriormente y la eficacia de la combustión se obtiene al dividir la relación de aire-combustible teórica entre la relación de aire real, (Amell et al., 1997) como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho * Vel * A \\ \dot{m}_{mix} &= \dot{m}_{biogas} + \dot{m}_a \\ R &= \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{gas}} \\ A/F_{real} &= \frac{R}{Ra} \\ \eta_{combustion} &= \frac{(A/F)_{ideal}}{(A/F)_{real efectiva}} * 100\end{aligned}$$

En los apéndices del  $R$  al  $V$  se encuentran los resultados de la eficiencia de combustión de las configuraciones de los quemadores, a continuación, se muestra en la tabla 44 la correlación de eficiencias de combustión para a obtener la aproximación del quemador fabricado respecto al quemador comercial usando gas natural Vanti y al quemador *sistema.bio* usando biogas. (Van Wylen, 1999, pp. 542-544)

$$\eta_{\text{correlacion}} = \frac{\eta_{\text{combustión.configuración}}}{\eta_{\text{combustión.configuración}}} * 100$$

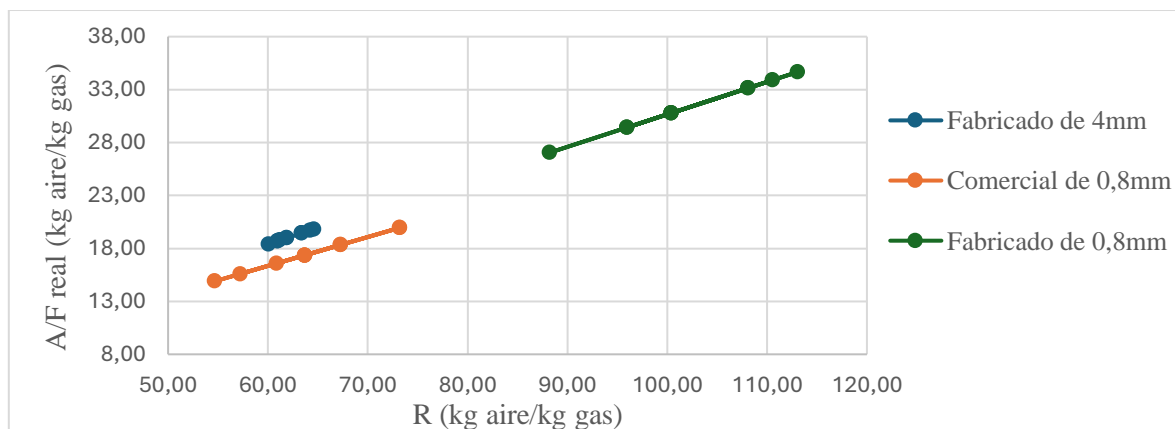
Tabla 43. Correlación de eficiencias de combustión.

N°	Quegador	Eficiencia	Correlación	Valor correlación
1	Fabricado, biogás, inyector de 4mm	81,75%	1 entre 4	87,34%
2	Fabricado, GN, inyector de 4mm	85,54%	2 entre 4	91,38%
3	Sistema bio, biogás, inyector de 4mm	90,40%	5 entre 4	55,96%
4	Comercial, GN, inyector de 0,8mm	93,60%	1 entre 3	90,43%
5	Fabricado, GN, inyector de 0,8mm	52,38%	3 entre 4	96,58%

Nota. Se pueden observar la eficiencia de la combustión de las configuraciones y las correlaciones que se obtienen al dividir la eficiencia de las configuraciones del quemador fabricado entre los niveles de referencia. Tomado de: elaboración propia

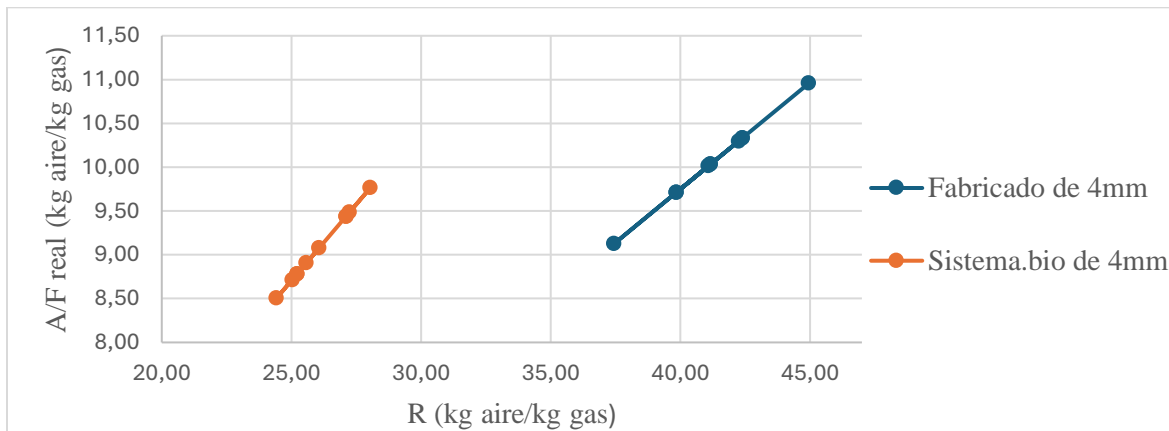
La eficiencia de las configuraciones resulto ser bastante alta lo que quiere decir que los resultados experimentales arrojaron relaciones de aire combustible efectivas bastante aproximadas a las ideales que se calcularon inicialmente para el biogás y el gas natural, esto se debe a que se utilizó un porcentaje de apertura del puerto de aire primario adecuado para cada configuración permitiendo así una buena premezcla de gas y aire primario para luego obtener una combustión limpia cuando se adicional el aire secundario.

Grafica 43. Comportamiento de la relación de caudales gas-aire VS la relación de aire real de quemadores usando GN Vanti



Nota. En las tres configuraciones podemos ver que el comportamiento de la relación es directamente proporcional. Tomado de: Elaboración propia

Grafica 44. Comportamiento de la relación de caudales gas-aire VS la relación de aire real de en quemadores usando biogás



Nota. Para estas configuraciones también se puede ver que el comportamiento de la relación es proporcional. Tomado de: Elaboración propia

En cuanto a las correlaciones podemos ver que el quemador fabricado tuvo una buena aproximación a los niveles de referencia cuando se usaba con los dos gases y el inyector de 4 mm lo que quiere decir que el quemador permite obtener una combustión baja en emisión de contaminantes siempre y cuando se ajuste de manera adecuada la tasa de aire primario.

Tabla 44. Información general del quemador fabricado

Parámetro	Unidades	Valor
Poder calorífico superior	MJ/m <sup>3</sup>	22,971
Poder calorífico inferior	MJ/m <sup>3</sup>	22,753
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	0,9642
Densidad relativa	-	0,745
Índice de Wobbe superior	MJ/m <sup>3</sup>	26,613
Índice de Wobbe inferior	MJ/m <sup>3</sup>	26,361
Clasificación	Norma NTC 3527	1° Familia, Grupo a
Presión de suministro	kPa	413,73
Flujo consumido	m <sup>3</sup> /h	1,2168
Temperatura de llama	C°	730,2
A/F	Kg aire / kg gas	8,205
Tasa de aire primario	m <sup>3</sup> aire / m <sup>3</sup> gas	4,1025

Inyector	mm	4
Cantidad de puertos	-	40
Eficiencia térmica	%	66,7
Eficiencia combustión	%	81,75%

*Nota.* Tomado de: Elaboración propia

En la figura 38 se puede observar que la llama es menos intensa cuando se utiliza gas natural que cuando se usa biogás, debido a que su configuración consta de una baja presión y un diámetro del inyector que es pequeño en comparación con los puertos de la llama, en ambos casos se evidencia un color azul de la llama, lo que demuestra que se ajustó adecuadamente la relación de aire combustible por lo que se asume una combustión limpia y completa. En ambos casos no se evidencia retro llama ni desprendimiento de llama por lo que quiere decir que flujo de llama es estable.

*Figura 34. Quemador fabricado usando a la derecha gas natural y a la izquierda biogás*



*Nota.* Tomado de: fotografías, laboratorio de combustión y granja villa Porkinos

## 8. Costos del prototipo

Durante el desarrollo del proyecto se incurrieron en diversos costos, los cuales incluyen la fabricación del quemador y el manómetro en U, la compra de accesorios para su instalación, el transporte hacia la granja para realizar las pruebas de funcionamiento y otros imprevistos., junto con cualquier gasto adicional derivado de contratiempos durante la ejecución del proyecto. A continuación, se presentan los costos detallados en las siguientes tablas.

*Tabla 45. Costos de materiales del quemador*

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Sub total</b>
Barra de 2"x18cm AISI 1020	1	\$ 20.000	\$ 20.000
Tubo Schedule 80 de 6"x5,5cm Acero al carbono	1	\$ 10.000	\$ 10.000
Tubo Schedule 80 de 2"x6,7cm Acero al carbono	1	\$ 8.000	\$ 8.000
Láminas de 15x15x2 cm Acero al carbono	2	\$ 10.000	\$ 20.000
Lámina de 5x5x0,2 cm Acero al carbono	1	\$ 5.000	\$ 5.000
Válvula de estufa Humcar	1	\$ 8.000	\$ 8.000
Inyector de gas	2	\$ 2.000	\$ 4.000
Broca de 4mm	1	\$ 3.000	\$ 3.000
Quemador de gas natural	1	\$30.000	\$30.000
<b>Total</b>	-	-	<b>\$108.000</b>

*Tabla 46. Costo de accesorios de instalación*

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Sub total</b>
Acople de acero inoxidable de 3/4" para manguera	2	\$ 9.000	\$ 18.000
Manguera transparente de 3/4" de 3m	1	\$ 9.000	\$ 9.000
Te inoxidable roscada de 3/4"	1	\$ 12.000	\$ 12.000
Buje inoxidable roscado de 3/4" a 1/2"	1	\$ 7.000	\$ 7.000
Manómetro de caratula	1	\$ 15.000	\$ 15.000
Abrazaderas inoxidables de 3/4"	2	\$ 2.000	\$ 4.000
<b>Total</b>	-	-	<b>\$ 65.000</b>

Tabla 47. Costos de materiales del manómetro en U

Material	Cantidad	Valor Unitario	Sub total
Tubo cuadrado de 15x15 mm de 2m	1	\$20.000	\$20.000
Manguera transparente de ¼" de 2m	1	\$ 5.000	\$ 5.000
Amarres plásticos	10	\$ 200	\$ 2.000
Acoples pasticos de 1"	2	\$ 2.000	\$ 4.000
Tapón plástico de 2"	2	\$ 4.000	\$ 8.000
<b>Total</b>	-	-	<b>\$39.000</b>

Tabla 48. Transporte granja villa Porkinos

Concepto	Cantidad	Valor Unitario	Sub total
Bus Bucaramanga-Lebrija, ida y vuelta	8	\$2.800	\$ 22.400
Bus Lebrija-Villa Porkinos, ida y vuelta	8	\$ 4.000	\$ 36.000
Automóvil UIS- Villa Porkinos, ida y vuelta	1	\$ 40.000	\$40.000
<b>Total</b>	-	-	<b>\$ 98.000</b>

Tabla 49. Costos totales

Concepto	Sub total
Materiales del quemador	\$108.000
Materiales manómetro de caratula	\$ 65.000
Materiales manómetro en U	\$ 39.000
Transporte a villa Porkinos	\$ 98.000
<b>Total</b>	<b>\$ 310.000</b>

## 9. Conclusiones

- De la revisión bibliográfica y la cromatográfica del biogás se determinó que el biogás de la granja presentaba una excelente concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ) del 71%, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del 28%, y una baja presencia de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) del 0,7% y agua del 0,3%. Este resultado se debe a que en la granja se implementan procesos de filtrado a la salida de los biodigestores y a lo largo de la línea de gas, lo que permite reducir la presencia de contaminantes.
- Con el análisis de combustión a condiciones ambientales de Lebrija se obtuvo la relación aire-combustible ideal, el poder calorífico superior e inferior, las temperaturas estimadas de llama adiabática y de los gases de combustión, así como la clasificación del biogás según la norma NTC 3527 en el grupo A de la 1° familia.
- A partir del análisis de los parámetros de funcionamiento del evaporador pirotubular, se determinaron el calor útil necesario para el cambio de fase de agua a vapor y las pérdidas de calor por convección natural, radiación y gases de combustión. Con estos valores y considerando las propiedades del biogás, se realizó un balance de energía para calcular los flujos máxicos teóricos de biogás, aire y gases de combustión, así como el calor total requerido para la generación de vapor, obteniendo  $1,976\text{E}-04$  kg/s,  $1,946\text{E}-03$  kg/s y 4,713 kW, respectivamente.
- En el diseño conceptual, se plantearon los requerimientos del quemador teniendo en cuenta las características que este debía tener, las propiedades del biogás y los parámetros de operación del evaporador y por medio de una matriz QFD se identificaron los criterios más influyentes. A partir de estos, se desarrollaron tres alternativas de quemadores, las cuales fueron evaluadas mediante una matriz Pugh, lo que llevó a la elección del quemador atmosférico de premezcla como diseño.
- Para el dimensionamiento del quemador se tuvieron cuenta una tasa de aire primario equivalente al 60% de la relación de aire combustible teórica y 40 puertos de llama, lo que permitió obtener las dimensiones de los elementos que componen al quemador de los cuales resalta el diámetro del inyector que fue de 2,135 mm, posteriormente se realizaron los planos de fabricación, en la cual se utilizó como material

acero 1020, el puerto de aire primario se fabricó de tal manera de que fuera modulante para variar el ingreso de aire primario a la cámara de mezclado.

- Se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento con biogás y gas natural y se determinó que el inyector de 2 mm no era adecuado para biogás, ya que generaba una combustión de llama amarilla con altas emisiones de contaminantes. Por ello, se aumentó su diámetro a 4 mm, logrando una combustión más limpia con una llama azul. Para gas natural, se seleccionaron inyectores de 4 mm y 0,8 mm, permitiendo una combustión adecuada, en cuanto a las tasas de aire primario se obtuvieron 50 % de la relación aire-biogás teórica y del 20 % para la relación aire-gas natural teórica.
- Con las correlaciones de eficiencias térmicas se concluyó que el quemador fabricado usando biogás puede usarse para la generación de vapor debido a que presentó una aproximación del 74,28% a la eficiencia térmica del quemador comercial de gas natural, pero requiere el doble de biogás
- La eficiencia de combustión en las configuraciones fue alta, lo que indica que las relaciones aire-combustible obtenidas experimentalmente fueron muy cercanas a las calculadas. Esto se logró gracias a un ajuste adecuado en la apertura del puerto de aire primario, permitiendo una óptima premezcla de gas y aire. Como resultado, al incorporar el aire secundario, se obtiene una combustión limpia y eficiente. En cuanto a las correlaciones, se observó que el quemador fabricado presentó una buena aproximación a los niveles de referencia al operar con ambos gases. Esto indica que el quemador puede lograr una combustión baja en emisión de contaminantes, siempre que se ajuste correctamente la tasa de aire primario.

## Bibliografía

- Abril, J., Rodríguez, J., & Quiroga, J. (1999). *Banco de quemadores atmosféricos de gas natural*. Universidad Industrial de Santander.
- Amell, A., Barraza, L., & Gómez, E. (1997). *Tecnología de la combustión de los gases parte 3 quemadores atmosféricos de premezcla*. <https://es.scribd.com/document/73707395/3-Quemadores-Atmosfericos-1>
- Ariza, H., & Medina, D. (2025). *Valorización del Digerido Producido en la Digestión Anaeróbica de los Residuos Agroindustriales de una Granja Porcícola para el Mejoramiento del Cultivo de Pasto de Corte Taiwán*. Universidad Industrial de Santander.
- Bosch Colombia, Empresas públicas de Medellín, Gas natural S.A. E.S.P., Incelt S.A., Indusel S.A., Lee co accesorios, Serviconfort Colombia, & Sudelec S.A. (2004). *Norma técnica colombiana NTC 3527 gases de ensayo, presiones de ensayo, y categorías de los artefactos a gas*. <https://dokumen.site/download/norma-ntc-3527-a5b39ef8d7a6ee>
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque practico* / (Mexico McGraw-Hill Interamericana, Ed.; 3rd ed.). [https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS\\_INST/1f3hrt6/alma991000261209707671](https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS_INST/1f3hrt6/alma991000261209707671)
- Cengel Yunes A, & B. M. A. (2012). *Termodinámica* (McGraw-Hill, Ed.; 7 ed.). [https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS\\_INST/1f3hrt6/alma991000509409707671](https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS_INST/1f3hrt6/alma991000509409707671)
- Ciencia y datos.org. (2024). *Mechero de bunsen: Partes, usos y tipos*. <https://cienciaydatos.org/ciencia/instrumentacion/mechero-bunsen-principio-partes-tipos-procedimiento-usos/>
- Concepto. (2022). *Vapor de Agua - Concepto, usos, importancia y ebullición*. <https://Concepto.de/Vapor-de-Agua/>.
- EQA Saic. (2013). *Descargas Quemadores Industriales | EQA*. <https://Eqa.Com.Ar/Descargas-Quem/#toggle-Id-5>. <https://eqa.com.ar/descargas-quem/#toggle-id-5>
- Alcaldía de Lebrija. (2024). *Información del Municipio de Lebrija*. <https://www.lebrija-santander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx#:~:text=Su%20temperatura%20var%C3%ADA%20entre%20los,en%20la%20mesa%20de%20Lebrija.>
- Hernández, A., & García, A. (2008). *Especificaciones técnicas CONAIF-SEDIGAS para la certificación de instaladores de gas. Materias comunes Tipos A, B y C Parte 8. Quemadores Parte 8 Quemadores*. <https://www.conaifsedigas.es/page/especificaciones-tecnicas>
- Iguarán, O., Martínez, D., & Gélvez, O. (2008). *Diseño y construcción de una mini caldera piro-tubular para el laboratorio de transferencia de calor* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/20792>

- Kapoor, R., Ghosh, P., Tyagi, B., Vijay, V. K., Vijay, V., Thakur, I. S., Kamyab, H., Nguyen, D. D., & Kumar, A. (2020). Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052>
- Labbox. (2024). *Mecheros bunsen y de alcohol*. <https://Labbox.Es/Categoria/Laboratorio-General/Termostatizacion-Combustion-y-Calcinacion/Mecheros-Bunsen-y-de-Alcohol/>. <https://labbox.es/categoria/laboratorio-general/termostatizacion-combustion-y-calcinacion/mecheros-bunsen-y-de-alcohol/>
- Mantenimientos Rey. (2020). *El quemador en una caldera. ¿Qué es? ¿Para qué sirve? ¿Cómo funciona? - Mantenimientos Rey*. <https://Www.Mantenimientosrey.Com/Quemador-Una-Caldera-Sirve-Funciona/>.
- Maradey Charris, J. F. (2002). *Termodinámica aplicada* (Universidad Industrial de Santander, Ed.). [https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS\\_INST/1f3hrt6/alma991000557659707671](https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS_INST/1f3hrt6/alma991000557659707671)
- Ministerio de vivienda. (2021). *Ficha técnica gestión del biogás. Anexo No.4 Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico-RAS Título E- Tratamiento de aguas residuales*. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-4-ficha-tecnica-gestion-del-biogas.pdf>
- Morillo, Y. (2021). *Biogás | Qué es, cómo se produce, usos, ventajas y desventajas*. <https://Futuroelectrico.Com/Biogas/>.
- Osejos, M., Jaramillo, J., Quimis, A., & Alcívar, J. (2018). *Granja EMAVIMA Jipijapa-Ecuador Production of biogas with pig manure from a biodigester at the EMAVIMA Jipijapa Farm-Ecuador*. <https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2018.vol.4.n.1.709-733>
- Patiño, F., Chacón, J., Jaramillo, J., & Castellanos, J. (2021). *Adaptación y evaluación del desempeño de un generador eléctrico utilizando biogás como combustible*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42009>
- Pineda Alejandra. (2021). *Sistema.bio: no hay desechos, solo recursos - Disruptivo.tv - Emprendimiento social, startups e innovación social*. <https://Disruptivo.Tv/Columnas-y-Notas/Sistema-Bio-No-Hay-Desechos-Solo-Recursos/>.
- Ruiz, F., Torres, S., Rodríguez, R., & Botero, M. (2019). *Clasificación de tecnologías de micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/13411>
- Ruiz Hernández, F., Fabián, S., & Duarte, T. (2019). *CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS | 1 Clasificación de tecnologías de micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás*.
- Sanchis, J. C. (2020). *Los combustibles sólidos y líquidos en las calderas industriales - Calderasformación*. <https://Www.Calderasformacion.Com/Los-Combustibles-Solidos-y-Liquidos-En-Las-Caldera-Industriales/>.
- Sidartha, Z., Mendoza, J., Gonzales, S., Kaiser, F., & Gebaure, A. (2020). *Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Porkcolombia – Fondo Nacional de la Porcicultura, Eds.).

[https://porkcolombia.co/sostenibilidad\\_y\\_r\\_s/guia-de-biogas-para-el-sector-porcicola-colombiano/](https://porkcolombia.co/sostenibilidad_y_r_s/guia-de-biogas-para-el-sector-porcicola-colombiano/)

Sierra, Á., Rodrate, L., Severino, V., Utrera, F., Itza, M., Luna, J., Rodríguez, J., Campos, H., Salgado, A., & Rodríguez, F. (2023). *Memorias del 2do congreso iberoamericano en ciencias veterinarias y bienestar animal*.

<https://veterinaria.buap.mx/sites/default/files/MEMORIAS%20IBEROAMERICANO%20TRAJOS%20CORTAS%202023.pdf>

Sistema.bio. (2020). *Catálogo de biodigestores*. <https://sistema.bio/nuestro-catalogo/>

Turns, S. R. (2000). *An introduction to combustion: concepts and applications* (McGraw-Hill., Ed.; 3a edición).

[https://uis.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?context=L&vid=57UIDS\\_INST:UIDS&search\\_scope=MyInst\\_and\\_CI&tab=Everything&docid=alma991001048069707671](https://uis.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay?context=L&vid=57UIDS_INST:UIDS&search_scope=MyInst_and_CI&tab=Everything&docid=alma991001048069707671)

Van Wylen, Gordon. J., & S. Richard. E. (1999). *Fundamentos de termodinámica* (Limusa, Ed.; Segunda).

[https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS\\_INST/1f3hrt6/alma991000373849707671](https://uis.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57UIDS_INST/1f3hrt6/alma991000373849707671)

Vanti S.A. ESP. (2022). *Composición típica del gas natural*.

<https://www.grupovanti.com/conocenos/quienes-somos/sobre-el-gas-natural>

Vanti S.A ESP. (2022). *Resolución CREG 071 de 1999 (V) Gas natural Vanti*.

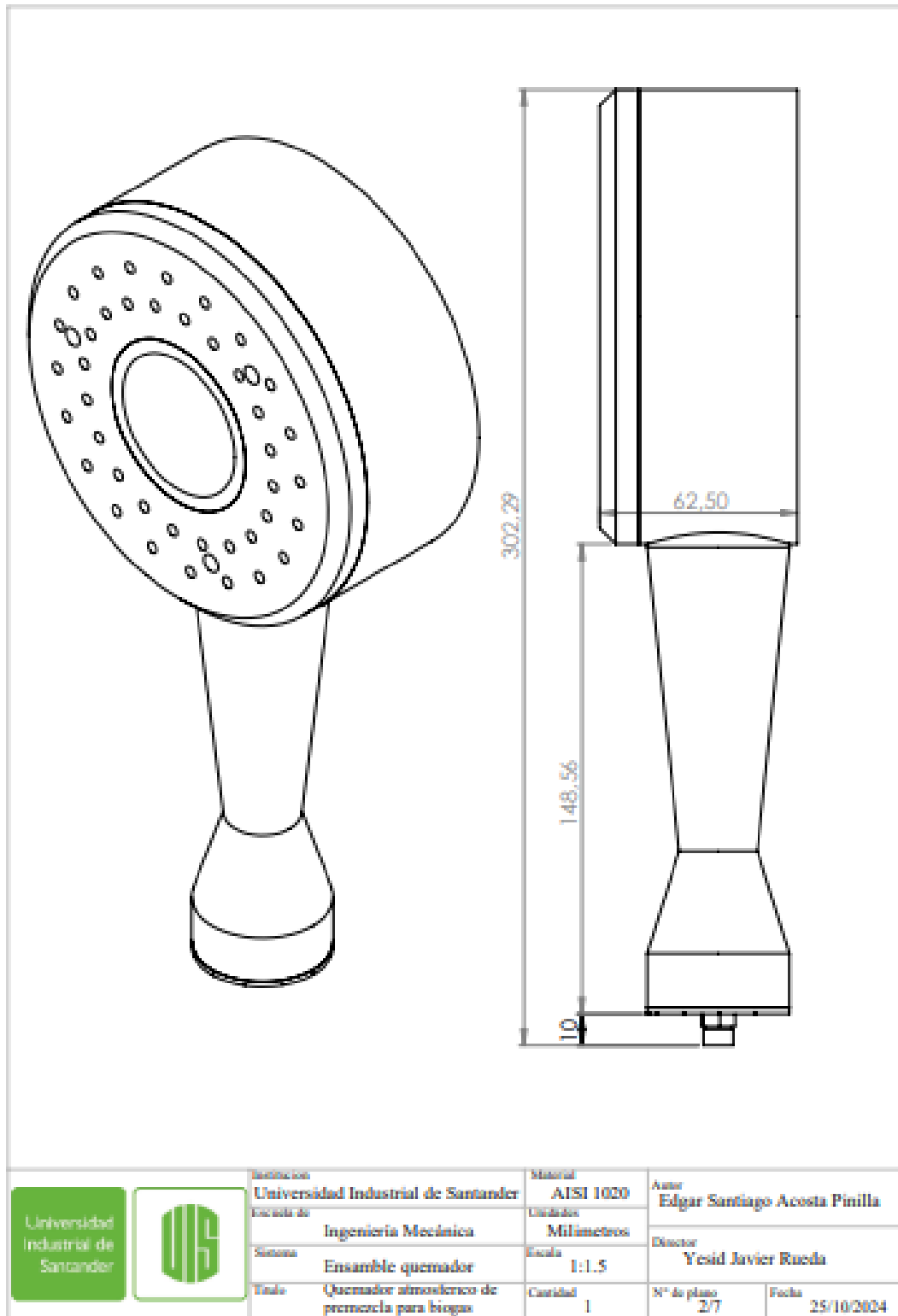
[https://regimenjuridico.grupovanti.com/ver\\_leyes.php?id=84](https://regimenjuridico.grupovanti.com/ver_leyes.php?id=84)

## Apéndices

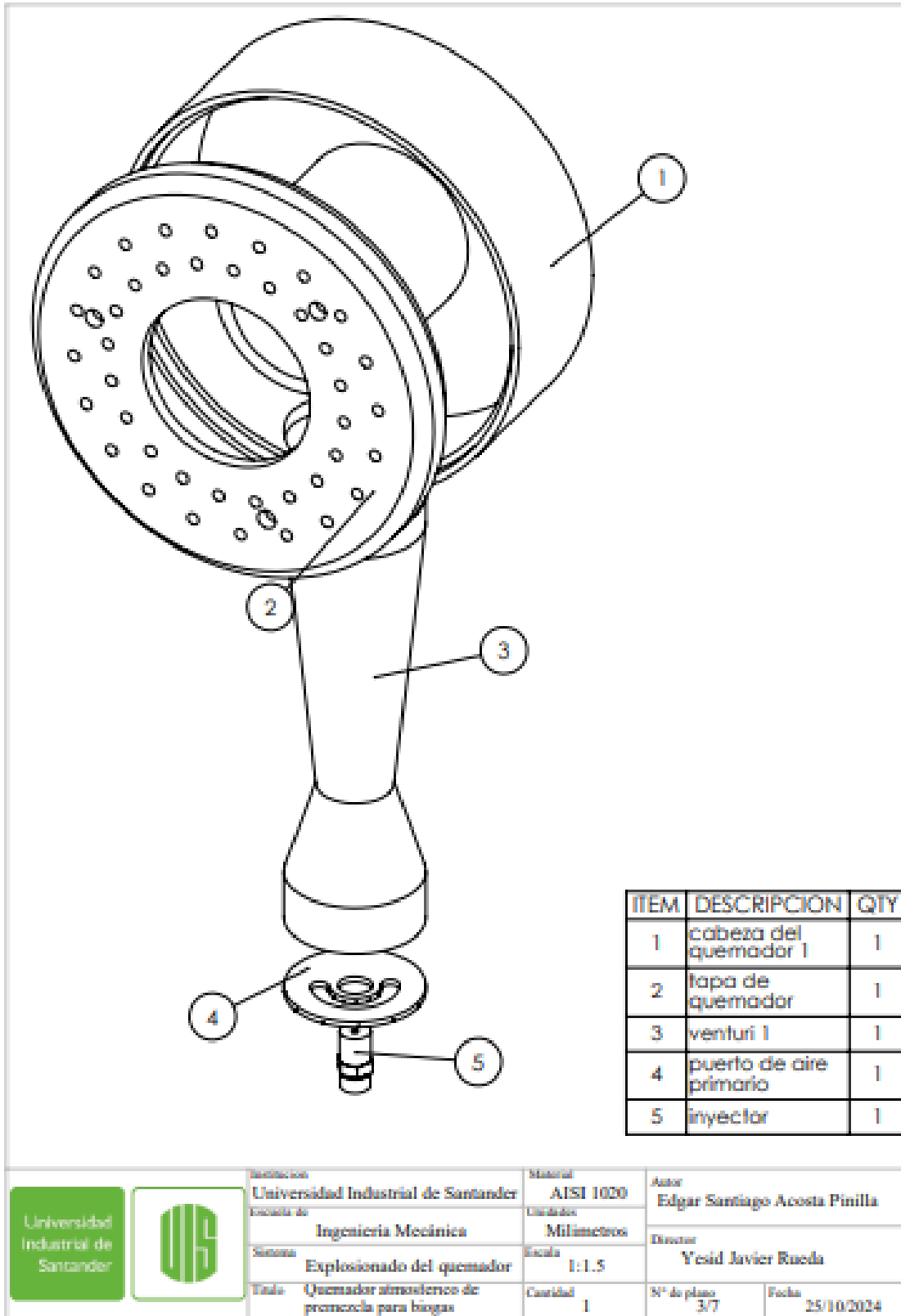
### Apéndice A. Ensamble quemador en SolidWorks



Apéndice B. Dimensiones generales del quemador



Apéndice C. Vista explosionada del quemador



ITEM	DESCRIPCION	QTY
1	cabeza del quemador 1	1
2	tapa de quemador	1
3	venturi 1	1
4	puerto de aire primario	1
5	inyector	1

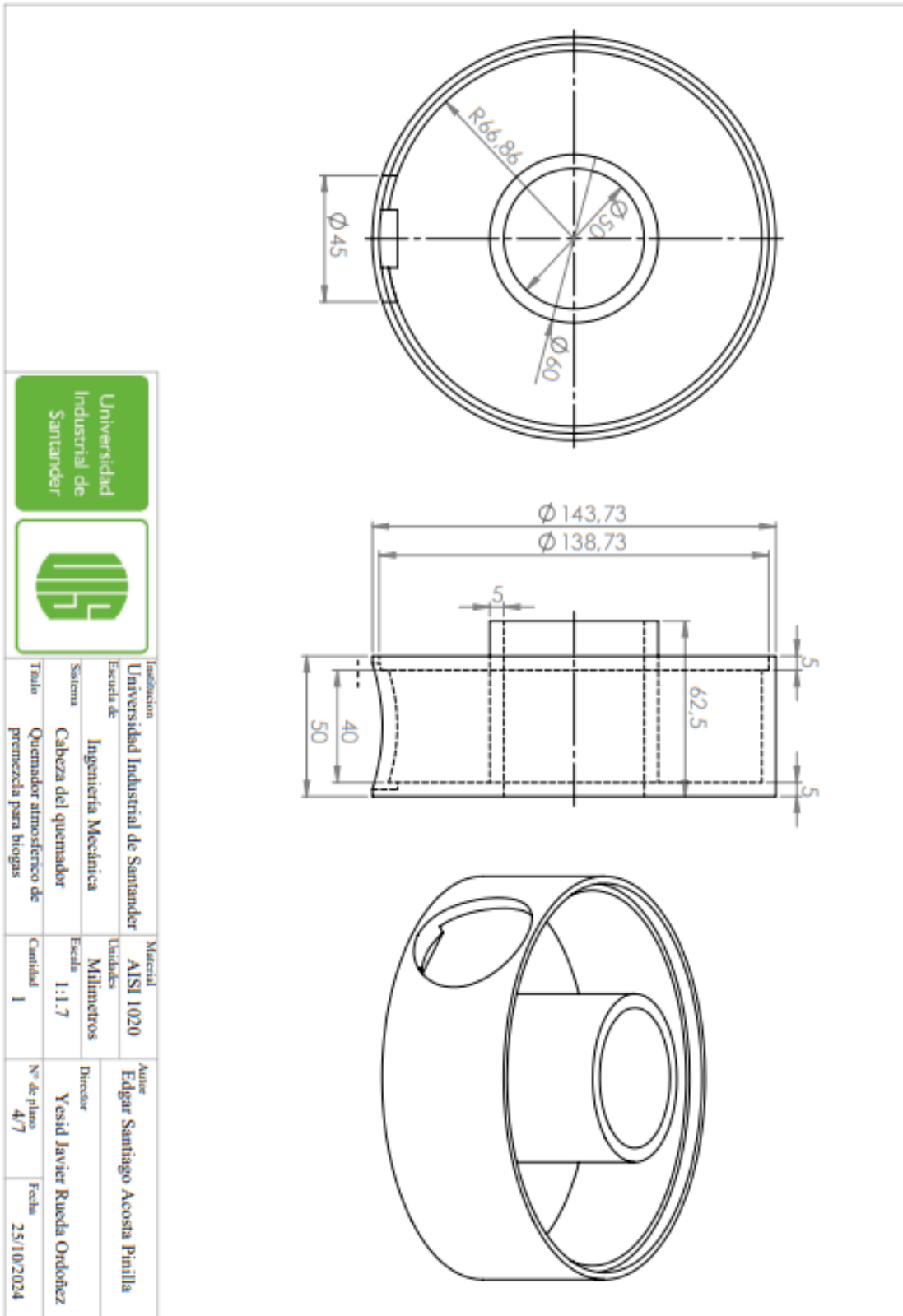


Institución	Universidad Industrial de Santander
Facultad	Ingeniería Mecánica
Sistema	Explosionado del quemador
Título	Quemador atmosférico de premezcla para biogás

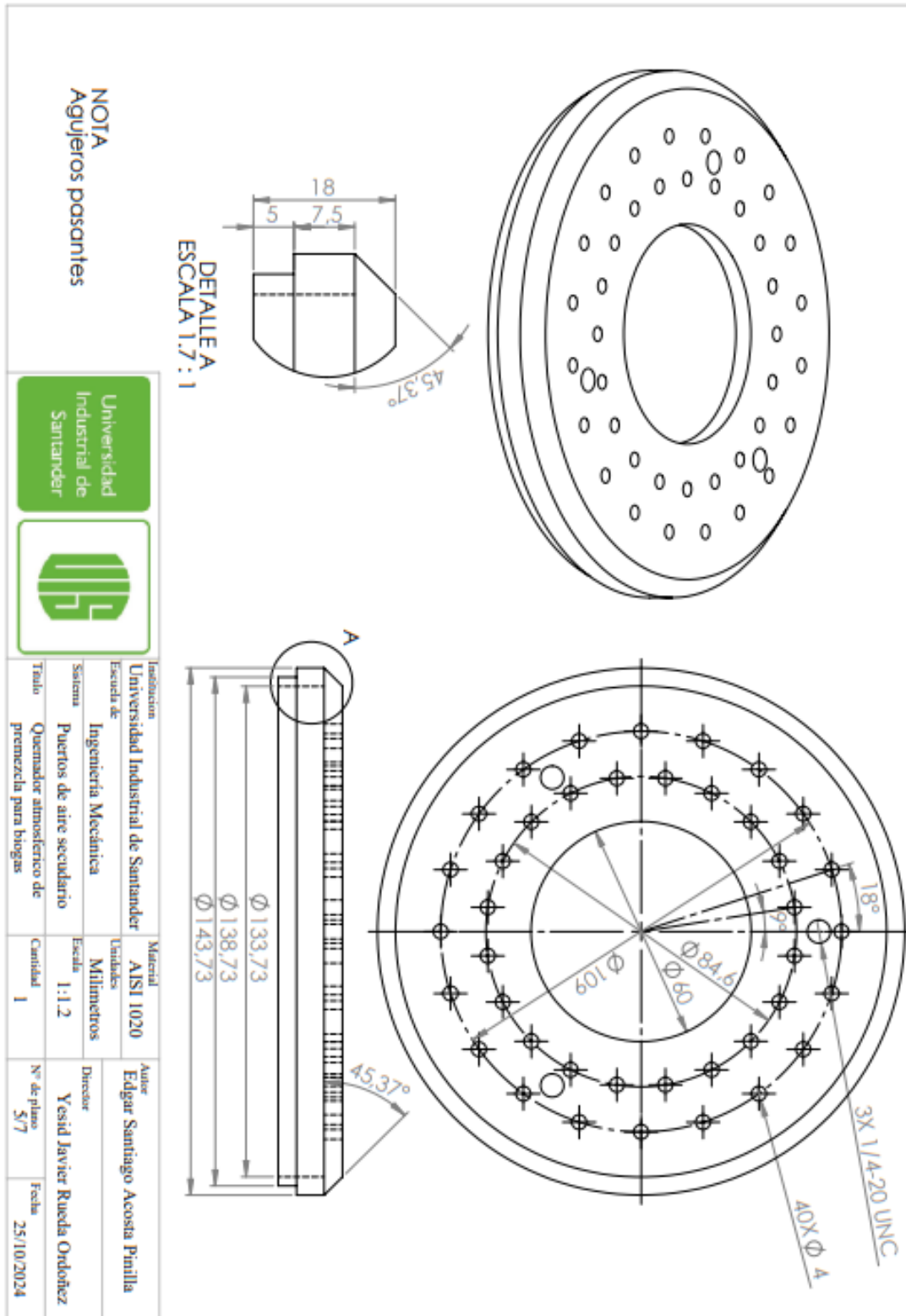
Material	AISI 1020
Unidades	Milímetros
Escala	1:1.5
Cantidad	1

Autor	Edgar Santiago Acosta Pinilla	
Director	Yesid Javier Rueda	
Nº de plano	3/7	Fecha
		25/10/2024

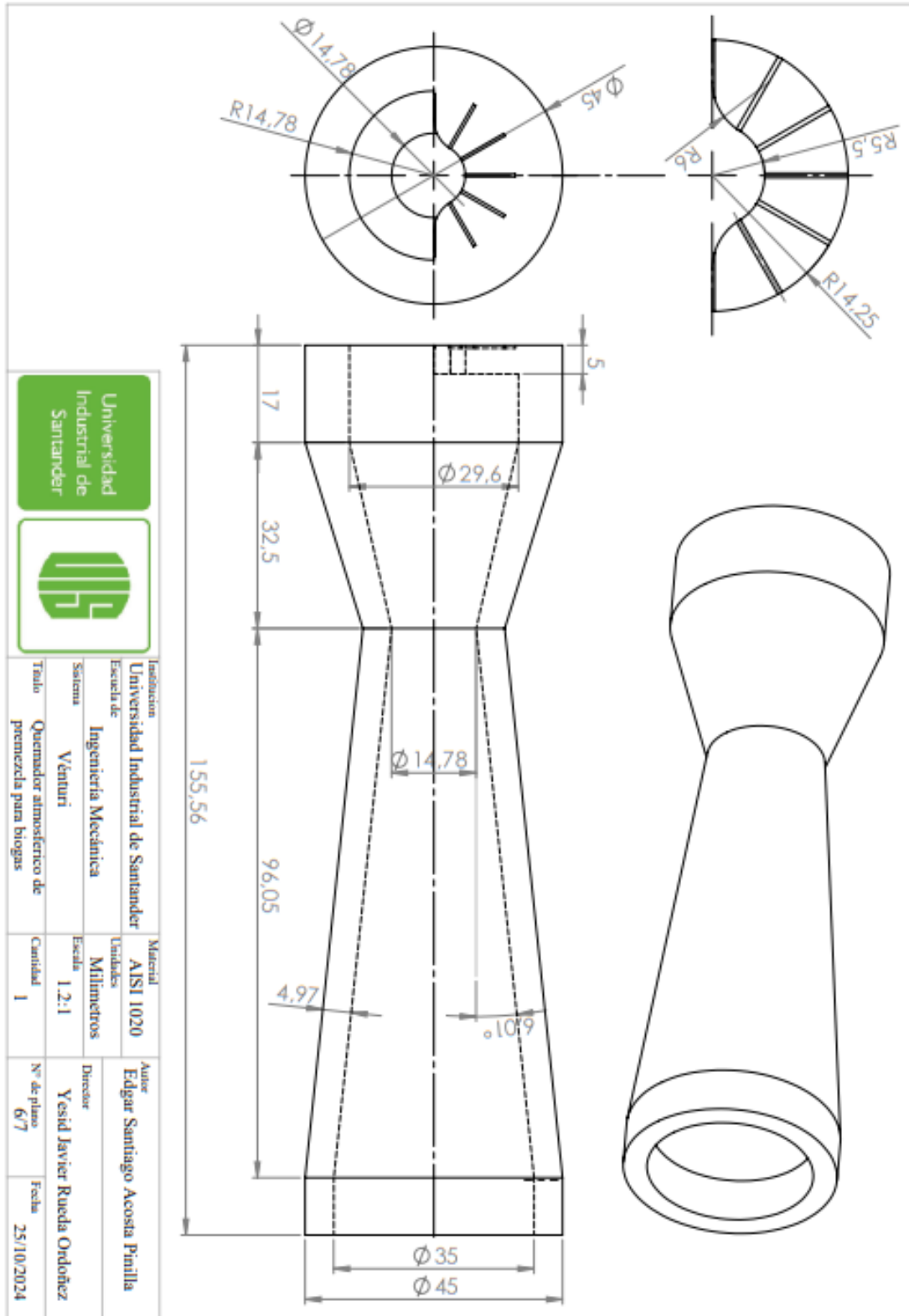
Apéndice D. Cabeza del quemador



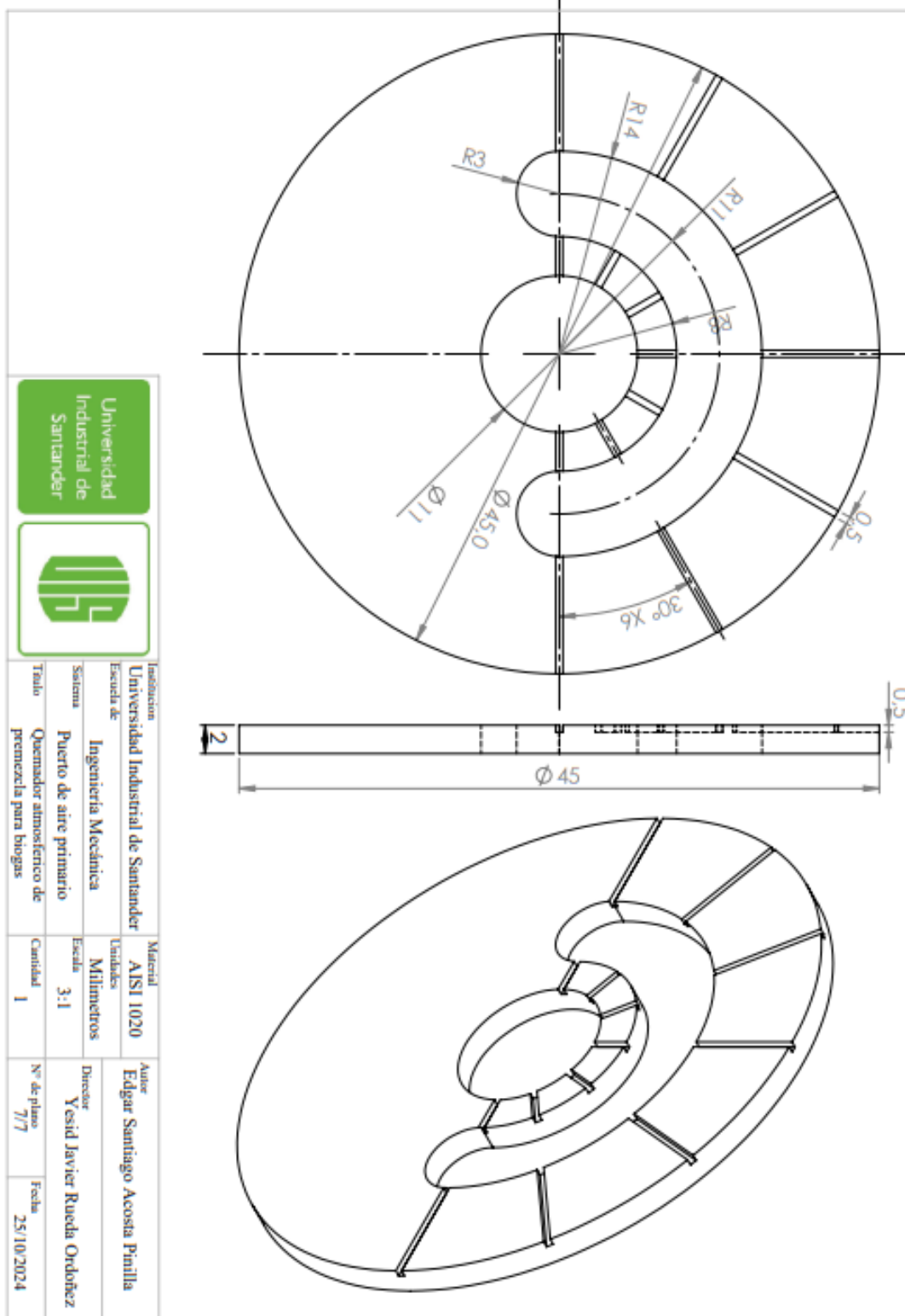
Apéndice E. Puerto de aire secundario



Apéndice F. Venturi de la cámara de mezclado



Apéndice G. Puerto de aire primario



*Apéndice H. Flujo de volumétrico de gas natural Vanti en la configuración del quemador comercial usando un inyector de 0,8 mm, en el laboratorio de sistemas térmicos*

<b>Pe (mbar)</b>	<b><math>\forall_1</math> (m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\forall_2</math> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>t (s)</b>	<b>Ti (°C)</b>	<b>Tf (°C)</b>	<b><math>\dot{\forall}_C</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b><math>\dot{\forall}_{C\text{ prom}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>
23	0,919	0,964	480	23	90,7	9,38E-05	
23	0,964	1,01	467	22,8	91,8	9,85E-05	
23	0,01	0,054	485	23	90,2	9,07E-05	
23	0,054	0,1	475	23,1	91,4	9,68E-05	
23	0,1	0,145	482	22,8	90,1	9,34E-05	9,505E-05
23	0,145	0,191	478	23	91,5	9,62E-05	
23	0,191	0,235	465	23,1	91,6	9,46E-05	
23	0,235	0,28	468	23	90,8	9,62E-05	
23	0,28	0,326	472	22,8	91,8	9,75E-05	
23	0,326	0,37	474	23	90,3	9,28E-05	

*Nota.* Presión de entrada, volumen inicial y final de gas, temperatura inicial y final, tiempo transcurrido durante la prueba. Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice I. Flujo de volumétrico de biogás en la configuración del quemador sistema.bio, usando un inyector de 4 mm, en la granja Villa Porkinos*

<b>Pe (mbar)</b>	<b><math>\forall_1</math> (m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\forall_2</math> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>t (s)</b>	<b>Ti (°C)</b>	<b>Tf (°C)</b>	<b><math>\dot{\forall}_C</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b><math>\dot{\forall}_{C\text{ prom}}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>
413,03	0,037	0,107	390	26,1	89,7	1,79E-04	
413,03	0,107	0,178	391	26,1	90,3	1,82E-04	
413,03	0,178	0,245	396	25,8	90,1	1,69 E-04	
413,03	0,19	0,254	389	26,7	89,7	1,65 E-04	
413,03	0,254	0,321	382	26,8	90,7	1,75 E-04	1,803E-04
413,03	0,321	0,391	380	26,6	91,2	1,84 E-04	
413,03	0,391	0,465	385	26,3	90,5	1,92 E-04	
413,03	0,465	0,544	382	26,3	89,5	2,07 E-04	
413,03	0,544	0,611	377	26,4	91,2	1,78 E-04	
413,03	0,611	0,677	383	26,4	89,6	1,72 E-04	

*Nota.* Presión de entrada, volumen inicial y final de gas, temperatura inicial y final, tiempo transcurrido durante la prueba Fuente: Elaboración propia

*Apéndice J. Flujo de volumétrico de gas natural Vanti en la configuración del quemador fabricado usando un inyector de 4 mm en el laboratorio de combustión*

<b>Pe</b> <b>(mbar)</b>	<b>V<sub>1</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>2</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>t</b> <b>(s)</b>	<b>Ti</b> <b>(°C)</b>	<b>T<sub>f</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>Ḃ<sub>C</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Ḃ<sub>C</sub> prom</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>
23	0,07	0,76	306	26,5	92,9	2,25E-03	
23	0,76	1,7	320	26,6	91	2,94E-03	
23	0,7	1,5	315	26,8	93	2,54E-03	
23	0,2	0,65	309	26,3	94,2	1,46E-03	
23	0,65	0,96	310	26,8	94,1	1,00E-03	1,77E-03
23	0,96	1,39	293	26,3	93	1,47E-03	
23	0,39	0,75	289	26,9	92,8	1,25E-03	
23	0,75	1,2	281	26,5	93,3	1,60E-03	
23	0,2	0,65	285	26,7	93,1	1,58E-03	
23	0,65	1,12	291	26,5	92,9	1,62E-03	

*Nota.* Presión de entrada, volumen inicial y final de gas, temperatura inicial y final, tiempo transcurrido durante la prueba, Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice K. Flujo de volumétrico de gas natural Vanti en la configuración del quemador fabricado usando un inyector de 0,8 mm en el laboratorio de combustión*

<b>Pe</b> <b>(mbar)</b>	<b>V<sub>1</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>2</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>t</b> <b>(s)</b>	<b>Ti</b> <b>(°C)</b>	<b>T<sub>f</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>Ḃ<sub>C</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Ḃ<sub>C</sub> prom</b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>
23	0,62	0,77	806	27,1	91,2	1,86E-04	
23	0,77	0,9	869	26,8	90,9	1,50E-04	
23	0,9	1,09	850	27,1	90,9	2,24E-04	
23	0,09	0,23	878	26,5	91	1,59E-04	
23	0,23	0,4	910	27	90,1	1,87E-04	1,772E-04
23	0,4	0,55	858	26,5	90,5	1,75E-04	
23	0,55	0,7	869	26,7	91	1,73E-04	
23	0,7	0,86	863	26,5	91,1	1,85E-04	
23	0,86	1,01	870	26,1	90,9	1,72E-04	
23	0,01	0,15	868	25,8	90,8	1,61E-04	

*Nota.* Presión de entrada, volumen inicial y final de gas, temperatura inicial y final, tiempo transcurrido durante la prueba. Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice L. Flujo de volumétrico de biogas en la configuración del quemador fabricado usando un inyector de 4 mm en la granja villa Porkinos*

<b>Pe</b> <b>(mbar)</b>	<b>V<sub>1</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>2</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>t</b> <b>(s)</b>	<b>Ti</b> <b>(°C)</b>	<b>T<sub>f</sub></b> <b>(°C)</b>	<b>Ṽ<sub>C</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Ṽ<sub>C prom</sub></b> <b>(m<sup>3</sup>/s)</b>
413,03	0,305	0,394	276	25,2	94,6	3,22E-04	
413,03	0,394	0,475	270	25,1	93,6	3,00E-04	
413,03	0,475	0,539	260	25,1	89,8	2,46E-04	
413,03	0,539	0,639	258	25,1	91,3	3,88E-04	
413,03	0,639	0,741	260	25	91,6	3,92E-04	3,38E-04
413,03	0,741	0,835	257	24,9	91,8	3,66E-04	
413,03	0,835	0,929	266	24,8	91,1	3,53E-04	
413,03	0,929	1,018	268	24,9	91,2	3,32E-04	
413,03	1,018	1,107	264	24,9	91,3	3,37E-04	
413,03	1,107	1,197	266	24,8	91,2	3,38E-04	

*Nota.* Presión de entrada, volumen inicial y final de gas, temperatura inicial y final, tiempo transcurrido durante la prueba. Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice M. Eficiencia térmica del quemador comercial usando gas natural Vanti y un inyector de 0,8 mm en el laboratorio de sistemas térmicos*

<b>h<sub>1</sub></b> <b>kJ/kg</b>	<b>h<sub>2</sub></b> <b>kJ/kg</b>	<b>ΔH</b> <b>kJ</b>	<b>Pot<sub>util</sub></b> <b>kW</b>	<b>Pot<sub>requer</sub></b> <b>kW</b>	<b>PCS</b> <b>kJ/m3</b>	<b>Pot<sub>s</sub></b> <b>kW</b>	<b>η<sub>Termica</sub></b>	<b>η<sub>prom</sub></b>	<b>σ.</b>
109,01	379,99	270,97	0,565	3,499	42800	4,013	87,20%		
112,36	384,62	272,26	0,583	3,517	42800	4,216	83,43%		
109,01	377,88	268,9	0,554	3,489	42800	3,883	89,85%		
109,43	382,93	273,50	0,576	3,510	42800	4,145	84,69%		
112,36	377,46	265,10	0,550	3,484	42800	3,996	87,20%	86,23%	1,99%
109,01	383,35	274,34	0,574	3,508	42800	4,119	85,18%		
109,43	383,78	274,34	0,590	3,524	42800	4,050	87,02%		
109,01	380,41	271,39	0,580	3,514	42800	4,115	85,40%		
112,36	384,62	272,26	0,577	3,511	42800	4,171	84,18%		
109,01	378,30	269,29	0,568	3,503	42800	3,973	88,16%		

*Nota.* Entalpías, potencia útil, potencia requerida, potencia suministrada por el combustible, para calcular la potencia requerida se usaron las pérdidas de calor de las tablas 37,37 y 41.

Tomado de: Elaboración propia.

*Apéndice N. Eficiencia térmica del quemador sistema.bio usando biogás y un inyector de 4 mm en la granja Villa Porkinos*

$h_1$ kJ/kg	$h_2$ kJ/kg	$\Delta H$ kJ	$Pot_{util}$ kW	$Pot_{requer}$ kW	PCS kJ/m <sup>3</sup>	$Pot_s$ kW	$\eta_{Termica}$	$\eta_{prom}$	$\sigma$ .
109,430	375,778	266,349	0,683	3,227	22971,86	4,123	78,263%		
109,430	378,303	268,873	0,688	3,232	22971,86	4,171	77,471%		
108,176	377,461	269,285	0,680	3,224	22971,86	3,887	82,949%		
111,939	375,778	263,839	0,678	3,222	22971,86	3,779	85,256%		
112,358	379,987	267,629	0,701	3,245	22971,86	4,029	80,528%	78,46%	4,93%
111,521	382,092	270,571	0,712	3,256	22971,86	4,232	76,943%		
110,267	379,145	268,878	0,698	3,242	22971,86	4,415	73,433%		
110,267	374,938	264,671	0,693	3,237	22971,86	4,751	68,133%		
110,685	382,092	271,407	0,720	3,264	22971,86	4,083	79,947%		
110,685	375,358	264,674	0,691	3,235	22971,86	3,959	81,721%		

*Nota.* Entalpías, potencia útil, potencia requerida, potencia suministrada por el combustible. para calcular la potencia requerida se usaron las pérdidas de calor de las tablas 37,37 y 41.  
Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice O. Eficiencia térmica del quemador fabricado usando gas natural Vanti y un inyector de 4mm en el laboratorio de combustión*

$h_1$ kJ/kg	$h_2$ kJ/kg	$\Delta H$ kJ	$Pot_{util}$ kW	$Pot_{requer}$ kW	PCS kJ/m <sup>3</sup>	$Pot_s$ kW	$\eta_{Termica}$	$\eta_{prom}$	$\sigma$ .
111,103	389,249	278,146	0,909	26,985	42800	96,51	28,0%		
111,521	381,25	269,729	0,843	26,919	42800	125,73	21,4%		
112,358	389,67	277,312	0,880	26,956	42800	108,70	24,8%		
110,267	394,722	284,455	0,921	26,996	42800	62,33	43,3%	34,9%	8,74%
110,267	389,67	279,403	0,954	27,029	42800	62,81	43,0%		
111,103	390,933	279,830	0,996	27,072	42800	68,54	39,5%		
111,939	390,091	278,152	0,976	27,052	42800	67,58	40,0%		
111,103	389,249	278,146	0,956	27,032	42800	69,13	39,1%		

*Nota.* Entalpías, potencia útil, potencia requerida, potencia suministrada por el combustible, para calcular la potencia requerida se usaron las pérdidas de calor de las tablas 37,37 y 41.  
Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice P. Eficiencia térmica del quemador fabricado usando gas natural Vanti y un inyector de 4mm en el laboratorio de combustión*

$h_1$ kJ/kg	$h_2$ kJ/kg	$\Delta H$ kJ	$Pot_{util}$ kW	$Pot_{requer}$ kW	PCS kJ/m <sup>3</sup>	$Pot_s$ kW	$\eta_{Termica}$	$\eta_{prom}$	$\sigma$
113,612	382,092	268,480	0,333	3,946	42800	7,97	49,5%		
112,358	380,829	268,471	0,309	3,922	42800	6,40	61,3%		
113,612	380,829	267,217	0,314	3,927	42800	9,57	41,1%		
111,103	381,25	270,147	0,308	3,921	42800	6,82	57,5%		
113,194	377,461	264,267	0,290	3,903	42800	8,00	48,8%	52,3%	5,61%
111,103	379,145	268,042	0,312	3,925	42800	7,48	52,5%		
111,939	381,25	269,311	0,310	3,923	42800	7,39	53,1%		
111,103	381,671	270,568	0,314	3,927	42800	7,94	49,5%		
109,430	380,829	271,399	0,312	3,925	42800	7,38	53,2%		
108,176	380,408	272,232	0,314	3,927	42800	6,90	56,9%		

*Nota.* Entalpias, potencia útil, potencia requerida, potencia suministrada por el combustible, para calcular la potencia requerida se usaron las pérdidas de calor de las tablas 37,37 y 41.

Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice Q. Eficiencia térmica del quemador fabricado usando biogás y un inyector de 4mm en la granja villa Porkinos*

$h_1$ kJ/kg	$h_2$ kJ/kg	$\Delta H$ kJ	$Pot_{util}$ kW	$Pot_{requer}$ kW	PCS kJ/m <sup>3</sup>	$Pot_s$ kW	$\eta_{Termica}$	$\eta_{prom}$	$\sigma$
105,666	396,406	290,739	1,053	5,076	22971,86	7,41	68,5%		
105,248	392,196	286,948	1,063	5,086	22971,86	6,89	73,8%		
105,248	382,513	277,265	1,075	5,098	22971,86	8,90	57,3%		
104,831	383,776	278,946	1,073	5,096	22971,86	9,01	56,5%		
104,412	384,618	280,206	1,090	5,113	22971,86	8,40	60,9%	64,1%	5,47%
103,993	381,671	277,678	1,044	5,067	22971,86	8,12	62,4%		
104,412	382,092	277,680	1,036	5,059	22971,86	7,63	66,3%		
104,412	382,513	278,101	1,053	5,076	22971,86	7,74	65,5%		
103,993	382,092	278,099	1,045	5,068	22971,86	7,77	65,2%		

*Nota.* Entalpias, potencia útil, potencia requerida, potencia suministrada por el combustible, para calcular la potencia requerida se usaron las pérdidas de calor de las tablas 37,37 y 41.

Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice R. Eficiencia de la combustión del quemador comercial usando gas natural Vanti, un inyector de 0,8mm y una tasa de aireación primaria del 22,5%*

$T_{ll_{puertos}}$ C°	$Vel_{biogas}$ (m/s)	$Vel_{mix}$ (m/s)	$\dot{m}_{mix}$ (kg/s)	$\dot{m}_{biogas}$ (kg/s)	$\dot{m}_{aire}$ (kg/s)	R	$A/F_{real}$ kg <sub>air</sub> /kg <sub>gas</sub>	$\eta_{combust}$	$\eta_{prom}$	$\sigma$ .
790,2	2,3	0,12	6,08E-05	8,199E-07	6,00E-05	73,21	19,95	81,75%		
798,3	2,2	0,1	5,07E-05	7,843E-07	4,99E-05	63,66	17,35	94,03%		
803,4	2,5	0,12	6,08E-05	8,912E-07	6,00E-05	67,28	18,33	88,97%		
805,5	2,2	0,1	5,07E-05	7,843E-07	4,99E-05	63,66	17,35	94,03%		
799,1	2,2	0,09	4,56E-05	7,843E-07	4,49E-05	57,19	15,58	104,66%	93,6%	8,96%
794,6	2,5	0,12	6,08E-05	8,912E-07	6,00E-05	67,28	18,33	88,97%		
798,8	2,2	0,1	5,07E-05	7,843E-07	4,99E-05	63,66	17,35	94,03%		
801,6	2,3	0,09	4,56E-05	8,199E-07	4,48E-05	54,66	14,89	109,50%		
802,4	2,3	0,12	6,08E-05	8,199E-07	6,00E-05	73,21	19,95	81,75%		
807,7	2,3	0,1	5,07E-05	8,199E-07	4,99E-05	60,84	16,58	98,37%		

*Nota.* Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice S. Eficiencia de la combustión del quemador sistema.bio usando biogás y un inyector de 4mm y una tasa de aireación primaria del 35%*

$T_{ll_{puetos}}$ C°	$Vel_{biogas}$ (m/s)	$Vel_{mix}$ (m/s)	$\dot{m}_{mix}$ (kg/s)	$\dot{m}_{biogas}$ (kg/s)	$\dot{m}_{aire}$ (kg/s)	R	$A/F_{real}$ kg <sub>air</sub> /kg <sub>gas</sub>	$\eta_{combust}$	$\eta_{prom}$	$\sigma$ .
704,5	3,1	2,7	1,06E-03	3,76E-05	1,02E-03	27,12	9,44	86,89%		
710,2	3,2	2,8	1,10E-03	3,88E-05	1,06E-03	27,25	9,49	86,48%		
708,6	3	2,7	1,06E-03	3,63E-05	1,02E-03	28,05	9,77	83,99%		
704,8	3,1	2,7	1,06E-03	3,76E-05	1,02E-03	27,12	9,44	86,89%		
714,6	3,1	2,5	9,78E-04	3,76E-05	9,40E-04	25,03	8,72	94,12%	90,4%	4,11%
717,2	3,4	2,8	1,10E-03	4,12E-05	1,05E-03	25,59	8,91	92,09%		
707,5	3,1	2,6	1,02E-03	3,76E-05	9,79E-04	26,08	9,08	90,36%		
718,3	3,3	2,6	1,02E-03	4,00E-05	9,77E-04	24,44	8,51	96,43%		
715,4	3,2	2,6	1,02E-03	3,88E-05	9,78E-04	25,23	8,79	93,39%		
720,9	3,2	2,6	1,02E-03	3,88E-05	9,78E-04	25,23	8,79	93,39%		

*Nota.* Tomado de: Elaboración propia

*Apéndice T. Eficiencia de la combustión del quemador fabricado usando gas natural Vanti y un inyector de 4mm y una tasa de aireación primaria del 20%*

$T_{ll_{puertos}}$ C°	$Vel_{biogas}$ (m/s)	$Vel_{mix}$ (m/s)	$\dot{m}_{mix}$ (kg/s)	$\dot{m}_{biogas}$ (kg/s)	$\dot{m}_{aire}$ (kg/s)	R	$A/F_{real}$ kg <sub>air</sub> /kg <sub>gas</sub>	$\eta_{combust}$	$\eta_{prom}$	$\sigma$ .
777,7	5,4	3	2,98E-03	4,81E-05	2,93E-03	60,95	18,69	87,28%		
774,1	5,3	2,9	2,88E-03	4,72E-05	2,83E-03	60,02	18,40	88,64%		
764,5	5,4	3	2,98E-03	4,81E-05	2,93E-03	60,95	18,69	87,28%		
773,9	5,2	2,9	2,88E-03	4,63E-05	2,84E-03	61,19	18,76	86,94%		

775,5	5,5	3,1	3,08E-03	4,90E-05	3,03E-03	61,86	18,96	86,01%	85,54%	2,12%
772,3	5,5	3,1	3,08E-03	4,90E-05	3,03E-03	61,86	18,96	86,01%		
755,5	5,1	3	2,98E-03	4,55E-05	2,94E-03	64,60	19,80	82,36%		
760,1	5,3	3,1	3,08E-03	4,72E-05	3,03E-03	64,23	19,69	82,84%		
808,1	5,2	3	2,98E-03	4,63E-05	2,94E-03	63,34	19,42	84,00%		
768,6	5,2	3	2,98E-03	4,63E-05	2,94E-03	63,34	19,42	84,00%		

Nota. Tomado de: Elaboración propia

Apéndice U. Eficiencia de la combustión del quemador fabricado usando gas natural Vanti y un inyector de 0,8mm y una tasa de aireación primaria del 20%

Tll <sub>puertos</sub> C°	Vel <sub>biogas</sub> (m/s)	Vel <sub>mix</sub> (m/s)	ṁ <sub>mix</sub> (kg/s)	ṁ <sub>biogas</sub> (kg/s)	ṁ <sub>aire</sub> (kg/s)	R	A/F <sub>real</sub> kg <sub>air</sub> /kg <sub>gas</sub>	η <sub>combust</sub>	η <sub>prom</sub>	σ.
541,5	2,3	0,09	8,94E-05	8,199E-07	8,86E-05	108,09	33,14	49,22%		
554,4	2,2	0,08	7,95E-05	7,843E-07	7,87E-05	100,38	30,77	53,00%		
548,5	2,5	0,1	9,94E-05	8,912E-07	9,85E-05	110,52	33,88	48,14%		
560,1	2,2	0,08	7,95E-05	7,843E-07	7,87E-05	100,38	30,77	53,00%		
558,7	2,2	0,09	8,94E-05	7,843E-07	8,87E-05	113,05	34,66	47,06%	52,38%	4,08%
562,5	2,5	0,08	7,95E-05	8,912E-07	7,86E-05	88,21	27,04	60,31%		
557,9	2,2	0,08	7,95E-05	7,843E-07	7,87E-05	100,38	30,77	53,00%		
561,4	2,3	0,08	7,95E-05	8,199E-07	7,87E-05	95,97	29,42	55,44%		
559,9	2,3	0,09	8,94E-05	8,199E-07	8,86E-05	108,09	33,14	49,22%		
560,4	2,3	0,08	7,95E-05	8,199E-07	7,87E-05	95,97	29,42	55,44%		

Nota. Tomado de: Elaboración propia

Apéndice V. Eficiencia de la combustión del quemador fabricado usando biogás y un inyector de 4mm y una tasa de aireación primaria del 50%

Tll <sub>puertos</sub> C°	Vel <sub>biogas</sub> (m/s)	Vel <sub>mix</sub> (m/s)	ṁ <sub>mix</sub> (kg/s)	ṁ <sub>biogas</sub> (kg/s)	ṁ <sub>aire</sub> (kg/s)	R	A/F <sub>real</sub> kg <sub>air</sub> /kg <sub>gas</sub>	η <sub>combust</sub>	η <sub>prom</sub>	σ.
715,5	3	1,5	1,49E-03	3,63E-05	1,45E-03	39,85	9,71	84,46%		
745	3,3	1,7	1,68E-03	4,00E-05	1,64E-03	41,09	10,02	81,92%		
719	3,1	1,6	1,58E-03	3,76E-05	1,55E-03	41,17	10,04	81,76%		
704,8	3,1	1,6	1,58E-03	3,76E-05	1,55E-03	41,17	10,04	81,76%		
714,6	3	1,5	1,49E-03	3,63E-05	1,45E-03	39,85	9,71	84,46%	81,75%	4%
717,2	3,4	1,8	1,78E-03	4,12E-05	1,74E-03	42,26	10,30	79,66%		
707,5	3,2	1,7	1,68E-03	3,88E-05	1,64E-03	42,41	10,34	79,38%		
763,3	3,4	1,6	1,58E-03	4,12E-05	1,54E-03	37,45	9,13	89,88%		
734,4	3,2	1,7	1,68E-03	3,88E-05	1,64E-03	42,41	10,34	79,38%		
778,9	3,2	1,8	1,78E-03	3,88E-05	1,74E-03	44,96	10,96	74,87%		

Nota. Tomado de: Elaboración propia