



Diseño de un sistema mecánico para la captura de metano exhalado por bovinos

**Laura Catalina Ordoñez Meneses
Carlos Andrés Segura Hoyos**

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2025

Diseño de un sistema mecánico para la captura de metano exhalado por bovinos.

**Laura Catalina Ordoñez Meneses
Carlos Andrés Segura Hoyos**

Director:

Ph.D. José Luis Ramírez Duque

Línea de Investigación:

Optimización de sistemas de medición y captura de metano en bovinos

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2025

Declaración de obra original

Nosotros, Laura Catalina Ordoñez Meneses y Carlos Andrés Segura Hoyos declaramos lo siguiente:

Hemos leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontificia Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este anteproyecto representa nuestro trabajo original, excepto donde hemos reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este anteproyecto, hemos realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Hemos obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, hemos sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

LAURA ORDOÑEZ
MENESES



Laura Catalina Ordoñez Meneses

Carlos Andrés Segura Hoyos

Fecha 26/05/2025

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema mecánico destinado a la extracción, medición y captura del metano exhalado por bovinos. La investigación parte del análisis de tecnologías existentes para identificar las limitaciones actuales en cuanto a precisión, adecuación al entorno productivo y bienestar animal. A partir de esta evaluación, se establece un conjunto de requerimientos técnicos que guían el diseño de un sistema optimizado, no invasivo y adaptable.

El sistema propuesto integra componentes mecánicos y de ventilación, así como sensores de medición especializados, seleccionados con base en criterios de eficiencia, sensibilidad y bajo impacto en el comportamiento del animal. Para garantizar su viabilidad estructural y funcional, se realizaron simulaciones computacionales que validan tanto el desempeño mecánico como el comportamiento del flujo de gases.

Los resultados obtenidos permiten avanzar hacia soluciones más efectivas y accesibles para la mitigación de emisiones en el sector ganadero, promoviendo prácticas sostenibles y compatibles con las exigencias del bienestar animal y la eficiencia ambiental.

Palabras clave: captura de metano, ganadería, sensores, eficiencia de captura, emisiones de gases.

Abstract

This thesis addresses the collection and measurement of methane emissions from bovine livestock, considering the environmental impact of methane as a greenhouse gas. Methane emissions from cattle, primarily released through eructation, significantly contribute to global warming. The study aims to develop an effective methane measurement and capture system tailored to bovine respiration. Specifically, this research identifies essential requirements for accurate methane collection, reviews existing designs, and proposes a redesign of a non-invasive measurement system that reduces animal stress. By implementing an optimized design, this thesis seeks to improve methane capture efficiency and data reliability, reflecting the emissions produced under natural conditions. The approach includes evaluating the efficiency of the proposed system in comparison to current measurement technologies, providing a comprehensive analysis of technical and ethical aspects to ensure compliance with animal welfare standards.

Keywords: Methane emissions, bovine respiration, greenhouse gas, methane collection system, non-invasive measurement, animal welfare.

Contenido

1. Introducción	15
2. Planteamiento del problema	18
2.1 Grupos de interesados	19
2.2 Recolección de datos:	19
2.3 Causas y consecuencias:	20
3. Justificación	21
4. Objetivos	23
4.1 Objetivo general:.....	23
4.1.1 Objetivos específicos:	23
5. Marco teórico	24
5.1 Factores que afectan la precisión en la medición de metano:.....	24
5.2 Bienestar animal y su impacto en la medición de emisiones: importancia de un diseño no invasivo	25
5.3 Influencia de la dieta y tipo de ganado en las emisiones de metano.....	26
5.4 Retos técnicos en los sistemas de medición de metano: proximidad del sensor y captura precisa de emisiones:	27
5.5 Leyes y normas del bienestar animal:.....	28
5.6 Simulación	28
5.7 Zeolitas:	29
6. Estado del arte	30
6.1 Cámaras de respiración.....	31
6.2 Método de trazado Hexafluoruro de azufre (SF ₆):	32
6.3 Greenfeed:	33
6.4 Detector laser CH ₄ :.....	34
6.5 Metano a biogás.....	35
6.6 Imágenes ópticas de gases:	36
6.7 Sistema de detección de metano remoto	36
6.8 Comparación de sistemas:.....	36
7. Diseño Conceptual	38
7.1 Requerimientos de diseño:	38
7.2 Requerimientos según la Normativa	38
7.3 Requerimientos:	39
7.3.1 Restricciones:	40
7.3.2 Especificaciones:	41
7.4 Análisis funcional:.....	42
7.4.1 Funciones principales:	42
7.4.2 Funciones secundarias:.....	44
7.5 Diseño conceptual:	44
8. Metodología	49

9. Resultados y Discusión	52
9.1 Determinación del material y el método de obtención	52
9.2 Selección de materiales:	52
9.2.1 Tuberías:.....	52
9.5 Diseño en detalle	67
10. Conclusiones	112
11. Cronograma	115
12. Bibliografía	117
13. Recursos Externos Utilizados	121
14. Anexos	123
Anexo A. Planos Piezas.....	123
Anexo B: Dimensión filtro de aire y modelos.	129
Anexo C: DataSheet sensor NDIR	131
Anexo D: Ficha técnica comedero/saladero	132
.....	132
Anexo D: Cálculos sistema de ventilación	133

Lista de figuras

Figura 1. Sistema invasivo[14]	Figura 2. Sistema no invasivo[15]	26
Figura 3. Perfil mediciones de metano en una vaca, cámara respiratoria (puntos sólidos y LMD) [18].....		27
Figura 4. Estructura zeolitas [23].....		29
Figura 5. Cámara de respiración [25]		31
Figura 6. Método de trazado Hexafluoruro de azufre [6].....		32
Figura 7. Sistema GreenFeed [28]		33
Figura 8. Detector laser CH ₄ [4].....		34
Figura 9. Metano a biogás [14].....		35
Figura 10. Valoración basada en la opinión propia de criterios de diseño para el sistema.		40
Figura 11. Diseño Conceptual.....		47
Figura 12. Estructura y composición de las zeolitas[31].		60
Figura 13. Comportamiento adsorción zeolita 13X [31]		62
Figura 14. Curva cinética adsorción [31]		63
Figura 15. Gráfica de difusividad [31].....		64
Figura 16. Diagrama fases y elementos para el desarrollo de la máquina		68
Figura 17. Vista isométrica del sistema de extracción		69
Figura 18. Vista inferior sistema de extracción		70
Figura 19. Esquema del sistema de ventilación del sistema		71
Figura 20. Curva característica de ventiladores axiales[35].....		74
Figura 21. Punto de operación para el sistema.		75
Figura 22. Dimensiones en pulgadas y mm del ventilador axial.		76
Figura 23. Sensor NDIR MIPEX-04.....		78
Figura 24. Gráfico precisión MIPEX-04-1-XX-3.1.....		79
Figura 25. Dimensiones en mm del sensor NDIR.		80
Figura 26. Sensor RCWL-0516.		82
Figura 27. Dimensiones sensor RCWL-0516.		82
Figura 28. Sensor NDIR.....		84
Figura 29. Microcontrolador ESP32		85
Figura 30. Diagrama GRAFCET.		86
Figura 31. Diagrama de flujo del sistema		89
Figura 32. Vista plano del comedero.....		90

Figura 33. Vista plano filtro de zeolitas.	91
Figura 34. Plano Sistema Greenfeed.	91
Figura 35. Plano explosionado.	92
Figura 36. Dimensiones referencia para comedero de bovinos [36]	93
Figura 37. Dimensiones comedero comercial [37].....	94
Figura 38. Dimensiones de una vaca Holstein[36]	95
Figura 39. Modelo 3D del comedero diseñado para bovinos.....	96
Figura 40. Sistema de adsorción por zeolitas	97
Figura 41. Modelo 3D del comedero, ubicación filtro de aire.....	98
Figura 42. Filtro de aire B045008	99
Figura 43. Gráfico operación filtro B045008.....	99
Figura 44. Plano caja base.....	101
Figura 45. Representación del esfuerzo por impacto generado por el cabezazo de una vaca (4800 N) sobre la campana de captura.....	102
Figura 46. Simulación del esfuerzo por impacto generado por el cabezazo de una vaca (4800 N) sobre la campana de captura	105
Figura 47. Representación de la carga estática (2207,25 N) ejercida por el peso combinado de la campana y el comedero lleno.	106
Figura 48. Factor de seguridad.....	107
Figura 49. Simulación CFD del sistema de ventilación.....	108
Figura 50. Cronograma actividades	115

Lista de tablas

Tabla 1. Grupo de interés.	19
Tabla 2. Comparación métodos de medición y captura de CH ₄ , basado en [30]	37
Tabla 3. Métodos vs Requerimientos de diseño.	45
Tabla 4. Métodos vs análisis funcional	46
Tabla 5. Comparación de materiales para el ducto	53
Tabla 6. Comparaciones materiales para la caja base.....	54
Tabla 7. Comparación aluminios para la caja base	54
Tabla 8. Comparativa materiales para comedor de la vaca	56
Tabla 9. Comparación de aleaciones de aluminio para la campana	56
Tabla 10. Comparación materiales para el comedero.	58
Tabla 11. Comparación métodos de captura de metano.	59
Tabla 12. Comparación tipos de zeolitas.	61
Tabla 13. Comparación métodos de medición de metano.	66
Tabla 14. Ecuaciones para cálculo de requerimientos del sistema y ventilador.	72
Tabla 15. Lista de componentes del sistema de ventilación	73
Tabla 16. Comparación sensores NDIR.	77
Tabla 17. Comparación métodos de medición	83
Tabla 18. Comparación filtros de aire.....	100
Tabla 19. Peso componentes.	106
Tabla 20. Consumo energético estimado.	109
Tabla 21. Presupuesto propuesto	110

1. Introducción

La creciente preocupación mundial por el cambio climático ha impulsado una intensificación en las investigaciones relacionadas con la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), entre los cuales el metano (CH_4) destaca por su alto potencial de calentamiento global. A diferencia del dióxido de carbono (CO_2), el metano puede atrapar hasta 25 veces más calor en la atmósfera en un período de 100 años, lo que lo convierte en uno de los principales responsables del calentamiento global a corto y mediano plazo. En este contexto, la ganadería, y en particular la producción entérica de metano por parte de los rumiantes, ha sido identificada como una de las fuentes más significativas de emisiones. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la agricultura representa alrededor del 21% de las emisiones globales, mientras que la FAO estima que la ganadería contribuye con cerca del 14.5% de las emisiones totales, siendo el metano el principal gas emitido.

Esta situación ha evidenciado la necesidad urgente de desarrollar tecnologías capaces de cuantificar, controlar y mitigar las emisiones de metano en la producción ganadera. Sin embargo, los sistemas de medición y captura existentes presentan limitaciones significativas que impiden su implementación a gran escala. Entre las principales barreras se encuentran los altos costos de adquisición, la complejidad operativa, la baja portabilidad, y sobre todo, el impacto negativo que algunas tecnologías generan sobre el bienestar animal. Por ejemplo, las cámaras de respiración, a pesar de su precisión, fuerzan al animal a permanecer en entornos no naturales, lo que altera su comportamiento y puede distorsionar los resultados. Otros métodos, como el trazado con hexafluoruro de azufre (SF_6) o el uso de detectores láser, enfrentan retos en cuanto a repetibilidad, interferencias externas y sensibilidad a variables ambientales.

Frente a este panorama, el presente trabajo propone el diseño de un sistema mecánico orientado a la extracción, medición y captura de metano exhalado por bovinos, bajo criterios de precisión, sostenibilidad y respeto por el bienestar animal. El enfoque adoptado parte de una revisión exhaustiva del estado del arte, que permitió identificar los requerimientos técnicos y funcionales necesarios para el desarrollo de una solución innovadora, adaptable y eficaz. Este análisis incluyó la comparación de tecnologías actuales como GreenFeed, cámaras de respiración, sistemas de imágenes ópticas de gases, y sensores de infrarrojo no dispersivo (NDIR), evaluando aspectos como la

eficiencia de captura, la facilidad de implementación, la sensibilidad de medición y la aceptación del animal frente al dispositivo.

El sistema propuesto está concebido para funcionar en condiciones reales de campo, integrando un subsistema mecánico de ventilación que facilita la dirección y recolección del flujo exhalado, un módulo de captura molecular con sensores adecuados para bajas concentraciones de metano, y una arquitectura estructural que prioriza la comodidad y libertad de movimiento del animal. Para garantizar la viabilidad del diseño, se seleccionaron materiales de bajo costo, alta durabilidad y resistencia a ambientes agropecuarios, y se adoptó una configuración modular que permita su fácil montaje, mantenimiento y adaptación a distintas razas y tamaños de bovinos.

Además, el sistema fue validado mediante simulaciones computacionales que incluyeron análisis de esfuerzos mecánicos y modelación del comportamiento del flujo de aire y gas en el entorno de captura. Estas simulaciones, realizadas en plataformas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y elementos finitos (FEM), permitieron optimizar el diseño geométrico y asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo bajo condiciones diversas. Se analizaron escenarios como impactos accidentales por movimientos del animal, distribución de cargas sobre la estructura, y eficiencia del sistema de succión en distintos regímenes de respiración.

En suma, este trabajo representa una contribución significativa al desarrollo de soluciones tecnológicas que permitan una medición más precisa, accesible y ética del metano generado por la ganadería. La propuesta presentada no solo busca mejorar la eficiencia de captura de emisiones, sino también facilitar la adopción de herramientas que permitan a ganaderos, investigadores y entidades regulatorias tomar decisiones basadas en datos confiables. De esta manera, se espera aportar a la transición hacia prácticas productivas más sostenibles y alineadas con los objetivos globales de mitigación del cambio climático.

2. Planteamiento del problema

El incremento significativo de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera ha impulsado el desarrollo de diversas técnicas de muestreo destinadas a cuantificar las fuentes de emisiones de gases con un alto potencial de calentamiento global. El ganado bovino, a través de su proceso digestivo, emite gases que contribuyen al calentamiento global y al deterioro de la capa de ozono, uno de ellos, es el metano (CH_4), que, aunque tiene una vida media -relativamente corta- en la atmósfera (10-12 años) comparado con el CO_2 , su capacidad para atrapar el calor es 25 veces mayor que la del CO_2 . Se estima que el metano es responsable de aproximadamente una cuarta parte del calentamiento global actual [2].

En este contexto, la actividad ganadera, y específicamente la producción de metano por parte de los rumiantes, como las vacas, representa un desafío ambiental urgente. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la ganadería podría ser responsable de hasta el 14.5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), en este sector, los vacunos son causantes del 65% de estas [3]. Esto se debe principalmente al metano generado en la fermentación de los alimentos en el rumen, conocido como metano entérico, el cual el 97% es liberado a través de la boca y fosas nasales en el proceso de respiración y eructación, cuanto mayor es el contenido de fibra en la dieta de los rumiantes, mayor es la producción de metano [4].

2.1 Grupos de interesados:

Grupo de interés	Expectativas	Beneficios
Gobiernos y organismos reguladores	Buscan que los sistemas de monitoreo ambiental cumplan con estándares internacionales y faciliten la regulación ambiental.	Mejora en la medición de emisiones, facilitando políticas ambientales efectivas y cumplimiento de normativas.
Ganaderos y agricultores	Desean tecnologías accesibles que no incrementen significativamente los costos de producción y que optimicen la gestión del ganado.	Optimización de recursos, mejora en la eficiencia productiva y reducción de costos operativos.
Empresas de tecnología	Ven una oportunidad de mercado en el desarrollo de maquinaria más precisa y económica para aplicaciones en la ganadería.	Expansión de mercado y desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades del sector agropecuario.
Organizaciones de bienestar animal	Evalúan la alineación del diseño de los sistemas con estándares éticos que promuevan el bienestar animal.	Implementación de prácticas que mejoren la calidad de vida de los animales y fomenten sistemas de producción más sostenibles.

Tabla 1. Grupo de interés.

2.2 Recolección de datos:

Actualmente y gracias a la importancia que se le ha dado, se requiere de una medición precisa de las emisiones de metano en los rumiantes, que se vuelve esencial, para comprender su impacto y desarrollar estrategias efectivas para capturarlo. Entre los métodos utilizados para estas mediciones, destacan las cámaras de respiración, que representan un estándar en las mediciones, ofrece un control muy preciso de las condiciones del medio, por lo que sus resultados son confiables, se estima que tiene una precisión del 25,7%, que puede mejorar controlando otras variables, sin embargo, sus mediciones no son fieles a la realidad, puesto que el bovino se mide en un ambiente que

es distinto al suyo, lo que le genera estrés y cambia la medición, por otra parte, los costos son muy elevados en estas cámaras de respiración [5].

2.3 Causas y consecuencias:

A partir de mediciones más precisas es posible implementar estrategias enfocadas hacia la captura y la reducción de la emisión de metano al medio ambiente a través de un sistema más preciso de captura de CH₄, lo que es crucial para combatir el cambio climático y avanzar hacia una producción más sostenible. La investigación y la aplicación de estrategias que reduzcan estas emisiones son fundamentales para proteger el medio ambiente. Algunos expertos creen que el impacto del metano ha sido subestimado, y que su capacidad de atrapar el calor podría ser entre 80 y 120 veces mayor de lo que se ha calculado.

3. Justificación

Se estima que una vaca promedio emite entre 60 y 126 kg de metano al año [6]. Factores como la raza, el metabolismo, la dieta y la gestación pueden influir en la cantidad de metano emitido, estos factores varían los resultados de las mediciones, además, la tecnología para medir estas emisiones es costosa, los costos iniciales de las tecnologías de medición actuales pueden variar entre \$50,000 y \$500,000 USD [7] [8].

Actualmente, hay aproximadamente 1.5 mil millones de vacas en el mundo, comparadas con los 8.16 mil millones de personas. Los detectores de gas utilizados para medir concentraciones de metano en el aire suelen tener rangos que van desde 0 ppm hasta 1,500 ppm o más, pero aún las mediciones exactas son un problema de frontera, por lo que se requiere mejorar la precisión y accesibilidad de los sensores, pues, las mediciones pierden precisión por factores como el patrón de flujo de aire alrededor de la vaca, la distancia entre la exhalación y el punto de muestreo, y el movimiento de la cabeza de la vaca en el comedero [9], además, se requiere asegurar la repetibilidad de las mediciones, puesto que, es uno de los grandes retos que se tiene.

Grupos de interés que se ven afectados, con la mejora en la medición y captura de metano, son gobiernos y organismos reguladores que estén comprometidos con la reducción de las emisiones, además, de trabajar en políticas de regulación en la actividad ganadera, por consiguiente, agricultores y ganaderos se están interesando, por el cumplimiento de las regulaciones y en la mejora de la sostenibilidad de sus operaciones.

Otros grupos interesados, son los entes nacionales, como el ICA (El Instituto Colombiano Agropecuario), pues, busca mejorar las prácticas agropecuarias sostenibles en Colombia. Por otra parte, Empresas que desarrollan tecnología para la agricultura sostenible, además, quienes ya fabriquen y vendan los sistemas de medición, pues una reducción en los costos de los equipos, y una mejora en su precisión, representan una oportunidad de mercado; por último, pero no el único, productores de los alimentos para bovinos, dado que, se ha comprobado que la dieta del animal está relacionada directamente con sus emisiones de metano, con una medición precisa, se podría trabajar en el desarrollo de una dieta que nutra al animal y que disminuya la producción de metano, un paso más hacia el desarrollo sostenible.

Para concluir, teniendo mediciones precisas de las emisiones, se podrían mejorar también la precisión de los métodos de captura de metano, por consiguiente, reducir las emisiones de metano en la ganadería, lo que es esencial para mitigar el cambio climático de manera efectiva y avanzar hacia una producción más sostenible. La investigación y la implementación de estrategias de medición y captura de emisiones no solo son fundamentales para proteger el medio ambiente, sino que también ofrecen la posibilidad de mejorar la productividad del ganado al optimizar su eficiencia digestiva y reducir pérdidas energéticas, además de garantizar la prosperidad del sector ganadero, que también se afecta el calentamiento global.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general:

Diseñar un sistema de extracción de gases exhalados por el bovino para la medición y captura del metano.

4.1.1 Objetivos específicos:

1. Determinar los requerimientos necesarios para la medición y captura de metano en bovinos, a través de la revisión de diseños existentes.
2. Diseñar un sistema mecánico y de ventilación que permita la captura de las emisiones de gases exhalados por los bovinos.
3. Seleccionar un módulo de medición y captura molecular del metano.
4. Validar mediante simulaciones computacionales, los esfuerzos mecánicos y el flujo volumétrico en componentes críticos del sistema.

5. Marco teórico

Se discutirán los factores que afectan la precisión de la medición de metano, como las variaciones en la dieta y el tipo de ganado, así como los retos técnicos relacionados con los sistemas de medición actuales. Además, se explorará la importancia de un diseño no invasivo, que minimice el estrés animal y refleje de manera precisa las emisiones en condiciones naturales.

5.1 Factores que afectan la precisión en la medición de metano:

La precisión en la medición de metano en bovinos está influenciada por varios factores, como el método de medición, el entorno ambiental, la variabilidad entre los animales y la densidad y movilidad en sistemas de pastoreo. Aunque las cámaras de respiración se consideran el estándar de oro, pueden alterar el comportamiento animal y, por lo tanto, no reflejar las emisiones en condiciones naturales. Elementos como la temperatura, la presión y la humedad, junto con diferencias en fisiología y dieta, generan variaciones entre individuos, dificultando la obtención de datos representativos [9], [10].

En sistemas de pastoreo, la baja densidad y alta movilidad también pueden llevar a mediciones inexactas, provocando subestimaciones o sobreestimaciones de las emisiones totales. La repetibilidad de los datos, es decir, la capacidad del sistema para ofrecer resultados consistentes bajo las mismas condiciones experimentales se ve afectada por la variabilidad ambiental, el comportamiento animal y cambios en la dieta [11]. Para mejorar

la repetibilidad y asegurar que los datos sean confiables y aplicables a largo plazo, es esencial estandarizar los protocolos y rediseñar técnicamente los sistemas de captura, reduciendo así la dependencia de factores externos no controlables.

5.2 Bienestar animal y su impacto en la medición de emisiones: importancia de un diseño no invasivo:

El bienestar animal es esencial para la precisión en la medición de emisiones de metano, ya que el estrés en los bovinos, provocado por la manipulación o el uso de dispositivos invasivos, puede alterar su comportamiento digestivo y afectar la producción de metano. Cuando un animal está estresado, su ingesta de alimento, producción de leche y tasa respiratoria pueden verse alteradas, afectando temporalmente los procesos digestivos y, en consecuencia, las emisiones de metano[12]. Para obtener datos representativos y fiables, es crucial que el diseño del sistema de medición minimice cualquier incomodidad o estrés en el animal.

Un diseño no invasivo resulta fundamental para captar datos precisos sin interferir en el comportamiento natural del bovino. Los sensores y dispositivos de captura deben ubicarse de manera que no generen incomodidad, especialmente cuando están cerca de la boca, ya que una colocación inadecuada podría comprometer tanto la precisión de la medición como el bienestar del animal. Un diseño optimizado permite situar el sensor lo suficientemente cerca para obtener datos precisos sin causar estrés, asegurando que la medición refleje de manera confiable la producción de metano en condiciones naturales. Para visualizar un sistema invasivo que causa estrés en el animal, consulte la Figura 1, y para ver un sistema no invasivo, consulte la Figura 2.

La norma de la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE), Terrestrial Animal Health Code, es una referencia fundamental para abordar el bienestar animal en el contexto de la captura de metano en bovinos. Este código establece recomendaciones para la protección de la salud y el bienestar de los animales en procesos de producción, monitoreo y comercio, incluyendo pautas específicas para la ganadería y el manejo de animales de granja. En el caso de la captura de metano, el código recomienda adoptar estándares éticos y prácticas de manejo que minimicen el impacto en los animales, lo cual es directamente aplicable al

diseño de sistemas de captura de gases que no afecten la salud y comodidad del ganado. Además, estos estándares éticos y de cuidado animal, adoptados formalmente por los países miembros de la OIE, facilitan la alineación con normativas internacionales para garantizar un comercio seguro y ético, basándose en evaluaciones de riesgo y medidas preventivas adecuadas [13].



Figura 1. Sistema invasivo[14]



Figura 2. Sistema no invasivo[15]

5.3 Influencia de la dieta y tipo de ganado en las emisiones de metano:

La dieta y el tipo de ganado son factores importantes en la cantidad de metano que un animal produce. Por ejemplo, dietas ricas en forrajes tienden a generar mayores emisiones de metano en comparación con dietas basadas en concentrados debido a las diferencias en los procesos de fermentación en el rumen[16]. Las dietas con mayor proporción de fibra insoluble favorecen la producción de ácido acético, que se asocia con una liberación mayor de metano. Además, existen diferencias en la eficiencia del metabolismo ruminal entre razas lecheras y de carne, lo que implica que un sistema de medición debe adaptarse a estos factores para obtener datos comparables y precisos entre diferentes animales y dietas[17].

Por otra parte, se analizó el comportamiento de las vacas y la relación entre la emisión con las actividades de la vaca, el autor propone que el momento donde comen y beber las vacas producen la mayor concentración de CH₄, con 368 ppm, comparado cuando caminaban que registraron una concentración de 106 ppm (ver Figura 3), lo que sugiere

que el sistema debe considerar momentos claves como este para la medición y captura de metano.

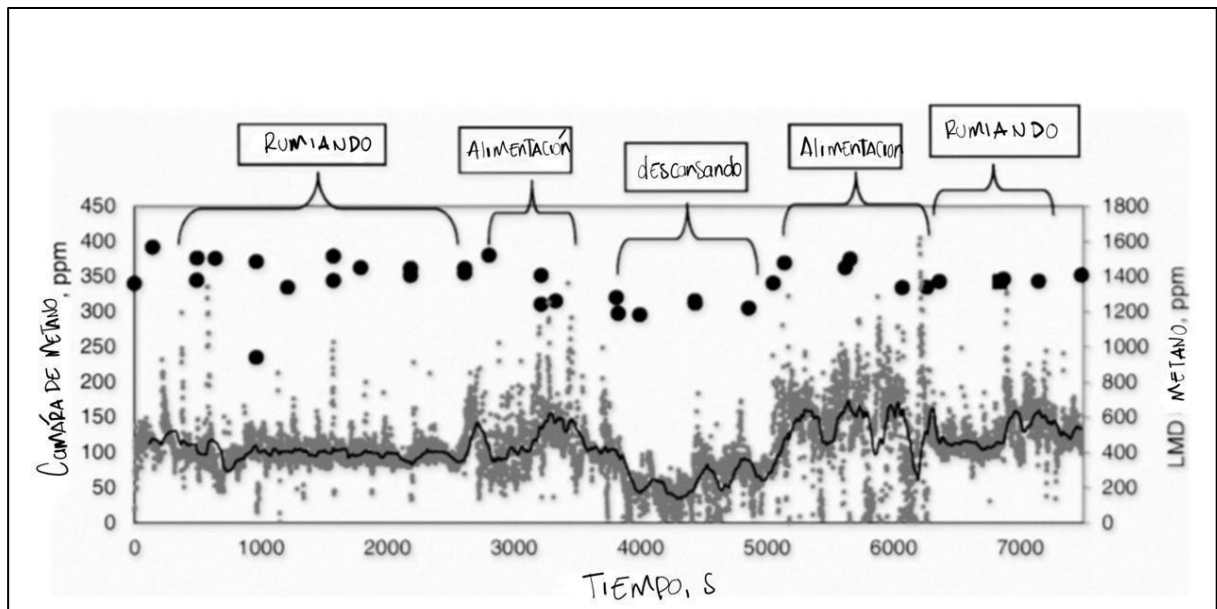


Figura 3. Perfil mediciones de metano en una vaca, cámara respiratoria (puntos sólidos y LMD) [18].

5.4 Retos técnicos en los sistemas de medición de metano: proximidad del sensor y captura precisa de emisiones:

Uno de los principales retos técnicos en la medición de metano es la proximidad del sensor respecto a la boca del bovino, que es crucial para obtener una captura precisa de las emisiones. Los sensores que están demasiado lejos o mal posicionados pueden perder emisiones significativas, ya que el metano es liberado en mayor cantidad durante los eructos. Además, los movimientos naturales del animal pueden desplazar el sensor, causando lecturas incompletas o inexactas[19]. Para mejorar la precisión de los datos, es necesario un diseño de sistema que mantenga el sensor en una posición óptima, capaz de adaptarse a estos movimientos y capturar adecuadamente las emisiones sin importar la actividad del animal. Esto optimiza la exactitud de la medición y ayuda a captar el metano en el momento más relevante.

5.5 Leyes y normas del bienestar animal:

En Colombia, la Ley 84 de 1989 – Estatuto Nacional de Protección de los Animales capítulo VI Del uso de animales vivos en experimentos e investigación, es la principal ley de protección animal en Colombia. Establece normas sobre el uso de animales en experimentación, prohibiendo el maltrato y regulando el trato ético. Prohíbe la crueldad y el sufrimiento innecesario en experimentación y solo permite el uso de animales en investigación solo cuando no haya alternativas [20].

Para Bovinos encontramos Resolución 136 de 2020 (ICA), Establece los requisitos de bienestar animal en la producción pecuaria, incluyendo bovinos. Exige que los experimentos con bovinos minimicen el estrés y el sufrimiento [21].

Resolución 1056 de 1996 (ICA) – Sanidad en Ganado Bovino y Resolución 15741 de 2023 (ICA) – Trazabilidad y Control Sanitario de Bovinos, Regula las condiciones sanitarias del ganado bovino en investigación y producción, además, obliga a mantener registros de salud y bienestar de los animales [22].

5.6 Simulación:

El alcance de esta tesis se centra en el desarrollo y validación de un prototipo virtual diseñado para la captura y medición de emisiones de metano en bovinos. Este prototipo será evaluado mediante simulaciones computacionales utilizando el software SolidWorks, con el complemento de Flow Simulation, especializado en Computational Fluid Dynamics (CFD). Estas simulaciones permitirán analizar el comportamiento de los flujos de aire y gas en condiciones controladas, considerando las características específicas del diseño propuesto.

El modelo virtual empleará flujos de trabajo basados en un promedio de los patrones de respiración de los bovinos, con parámetros ajustados para representar escenarios realistas. La estimación de la producción de metano se realizará de manera indirecta mediante el método IPCC Tier 2, que integra factores como la ingesta diaria de materia seca (DMI), el tipo de dieta consumida y las características fisiológicas del ganado. Este enfoque garantiza una estimación fundamentada y alineada con estándares internacionales.

5.7 Zeolitas:

Las zeolitas son materiales aluminosilicatos cristalinos formados por una estructura tridimensional de tetraedros de sílice (SiO_4) y alúmina (AlO_4), conectados mediante átomos de oxígeno compartidos. Esta arquitectura genera una red microporosa con canales y cavidades de tamaño molecular, capaces de alojar cationes intercambiables y moléculas de agua u otros compuestos.

La característica más relevante de las zeolitas es su porosidad uniforme y selectiva, que les otorga propiedades distintivas como la capacidad de intercambio iónico, adsorción selectiva de moléculas y actividad catalítica. Estas propiedades permiten su uso en una amplia variedad de aplicaciones industriales, tales como la separación y purificación de gases, catálisis en procesos petroquímicos, tratamiento de aguas residuales, captura de contaminantes y almacenamiento de gases.

Existen zeolitas de origen natural, formadas a lo largo de procesos geológicos, así como zeolitas sintéticas, diseñadas y optimizadas para aplicaciones específicas. La combinación de su estabilidad térmica y química con su estructura porosa hace de las zeolitas un material de gran relevancia en campos como la ingeniería química, ambiental y de materiales. [23]

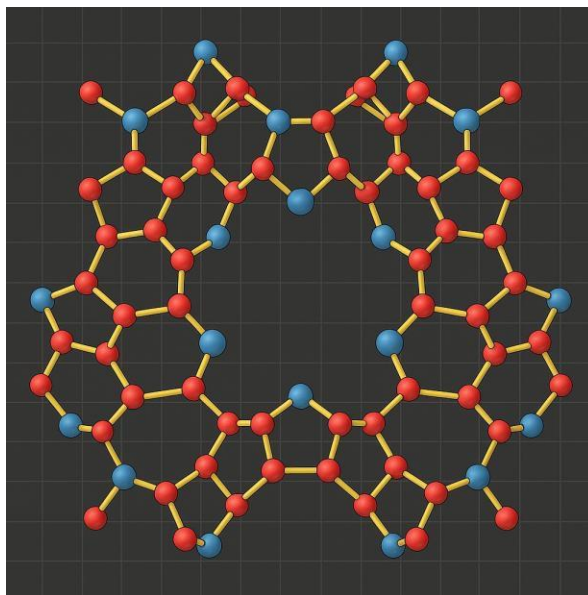


Figura 4. Estructura zeolitas [23]

6. Estado del arte

Para abordar el estado del arte en la captura y medición de emisiones de metano en bovinos, se realizó una revisión exhaustiva de los distintos métodos empleados a nivel mundial. Esta revisión abarca desde los sistemas de referencia, como las cámaras de respiración, hasta métodos alternativos y menos invasivos, como el trazado de hexafluoruro de azufre (SF₆) y el sistema GreenFeed.

El GreenFeed, en particular, representa un avance en la reducción del estrés en el animal durante la medición, dado que realiza la captura de gases en momentos específicos de la alimentación. Asimismo, se consideran tecnologías originalmente desarrolladas para otros sectores, como los detectores láser, que fueron diseñados para detectar fugas industriales pero que han sido adaptados para medir concentraciones de metano en entornos agropecuarios.

Por otro lado, se revisan técnicas de conversión de metano a biogás, la aplicación de métodos de imágenes ópticas para gases, y sistemas de detección remota de metano, todos ellos desarrollados para optimizar la precisión en la medición de las emisiones de gases y adaptarse a diferentes contextos de manejo y medición en el sector ganadero.

6.1 Cámaras de respiración:

Las cámaras de respiración son una tecnología precisa para la medición in vivo de metano entérico en rumiantes, utilizadas para obtener datos directos sobre la producción de gases en condiciones controladas (ver Figura 5)[24]. Este tipo de cámara opera bajo el principio de calorimetría indirecta de circuito abierto, permitiendo la entrada de aire externo que se mezcla con los gases exhalados por el animal. La mezcla se extrae mediante una bomba hacia un analizador de metano infrarrojo para su cuantificación.

El diseño incluye paneles térmicos y sistemas de control de temperatura y humedad (23 °C y 55 % HR, respectivamente) que garantizan un ambiente cómodo para el animal, minimizando su estrés [25]. El sistema de extracción mantiene una presión negativa (-500 Pa) en la cámara, asegurando que los gases no se escapen al exterior. Este enfoque permite obtener mediciones precisas, ya que controla las variables ambientales que podrían afectar los resultados.

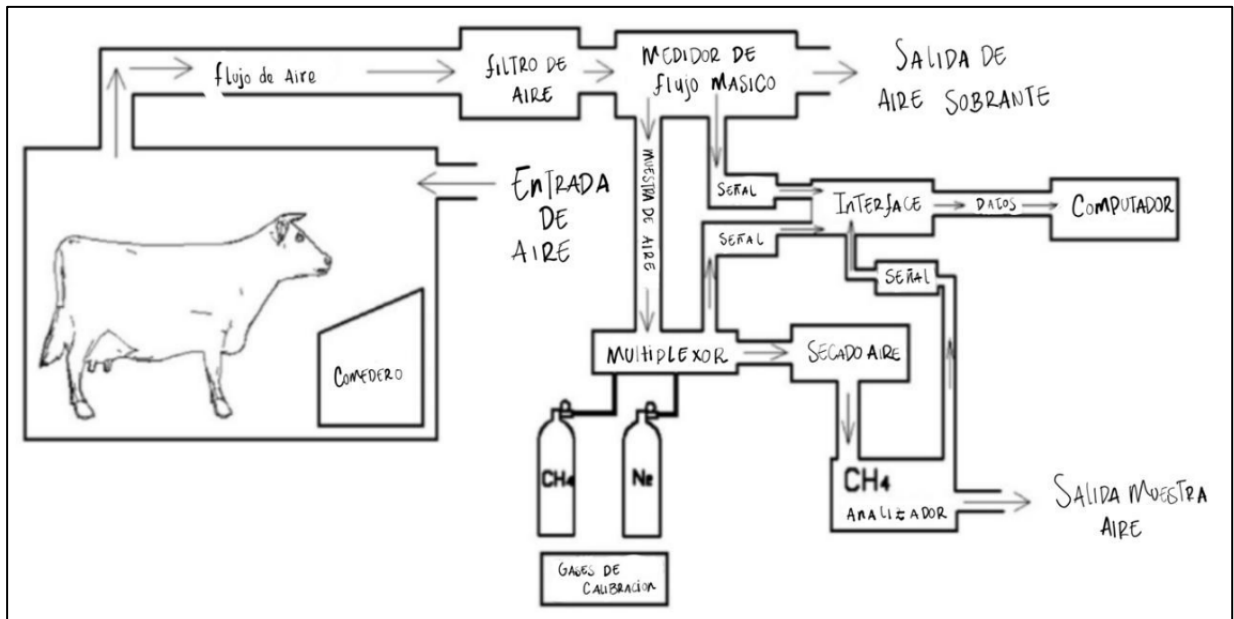


Figura 5. Cámara de respiración [25].

6.2 Método de trazado Hexafluoruro de azufre (SF_6):

Este método consiste en insertar un tubo de permeación o bolo en el retículo-rumen de la vaca para liberar un marcador, como SF_6 o CH_4 deuterado, a una tasa conocida (ver Figura 6). Durante el pastoreo, se recolecta continuamente el aliento del animal mediante un tubo cercano a la fosa nasal conectado a un cilindro evacuado.

Las concentraciones de SF_6 y CH_4 se cuantifican mediante cromatografía de gases. SF_6 es un gas trazador ideal por su alta detectabilidad y baja concentración en el ambiente, pero su precisión puede verse afectada por fallos en los equipos, emisiones de fondo, la experiencia técnica y la variabilidad en la tasa de liberación [26]. Estas limitaciones pueden mitigarse al integrar el método con tecnologías adicionales, como bolos electrónicos, collares de control del comportamiento, RFID y alimentadores inteligentes, lo que mejora la precisión y la integridad de los resultados [6][27].

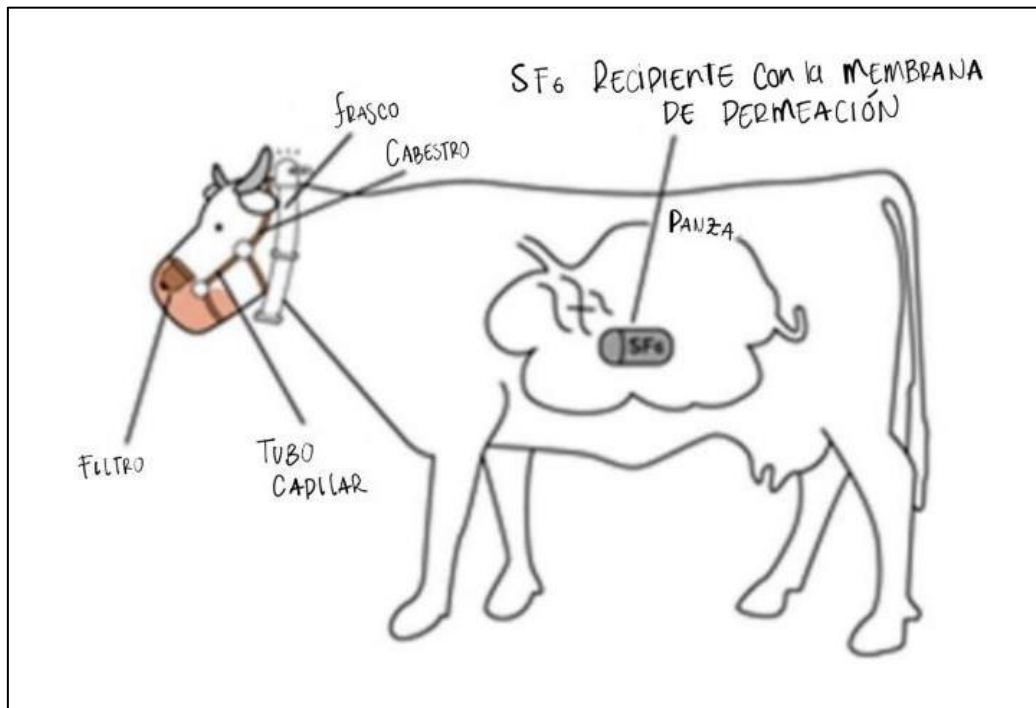


Figura 6. Método de trazado Hexafluoruro de azufre [6].

6.3 Greenfeed:

El sistema GreenFeed (GF) es una tecnología diseñada para medir las emisiones de metano en bovinos de forma precisa y no invasiva. Utiliza sensores que activan el muestreo de gases cuando el animal coloca su cabeza en una campana de muestreo (ver Figura 7). A través de un lector RFID y sensores de posición, el GF identifica al animal y asegura una captura continua de la respiración, fundamental para obtener datos precisos[19].

Para mantener al animal en la posición óptima y minimizar el estrés, el sistema dispensa pequeños incentivos de alimento, que motivan al animal a mantener la cabeza en la campana. Las emisiones se calculan considerando el flujo de aire, la diferencia en la concentración de gases y un coeficiente de calibración ajustado semanalmente [28]. Además, el sistema permite visitas controladas para asegurar que las mediciones sean representativas y repetibles. Esta tecnología ha sido implementada tanto en entornos controlados como en exteriores, adaptándose a las necesidades experimentales. En estudios de metano, el GF es valioso por su capacidad de obtener datos confiables sin alterar el comportamiento natural del animal, apoyando la investigación sobre emisiones y cambio climático.

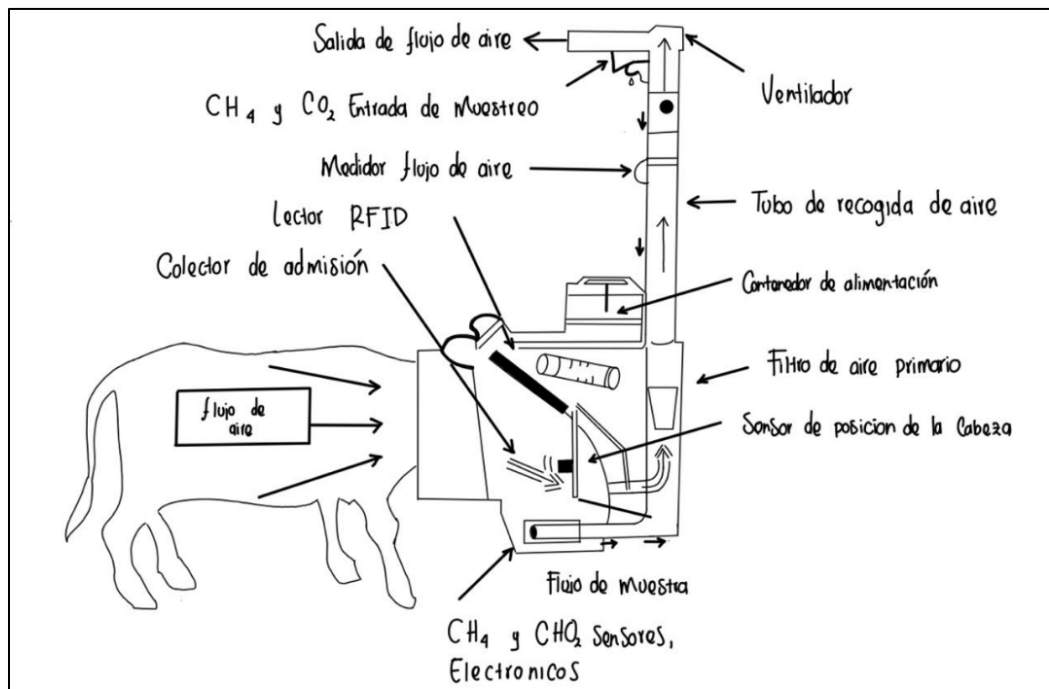


Figura 7. Sistema GreenFeed [28].

6.4 Detector laser CH₄:

El método láser para capturar metano utiliza un detector de metano por láser (LMD, por sus siglas en inglés) que mide concentraciones de metano en el aire exhalado por animales de forma no invasiva y en su entorno natural (ver Figura 8). Este dispositivo utiliza un láser de infrarrojos ajustado a la longitud de onda de absorción del metano (1.6537 μm), que permite una alta precisión sin interferencias de otros gases [18].

El LMD detecta picos de metano en el aire cuando el animal eructa o respira, diferenciando eventos de alta concentración (eructos) de niveles más bajos (respiración). A través de estos picos, se puede analizar el comportamiento de emisión de metano en períodos cortos, aunque se encontró que los mejores resultados se obtienen cuando las mediciones se realizan entre tres y cinco horas después de la alimentación.

El método ofrece ventajas para estudios en campo debido a su rapidez y facilidad de uso, aunque requiere un análisis detallado de los datos, ya que es necesario distinguir entre emisiones por eructos y respiración para obtener resultados precisos.

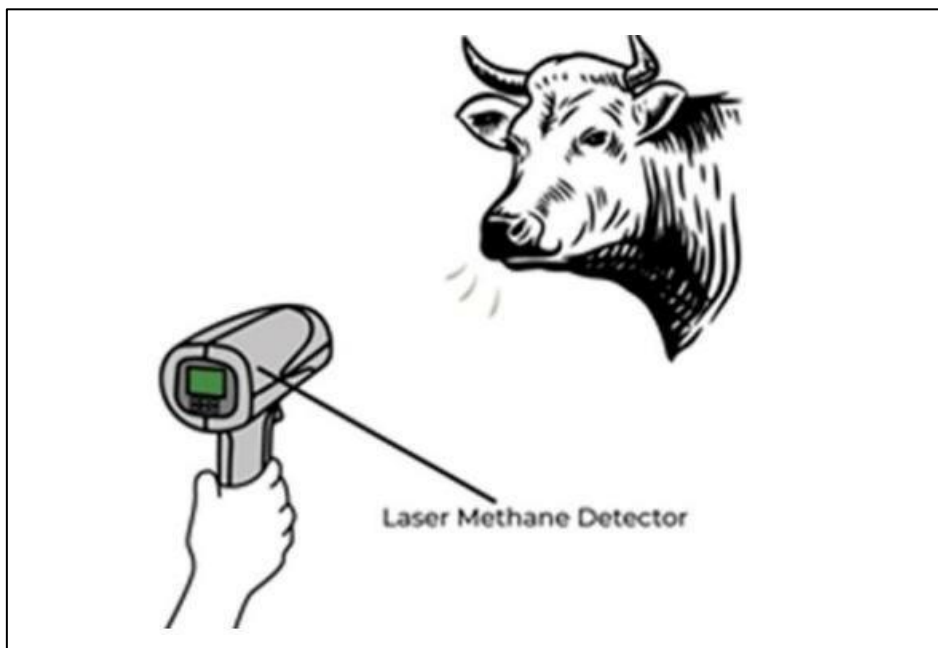


Figura 8. Detector laser CH₄ [4].

6.5 Metano a biogás:

El método de biogás para recuperación de metano se estructura en una serie de etapas para obtener biometano y reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Primero, el biogás se extrae de una fuente (como desechos orgánicos en digestores anaeróbicos) y luego se comprime, enfría y pasa por filtros para remover agua y contaminantes como el sulfuro de hidrógeno (ver Figura 9).

Una vez limpio, el gas se seca y se enfría en una unidad de licuefacción para separar el dióxido de carbono, que puede recuperarse en estado líquido. Esta fracción de CO₂ se reutiliza para purificar aún más el metano restante, removiendo también oxígeno y otros gases residuales. El producto final, el biometano, es altamente concentrado y adecuado como combustible en vehículos o para la producción de calor y energía. El dióxido de carbono separado se puede almacenar de manera segura, inyectándolo en formaciones geológicas para capturar carbono a largo plazo, o incluso reutilizarse en procesos de recuperación de petróleo, fomentando así prácticas sostenibles.

Este enfoque no solo permite una alta eficiencia en la captura de metano (superior al 98%) sino que también genera créditos de carbono por reducir las emisiones [11].

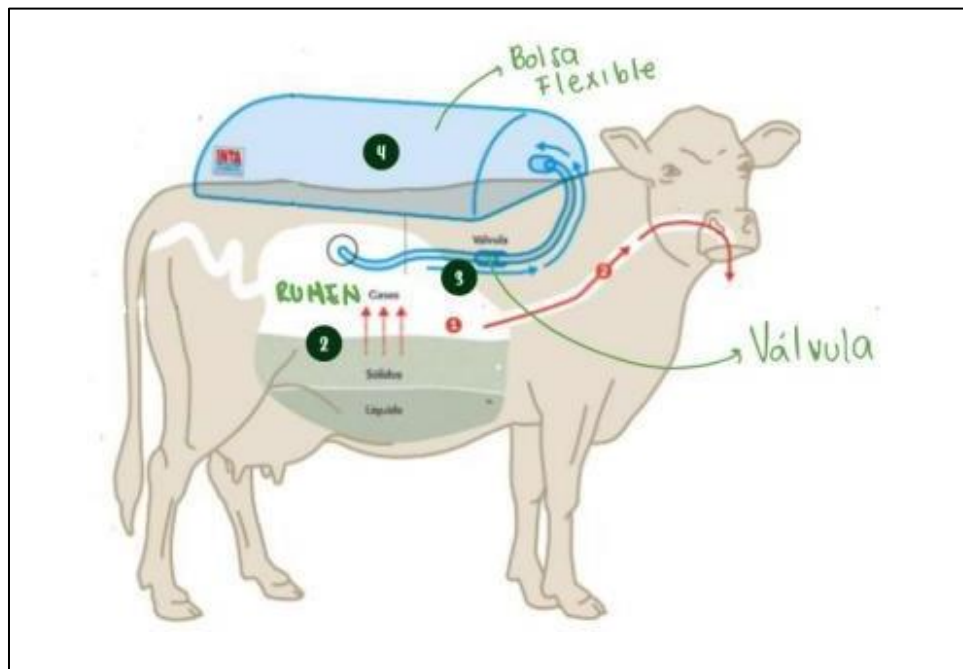


Figura 9. Metano a biogás [14].

6.6 Imágenes ópticas de gases:

El sistema de detección de fugas de metano mediante imágenes ópticas de gas (OGI) consiste en una cámara térmica que captura las emisiones de gas al identificar diferencias de temperatura entre el metano y el entorno circundante. Este dispositivo utiliza tecnología infrarroja para visualizar el gas, que es invisible al ojo humano, permitiendo detectar fugas de manera efectiva y en tiempo real. Además, el sistema integra sensores de temperatura que miden las condiciones ambientales, ya que la temperatura y la presión del aire pueden influir en la eficacia de la detección [29].

Cuando la cámara escanea el área, detecta las anomalías térmicas causadas por el metano, que es menos denso que el aire. Los datos recopilados se procesan para determinar la ubicación y la magnitud de las fugas, evaluando el límite de detección, que indica la menor cantidad de gas que el sistema puede identificar de manera confiable.

6.7 Sistema de detección de metano remoto:

El sistema de detección de metano remoto utiliza una red de sensores capaces de medir los niveles de metano en el ambiente donde se encuentran los bovinos. Estos sensores envían los datos a un servidor en la nube, donde se procesan para identificar concentraciones elevadas de gas.

Cuando se detectan niveles alarmantes, se generan alertas que pueden ser enviadas a dispositivos móviles o estaciones de monitoreo. El sistema también puede incorporar energía renovable, como paneles solares, lo que garantiza su funcionamiento continuo y sostenible, siendo una herramienta clave para la gestión de emisiones en la ganadería [13].

6.8 Comparación de sistemas:

La tabla comparativa de métodos de captura y medición de metano (ver Tabla 2) ofrece una visión detallada de sus principales características, ventajas y limitaciones. Sin embargo, este sigue siendo un problema de frontera sin una solución definitiva, dado que las mediciones actuales presentan valores inexactos e imprecisiones en la cuantificación de las emisiones. A continuación, se describen los distintos métodos, cada uno con un nivel de

adecuación diferente en relación con los requisitos de diseño establecidos, que incluyen precisión en la medición, no invasividad, portabilidad, costo y capacidad de operación en diversas condiciones ambientales.

La elección del método depende de la aplicación y de los recursos disponibles. Las cámaras de respiración y el sistema Greenfeed son los métodos que mejor cumplen con los requisitos de precisión y control de variables, pero presentan limitaciones en términos de costo y portabilidad. Los detectores láser y el método SF₆, en cambio, ofrecen soluciones prácticas para estudios en campo abierto, aunque requieren consideraciones adicionales para asegurar la exactitud de los datos obtenidos.

Método de Captura de Metano	Cámaras de respiración	Método de trazado con SF ₆	GreenFeed	Detector láser CH ₄	Metano a biogás	Imágenes ópticas de gases	Sistema de detección de metano remoto
Precisión	Alta	Media	Alta	Media	Media	Media	Baja
Invasividad	Alta	Media	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
Adaptabilidad (Interiores/Exteriores)	Solo interiores	Interiores y exteriores	Interiores y exteriores	Interiores y exteriores	Principalmente interiores	Interiores y exteriores	Principalmente exteriores
Costo	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo
Ventajas	Precisión en mediciones controladas, permite calorimetría indirecta	Versátil para distintos entornos, no requiere infraestructura compleja	No invasivo, mide mientras el animal se alimenta, reduce estrés	Rápido, fácil de usar, adecuado para estudios de campo	Permite conversión a biogás para aprovechamiento energético	Permite visualización de la dispersión de gases, no invasivo	No invasivo, adecuado para grandes áreas de pastoreo
Desventajas	Baja portabilidad, costo elevado	Requiere manejo especializado de trazadores, menor precisión	Costo moderado, requiere instalación y mantenimiento	Necesita análisis adicional para diferenciar emisiones de eructos y respiración	Requiere infraestructura y manejo especializado	Menor precisión en condiciones de viento o flujo de aire	Baja precisión en comparación con otros métodos

Tabla 2. Comparación métodos de medición y captura de CH₄, basado en [30]

7. Diseño Conceptual

7.1 Requerimientos de diseño:

Los requerimientos de diseño de este proyecto, orientado a la mejora del sistema de medición y captura de metano en bovinos, se originan en las necesidades del cliente y en las demandas de los grupos de interés. A partir de estos, se han definido características de ingeniería específicas y alcanzables, que aseguran que el diseño cumpla con los objetivos prácticos y proporcione soluciones aplicables y efectivas. En este caso, los requerimientos clave se clasifican en restricciones y especificaciones.

7.2 Requerimientos según la Normativa:

1. Según la Norma ISO10993 se debe evitar superficies punzantes o con bordes agudos en las partes de la máquina que tengan contacto directo o cercano con los animales, como el comedero o los canales de succión.
2. Según la Norma Técnica Colombiana NTC 5707 El ventilador de succión no debe sobrepasar los 60 dB en funcionamiento continuo, lo cual se considera un umbral aceptable para no inducir estrés en animales.
3. Según la guía técnica de la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria) Los sensores deben instalarse a una distancia tal que no interfieran con el comportamiento natural del animal ni generen incomodidad, pero que a su vez garanticen una medición precisa y sin obstrucción del parámetro objetivo.

7.3 Requerimientos:

Criterio 1: La máquina debe ser económicamente accesible para una amplia variedad de usuarios. Por ello, el diseño y la selección de materiales deben enfocarse en reducir los costos de producción sin comprometer la funcionalidad ni la calidad del sistema.

Criterio 2: El sistema debe contar con un funcionamiento automatizado, incluyendo sensores y un microcontrolador lógico programable (PLC). Además, debe permitir la visualización en tiempo real de los datos medidos por los sensores a través de una interfaz gráfica. Permite también el almacenamiento y análisis posterior de los datos registrados.

Criterio 3: Los materiales y el diseño deben cumplir con normativas de bienestar animal, evitando superficies reflejantes, esquinas agudas o formas que puedan generar estrés en los bovinos. Se deben priorizar acabados redondeados, superficies lisas y materiales de fácil limpieza, contribuyendo tanto al confort del animal como a la higiene del sistema.

Criterio 4: El sistema debe garantizar una alta resistencia estructural y durabilidad frente a condiciones ambientales adversas como humedad, exposición solar y contacto con agentes químicos utilizados en procesos de limpieza. Además, se debe considerar la resistencia mecánica del equipo frente a golpes y fuerzas aplicadas directamente por el bovino durante su interacción con el sistema, asegurando así su integridad funcional y una vida útil prolongada.

Con el objetivo de desarrollar un sistema de alimentación para bovinos que integre la medición precisa de emisiones de metano, se ha considerado no solo la capacidad del sistema para capturar con exactitud los datos, sino también su habilidad para visualizarlos en tiempo real y almacenarlos para su análisis posterior.

En la Figura 10, se presenta una gráfica que muestra el nivel de importancia asignado a cada uno de los criterios de diseño, considerando aspectos técnicos, económicos y de bienestar animal. Los resultados reflejan que el costo accesible (C1) y el cumplimiento de normativas de bienestar animal (C3) son los factores de mayor prioridad, seguidos por la automatización y capacidad de visualización de datos (C2), y finalmente, la resistencia estructural y mecánica del equipo (C4). Esta priorización permite un diseño equilibrado, funcional y alineado con las necesidades del sector agropecuario.

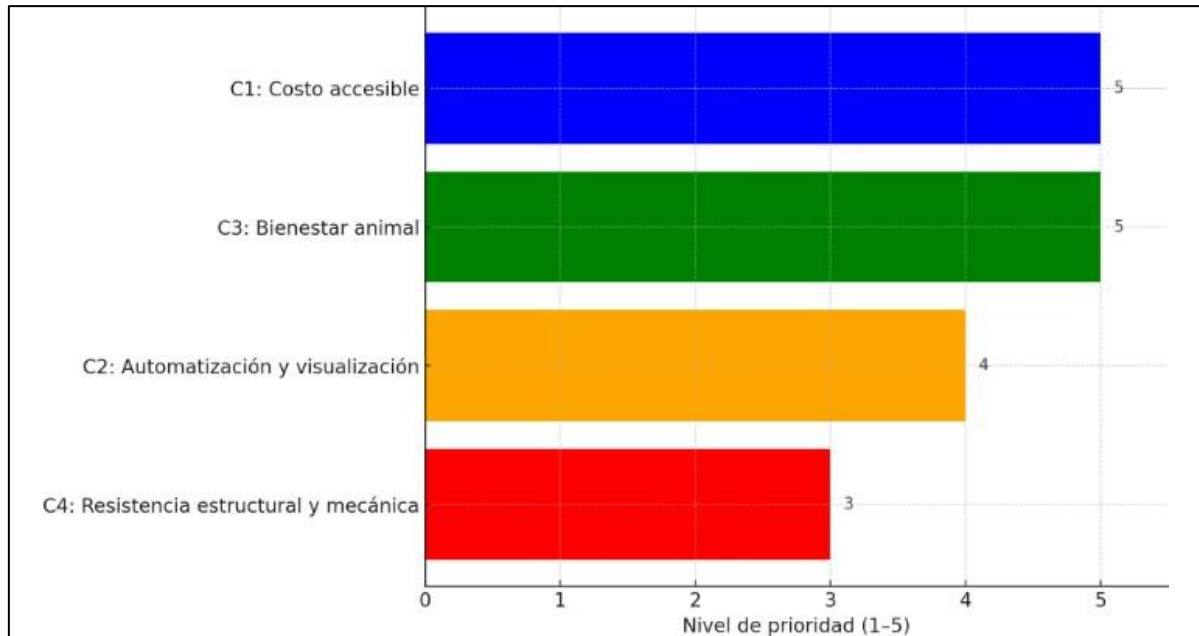


Figura 10. Valoración basada en la opinión propia de criterios de diseño para el sistema.

Como se observa en la Figura 10, los criterios C1 y C3 reciben la máxima prioridad (5), destacando la importancia de la accesibilidad económica y el cumplimiento de estándares de bienestar animal en el diseño del sistema. El criterio C2, que incluye la automatización y la capacidad de visualizar y analizar los datos capturados por los sensores, tiene también una prioridad alta (4), lo que evidencia la relevancia tecnológica del proyecto. Finalmente, C4 se considera con una prioridad media-alta (3), dada la necesidad de asegurar durabilidad frente a golpes, condiciones ambientales y fuerzas aplicadas por los animales.

7.3.1 Restricciones:

Las restricciones en este proyecto están influenciadas por temas económicos y sociales, así como por la normativa y los estándares de calidad en la industria de la ganadería y la medición de emisiones. Los principales puntos considerados incluyen:

1. **Costo del sistema:** Será fundamental mantener un costo accesible, utilizando materiales duraderos, pero de bajo costo, como polímeros o aceros inoxidable. El

diseño se mantendrá modular y simplificado para reducir costos y facilitar su ensamblaje. Asimismo, se incorporarán componentes electrónicos de precio razonable que permitirán una fabricación y mantenimiento económicos.

2. **Bienestar animal:** Dado que el diseño estará en contacto con el ganado, deberá respetar el bienestar animal evitando cualquier tipo de estrés. Se adoptará un diseño ergonómico que minimice el impacto en el animal durante su uso, y los sensores serán inalámbricos y de bajo impacto para garantizar el bienestar animal. Estos sensores estarán diseñados para no interferir con el comportamiento natural del animal, mientras que la comunicación inalámbrica permitirá una operación sin restricciones. Los materiales seleccionados serán no tóxicos para asegurar que no afecten la salud del animal.

7.3.2 Especificaciones:

Las especificaciones definidas por el cliente establecen los parámetros de desempeño que deben alcanzarse en el sistema para lograr precisión y funcionalidad:

1. **Precisión en la medición de metano entérico:** Para garantizar mediciones precisas, es fundamental utilizar materiales que no interfieran con los sensores, como los de tecnología NDIR (infrarrojo no dispersivo) o sensores de infrarrojo. El diseño debe permitir la correcta posición de los sensores y minimizar posibles fugas.
2. **Precisión de la captura:** El sistema debe estar sellado herméticamente para evitar la entrada de aire o contaminación que pueda distorsionar las lecturas. El diseño debe minimizar fugas y contar con un ambiente que garantice el flujo de aire estable para asegurar datos confiables.
3. **Durabilidad y resistencia del sistema:** El sistema debe resistir ambientes rurales, por lo que requiere materiales resistentes a la corrosión y un diseño

robusto. Los sensores deben ser capaces de operar en condiciones adversas, y el sistema debe estar alimentado por una fuente de energía que asegure un funcionamiento continuo. La sostenibilidad está asegurada con materiales de larga vida útil, y se favorece el uso de piezas duraderas que simplifiquen el mantenimiento.

4. **Fácil instalación y mantenimiento:** Para reducir el tiempo y costo de instalación, el sistema debe contar con materiales ligeros y modulares. El diseño debe permitir una fácil instalación, mientras que los sensores no deben requerir calibración frecuente. El uso de baterías recargables y un monitoreo a distancia facilita el mantenimiento, asegurando que el sistema sea accesible y rápido de reparar en caso necesario.

7.4 Análisis funcional:

En el análisis funcional de este sistema de medición y captura de metano en bovinos, se detallan las acciones necesarias para su correcto funcionamiento, desglosando los subsistemas y recursos esenciales. Este enfoque permite asegurar que cada función interactúe eficientemente para satisfacer los requisitos del cliente y cumplir con el objetivo de mejorar la precisión y efectividad en la captura de metano sin afectar el bienestar del animal.

7.4.1 Funciones principales:

1. **Medición de metano:** La función principal será la detección y cuantificación del metano emitido por los bovinos mediante eructos. Para ello, se utilizará un sistema de sensores de alta precisión (como NDIR o infrarrojo) que medirá las concentraciones de metano en el aire cerca de las fosas nasales, asegurando precisión y sensibilidad en las mediciones. La precisión en esta medición será

crítica para cumplir con los estándares de exactitud y fiabilidad requeridos por el cliente.

2. **Captura de metano:** Este subsistema trabajará en sincronía con el de medición, utilizando un control de flujo de aire que direccionará las emisiones hacia un área de captura. Este proceso será clave para garantizar que el gas se retenga adecuadamente en el sistema y se eviten pérdidas durante la captura.
3. **Control de flujo y ajuste a condiciones ambientales:** Las bombas de aire permitirán la circulación a caudales continuos pero ajustables (por ejemplo, de 100 a 250 L/min) para optimizar el flujo en función de las necesidades de la cámara y asegurar una medición estable. Además, el sistema contará con sensores de humedad relativa, temperatura y presión barométrica, instalados en cada cámara. Estos sensores permitirán ajustar los datos de flujo de aire a condiciones de temperatura y presión estándar, mejorando la precisión de las mediciones.
4. **Procesamiento y almacenamiento de datos:** Los datos recolectados por los sensores se enviarán a un módulo de procesamiento donde serán analizados y almacenados. Este módulo incluirá un sistema de comunicación inalámbrica para la transmisión de datos en tiempo real, lo cual permitirá al usuario final acceder a la información de forma remota.
5. **No estresar al animal:** El sistema de captura y medición de metano estará diseñado para minimizar el impacto en el comportamiento y bienestar del animal. Los métodos implementados serán no invasivos y permitirán que el animal se mueva y se alimente de manera natural durante el proceso de medición. Además, el diseño del sistema incluirá módulos de captura de datos discretos y silenciosos que reducirán la posibilidad de generar estrés. La infraestructura empleada evitará restricciones físicas innecesarias, permitiendo un monitoreo continuo sin interrumpir las actividades normales del animal.

7.4.2 Funciones secundarias:

1. **Mantenimiento de condiciones ambientales en las cámaras:** Para preservar el bienestar animal y la eficiencia de la medición, cada cámara mantiene un ambiente controlado y estable, ajustando la ventilación y la temperatura para reducir el estrés en los bovinos y evitar alteraciones en los resultados.
2. **Monitoreo del sistema:** Un subsistema de monitoreo permite verificar el correcto funcionamiento de los sensores, enviando alertas en caso de fallos y permitiendo el acceso remoto a los datos. Este sistema de comunicación inalámbrica facilita la supervisión constante sin intervención directa en las cámaras.
3. **Sostenibilidad y modularidad:** El sistema está diseñado con un enfoque modular, permitiendo que cada componente se reemplace de manera rápida y sencilla para facilitar el mantenimiento y extender la vida útil del equipo.

Cada función principal y secundaria se interrelaciona para cumplir con los requisitos del cliente. Por ejemplo, la precisión de la medición se ve reforzada por el control de flujo de aire en la captura, mientras que el monitoreo continuo y el modularidad en el diseño aseguran un funcionamiento sostenible y accesible. Este enfoque garantiza que el sistema no solo cumpla con la funcionalidad esperada, sino que también proporcione un servicio continuo, efectivo y respetuoso con el bienestar animal.

7.5 Diseño conceptual:

Se compararon los métodos presentados en el estado del arte y análisis funcional con los requerimientos de diseño (ver Tabla 3) y funcionales (ver Tabla 4), asignándoles una calificación de 5 para una alta correspondencia, 3 para media y 1 para baja. Como resultado, el sistema GreenFeed resultó ser el más adecuado para cumplir con los requisitos, debido a su carácter no invasivo y su capacidad para medir las emisiones de metano mientras el animal se alimenta en una estructura equipada con sensores. Este sistema destaca por su alta precisión y por minimizar el estrés en el animal. Además,

aunque su costo es moderado, es versátil y puede utilizarse en estudios tanto en interiores como en exteriores.

Por otro lado, las cámaras de respiración y los detectores láser se posicionan como las siguientes opciones más viables. Las cámaras de respiración ofrecen una elevada precisión para la medición in vivo en condiciones controladas, utilizando el principio de calorimetría indirecta de circuito abierto, lo cual permite la medición detallada de gases. Sin embargo, su alto costo y baja portabilidad limitan su aplicación en estudios de campo.

En cuanto al detector láser, emplea tecnología avanzada para detectar metano en el aire exhalado, lo que lo convierte en una opción rápida y fácil de usar, especialmente en estudios a campo abierto. No obstante, este método requiere un análisis detallado para diferenciar entre las emisiones de metano derivadas de los eructos y la respiración, lo cual puede representar un desafío en estudios de precisión.

Requerimientos	Cámaras de respiración	Método de trazado Hexafluoruro de azufre (SF6):	Greenfeed	Detector laser CH ₄	Metano a biogás	Imágenes ópticas de gases	Sistema de detección de metano remoto
Costo del sistema	5	3	4	3	5	3	1
Bienestar animal	3	3	5	5		5	3
Precisión en la medición de metano entérico	5	3	5	3		3	1
Precisión de la Captura	5	3	5	3	5	3	1
Durabilidad y Resistencia del Sistema	5	5	5	5	5	5	5
Fácil Instalación y Mantenimiento	1	3	5	5	1	3	5
TOTAL	4,00	3,33	4,83	4,00	2,67	3,67	2,67

Tabla 3. Métodos vs Requerimientos de diseño.

Con base en la comparación de los métodos con los requerimientos de diseño y el análisis frente al análisis funcional (ver Tabla 4), el diseño se fundamenta en el concepto del sistema GreenFeed (ver Figura 11), el cual mide las emisiones de metano durante la alimentación del bovino, uno de los momentos de mayor emisión de este gas [18]. En este sistema, el animal se encuentra en una cámara controlada donde se permite el flujo de aire del exterior hacia el interior, lo que facilita la mezcla de los gases exhalados por el animal con el aire circundante. Este flujo de aire, al salir de la cámara, se dirige a un analizador que mide con precisión las concentraciones de gases de interés, como metano y dióxido de carbono.

	Cámaras de respiración	Método de trazado Hexafluoruro de azufre (SF6):	Greenfeed	Detector laser CH4	Metano a biogás	Imágenes ópticas de gases	Distema de detección de metano remoto
Medición de Metano	5	3	5	3		3	2
Captura de Metano	1	1	1	1	5	1	1
Control de Flujo y Ajuste a Condiciones ambientales	5	1	3	1		1	1
Procesamiento y Almacenamiento de Datos	2	2	5	3	5	2	4
No estresar el animal	3	3	5	5		5	5
Mantenimiento de Condiciones Ambientales en las Cámaras	5	1	3	1		1	1
Monitoreo del Sistema	2	1	5	4		4	4
Sostenibilidad y Modularidad	2	3	5	3	5	3	5
TOTAL	3,1	1,9	4,0	2,6	1,9	2,5	2,9

Tabla 4. Métodos vs análisis funcional

Adicionalmente, se integra la metodología de las cámaras de respiración mediante un sistema de calorimetría indirecta de circuito abierto, sin embargo, comparado con las cámaras de respiración y el sistema GreenFeed del mercado, nuestro sistema es más económico, lo que no solo ahorra dinero, sino que permite la implementación en masa, así pues se puede garantizar una visión más real de las emisiones globales generadas por bovinos actualmente, en consecuencia, desarrollara políticas ambientales más eficaces y acciones más efectivas sobre el cambio climático.

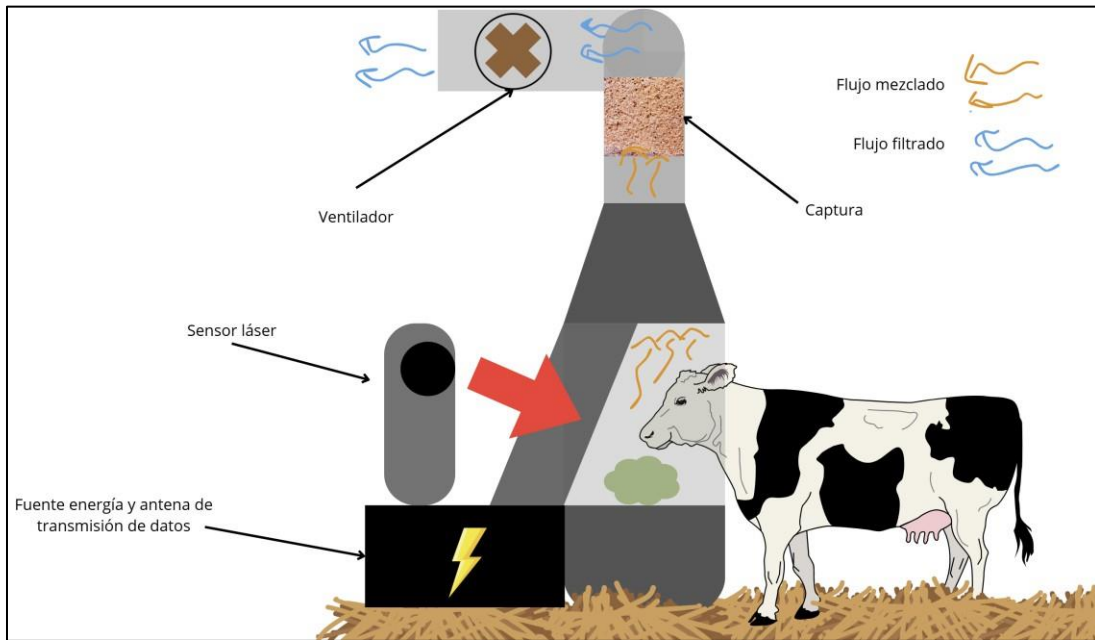


Figura 11. Diseño concep

8. Metodología

Objetivo 1. Determinar los requerimientos necesarios para la medición y captura de metano en bovinos, a través de la revisión de diseños existentes.

Para alcanzar este objetivo, se aplicó una metodología mixta que integró enfoques cualitativos y cuantitativos con el fin de identificar los requisitos funcionales, operativos y ergonómicos de los sistemas de medición de metano actualmente en uso.

Desde el enfoque cualitativo, se llevaron a cabo entrevistas semiestructuradas con investigadores, técnicos ganaderos y diseñadores de sistemas de monitoreo ambiental. Estas entrevistas permitieron identificar tendencias tecnológicas, desafíos técnicos comunes y criterios de éxito de los diseños implementados en otros contextos productivos.

En el componente cuantitativo, se realizó una revisión sistemática de literatura científica, patentes y reportes técnicos disponibles en bases de datos especializadas. El análisis se enfocó en parámetros como sensibilidad de sensores, eficiencia de captura, durabilidad de materiales y compatibilidad con entornos rurales. La información se organizó en matrices comparativas para establecer los requerimientos mínimos necesarios para el diseño del sistema a desarrollar.

Objetivo 2. Diseñar un sistema mecánico y de ventilación que permita la captura de las emisiones de gases exhalados por los bovinos.

El diseño del sistema contempló tanto criterios funcionales como ergonómicos, con énfasis en la no invasividad para el animal y la eficiencia de captura del metano. La metodología se basó en un enfoque de diseño centrado en el usuario (el animal),

complementado con herramientas de ingeniería de diseño asistido por computadora (CAD).

En la primera fase, se realizó un análisis de antecedentes mediante la recopilación de especificaciones de diseños previos y un estudio morfológico del animal, para definir los límites de tamaño y forma del dispositivo. Posteriormente, se desarrollaron modelos digitales en software CAD para simular la interacción del dispositivo con el bovino y validar parámetros de peso, forma, ventilación y comodidad.

Las actividades incluyeron:

- Elaboración de bocetos y modelado 3D de la cámara de captura y sistema de ventilación.
- Análisis de flujo de aire mediante dinámica de fluidos computacional (CFD).
- Evaluación de materiales ligeros y resistentes adecuados para contacto animal.
- Ensamble virtual de los componentes para verificar integración mecánica.

Objetivo 3. Seleccionar un módulo de medición y captura molecular del metano.

Este objetivo se abordó mediante una metodología técnico-comparativa, centrada en la identificación y evaluación de sensores y módulos de captura adecuados para gases traza en entornos ganaderos.

El enfoque cualitativo incluyó la revisión de fichas técnicas de sensores comerciales, así como consultas con expertos en electrónica y análisis de gases, para comprender el desempeño y limitaciones de sensores como NDIR, PID y MOS en condiciones variables de temperatura, humedad y presencia de otros gases.

Desde el enfoque cuantitativo, se aplicó un análisis multicriterio para seleccionar el sensor más adecuado en función de: sensibilidad (ppm), tiempo de respuesta, rango de operación, consumo energético y costo. Se realizaron pruebas de calibración en laboratorio, comparando el rendimiento de los sensores seleccionados frente a estándares conocidos de concentración de metano.

Objetivo 4. Validar mediante simulaciones computacionales, los esfuerzos mecánicos y el flujo volumétrico en componentes críticos del sistema.

La validación del sistema se realizó mediante simulaciones computacionales, empleando herramientas de análisis estructural y dinámica de fluidos para garantizar la resistencia mecánica y eficiencia del flujo de captura de gases.

Para evaluar los esfuerzos mecánicos, se aplicó el método de elementos finitos (FEM), simulando condiciones de uso real (presión, impacto, torsión) sobre las piezas del sistema. Los resultados permitieron ajustar dimensiones y seleccionar materiales que evitaran fallas por fatiga o deformaciones.

En paralelo, se realizó un análisis de flujo volumétrico y distribución de gases mediante simulaciones CFD, modelando el entorno respiratorio del animal y los caudales inducidos por el sistema de ventilación. Se evaluaron distintos escenarios de respiración, condiciones ambientales y configuraciones geométricas, identificando puntos críticos de turbulencia o pérdida de eficiencia.

9. Resultados y Discusión

9.1 Determinación del material y el método de obtención:

En este apartado se expone la selección de los sistemas de captura, medición, entre otros. Asimismo, se define el material a utilizar, tomando en cuenta criterios establecidos tanto por normativas relacionadas con el bienestar animal como por aquellas aplicables a la estructura y a la reducción de gases de efecto invernadero. Para una mejor comprensión, se detallan estos aspectos en los siguientes ítems.

9.2 Selección de materiales:

9.2.1 Tuberías:

Con base en los criterios establecidos para el método de selección de materiales aplicables a las tuberías, se evaluaron cinco materiales utilizando seis criterios (ver Tabla 5). Cada criterio fue calificado en una escala del 1 al 5, donde 1 representa una valoración muy desfavorable y 5 una muy favorable. A través de una matriz comparativa, se asignaron puntajes a cada material, y el que obtuvo la puntuación total más alta fue seleccionado como el más adecuado.

Material	Normativas animales	Resistencia mecánica	Durabilidad	Impacto ambiental	Costo	Instalación	Total
Acero inox.	4	5	5	3	2	2	21
PVC	5	4	5	5	5	5	29
PEAD	5	4	5	4	4	5	27
PP	5	4	5	4	4	5	27
Cobre	3	5	5	3	2	2	20

Tabla 5. Comparación de materiales para el ducto

Tras la evaluación comparativa de cinco materiales mediante una matriz de criterios técnicos, normativos y ambientales, el PVC obtuvo la puntuación más alta, posicionándose como el material más adecuado para la fabricación de las tuberías del sistema.

Uno de los factores decisivos en su selección fue su bajo costo en comparación con otros materiales como el acero inoxidable o el cobre. Esta característica es especialmente relevante considerando que uno de los objetivos principales del proyecto es desarrollar una máquina accesible al público, tanto en términos de producción como de adquisición. Al elegir un material económico como el PVC, se contribuye directamente a la reducción del costo total de fabricación, lo que facilita su disponibilidad y adopción por parte de un mayor número de usuarios.

Además, el PVC presenta una buena resistencia, es fácil de instalar y cumple con los requisitos básicos de normativas relacionadas con el bienestar animal y sostenibilidad ambiental, consolidándose como una opción equilibrada entre desempeño, economía y accesibilidad.

9.2.2 Cabina:

Esta tabla compara cinco materiales potenciales para la construcción de la caja que sostiene la estructura de la campana de vacas (ver Tabla 6). Se evalúan propiedades clave como el peso específico, la resistencia a la corrosión, la resistencia mecánica y la facilidad de fabricación. Se asignaron valores del 1 al 5 a cada propiedad, donde 5 representa el mejor desempeño.

Material	Peso específico (g/cm ³)	Resistencia a la corrosión	Resistencia mecánica	Facilidad de fabricación	Total
Aluminio	2.7	4	3	4	11
Acero inoxidable	8	4	4	2	10
Acero galvanizado	7.85	3	3	3	9
Plástico reforzado (FRP)	1.8	4	3	3	10
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0.95	5	2	4	11

Tabla 6. Comparaciones materiales para la caja base.

Los materiales con mejor puntuación global son el aluminio y el polietileno de alta densidad (HDPE), ambos con un total de 11 puntos. No obstante, el aluminio ofrece un equilibrio superior entre resistencia mecánica y peso, lo cual lo hace más adecuado para estructuras que requieren rigidez y durabilidad sin añadir peso excesivo. Por ello, se considera una opción óptima para la estructura de la campana.

Esta tabla analiza diferentes tipos de aluminio disponibles en el mercado (1060, 5052, 6061 y 7075) para seleccionar el más adecuado en la fabricación de la caja estructural (ver

Tabla 7). Se evaluaron propiedades como la composición de aluminio, resistencia mecánica, soldabilidad y resistencia a la corrosión, con calificaciones del 1 al 5.

Tipo de Aluminio	Composición (%) Al	Resistencia mecánica	Soldabilidad	Resistencia a la corrosión	Total
1060	≥99.6%	2	5	4	11
5052	≥95.7%	3	3	4	10
6061	≥95.8%	4	3	3	10
7075	87.1–91.4%	5	2	3	10

Tabla 7. Comparación aluminios para la caja base.

El aluminio tipo 1060 obtuvo la puntuación más alta (11 puntos), destacándose por su alta pureza ($\geq 99.6\%$), excelente soldabilidad y buena resistencia a la corrosión, aunque con menor resistencia mecánica, por lo que se recomienda el uso de láminas con un calibre de 2- 3 mm. Esta combinación lo convierte en el candidato ideal para aplicaciones donde se prioriza la facilidad de manufactura, bajo peso y durabilidad frente a condiciones ambientales, como es el caso de la estructura de esta máquina.

9.2.3 Carcasa estructural de la campana:

Según las normativas de bienestar animal, como el Decreto 2113 de 2017 y la Resolución 253 de 2020, es fundamental garantizar que los materiales y el diseño de las instalaciones minimicen el estrés de los animales. En particular, los bovinos pueden verse afectados por superficies reflectivas, ya que los reflejos pueden causarles ansiedad. Además, las formas cuadradas y con esquinas puntiagudas también pueden generar incomodidad, ya que estos animales se sienten más a gusto con estructuras de líneas suaves y redondeadas. Por lo tanto, es crucial elegir materiales que puedan ser moldeados a través de procesos de manufactura para crear superficies sin reflejos y con formas suaves, lo que contribuye a un ambiente más seguro y menos estresante para los bovinos.

A diferencia del acero, el aluminio es considerablemente más liviano, lo que facilita el traslado e instalación del equipo sin requerir maquinaria pesada. Esta característica es especialmente valiosa en entornos rurales, donde la practicidad y la agilidad operativa son fundamentales.

Criterio	Acero Inoxidable	Aluminio	Plástico	Acero Carbono	Hierro Fundido
Durabilidad	9	7	5	8	6
Resistencia a la corrosión	10	6	5	7	4
Costo	6	8	9	7	5
Facilidad de fabricación	7	8	9	7	6

Resistencia a la tracción	9	7	4	8	7
Peso	3	9	10	7	8
Total	44	45	42	44	36

Tabla 8. Comparativa materiales para comedor de la vaca.

No obstante, su mayor ventaja radica en su excelente resistencia a la corrosión. A diferencia del acero, que tiende a oxidarse con la exposición a la humedad, el aluminio soporta sin inconvenientes el agua, el estiércol y las condiciones climáticas adversas. Esto se traduce en una estructura más duradera, con menor necesidad de mantenimiento, reducción de costos operativos y mayor confiabilidad a largo plazo.

Adicionalmente, el aluminio representa una opción más segura para los animales. Su estructura puede diseñarse con bordes redondeados y suaves, y su bajo peso reduce el riesgo de lesiones ante movimientos bruscos o caídas accidentales del equipo.

Luego de seleccionar el aluminio como el material más adecuado para la fabricación del comedero, se procedió a evaluar qué tipo de aleación de aluminio cumple mejor con los requisitos del proyecto (ver Tabla 9.). Para ello, se analizaron propiedades clave como la facilidad de deformación, la resistencia a la corrosión, la soldabilidad y el peso. Estos criterios fueron comparados en una tabla que destaca las características más relevantes de diferentes materiales, y permite identificar cuál es la opción más apta para satisfacer las exigencias del entorno ganadero.

Propiedad	Aluminio 6061	Aluminio 3003	Aluminio 1050	Aluminio 1060
Peso específico (g/cm ³)	2.70	2.73	2.71	2.70
Resistencia a la corrosión	Buena	Moderada	Muy buena	Excelente
Formabilidad	Media	Buena	Buena	Muy alta
Soldabilidad	Buena	Buena	Buena	Excelente
Costo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Conductividad térmica (W/m·K)	167	174	235	237

Resistencia mecánica (aprox.)	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
-------------------------------	------	----------	------	----------

Tabla 9. Comparación de aleaciones de aluminio para la campana.

La resistencia mecánica del Aluminio 1060 es relativamente baja en comparación con otras aleaciones como el 6061 o el 3003, su desempeño estructural ha resultado adecuado para soportar el peso de la máquina, según lo indica la simulación que se presentará más adelante. Esto demuestra que, para esta aplicación específica, la alta resistencia no es el único factor determinante.

Además, el Aluminio 1060 ofrece varias ventajas importantes que lo hacen una opción óptima para la campana: excelente resistencia a la corrosión, ideal para ambientes agropecuarios; muy alta formalidad, lo que facilita los procesos de manufactura; bajo costo, contribuyendo a la viabilidad económica del proyecto; y buena conductividad térmica, que puede ser un valor añadido dependiendo de las condiciones de operación. Por lo tanto, a pesar de su menor resistencia mecánica, el Aluminio 1060 se posiciona como la mejor elección cuando se consideran en conjunto los factores estructurales, económicos y de fabricación.

9.2.4 Compartimiento de alimento:

Con el objetivo de seleccionar el material más adecuado para la fabricación del comedero, se desarrolló una matriz comparativa basada en criterios técnicos, económicos y ambientales (ver Tabla 10). Los materiales evaluados fueron: HDPE (Polietileno de Alta Densidad), acero inoxidable, PVC, polipropileno (PP) y cobre. Cada uno fue calificado en una escala del 1 al 5, donde 1 representa una valoración muy desfavorable y 5 muy favorable, en relación con criterios como resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, impacto ambiental, costo y facilidad de instalación.

Esta metodología permitió realizar una comparación objetiva entre los materiales, facilitando la identificación de la opción más viable para cumplir con los requisitos funcionales del sistema y los principios de accesibilidad económica y sostenibilidad del proyecto.

Material	Resistencia mecánica	Durabilidad	Resistencia a la corrosión	Impacto ambiental	Costo	Facilidad de instalación	Total
HDPE (Polietileno de alta densidad)	5	5	5	4	5	5	29
Acero inoxidable	5	5	5	3	3	3	24
PVC	3	3	3	4	5	5	23
PP	4	4	4	4	4	5	25
Cobre	4	5	4	2	2	3	20

Tabla 10. Comparación materiales para el comedero.

El análisis comparativo de materiales para el comedero muestra que el HDPE (polietileno de alta densidad) es el material más adecuado, obteniendo la mayor puntuación total (29 puntos). Este material destaca particularmente por su excelente resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la corrosión, lo cual es fundamental para un entorno agropecuario donde el contacto constante con humedad, alimentos y animales puede acelerar el desgaste de los materiales.

Además, el HDPE es un material inofensivo al contacto con el bovino, ya que es químicamente estable, no tóxico y comúnmente utilizado en aplicaciones alimentarias, lo que permite cumplir con normas sanitarias y de inocuidad. Su alta resistencia química facilita el uso de productos de limpieza agresivos sin riesgo de degradación del material, lo que garantiza una limpieza efectiva y segura. Esta característica, combinada con su superficie lisa, evita la acumulación de residuos y la proliferación de bacterias, aspectos críticos en la sanidad del ganado.

En cuanto al impacto ambiental, aunque no es biodegradable, el HDPE es reciclable, y su larga vida útil lo convierte en una opción sostenible frente a materiales con mayor impacto como el cobre. También ofrece ventajas en términos de costo y facilidad de instalación, lo que lo hace viable no solo desde el punto de vista técnico, sino también económico.

9.3 Selección del método de captura:

La tabla presentada compara diferentes métodos para la captura y tratamiento de metano, evaluando su eficacia, costos, aplicaciones y características (ver Tabla 11). Dentro de este contexto, la Adsorción con materiales porosos, específicamente las zeolitas, emerge como una opción destacada debido a sus múltiples ventajas.

Método	Efectividad	Costo	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas	Total
Adsorción con materiales porosos	3	2	3	3	2	13
Absorción en líquidos	2	2	2	2	2	10
Biocaptura con microorganismos	1	3	2	2	1	9
Oxidación catalítica	3	1	2	3	1	10
Separación por membranas	2	2	2	2	2	10
Compresión y licuefacción (GNL)	3	1	3	3	1	11

Tabla 11. Comparación métodos de captura de metano.

Las zeolitas (ver Figura 12) representan una solución altamente eficaz y sostenible para la captura de metano, gracias a una combinación de propiedades técnicas y operativas que las distinguen frente a otros métodos. Su alta capacidad de adsorción, con eficiencias que pueden alcanzar hasta el 90%, permite retener grandes volúmenes de metano de manera confiable. Además, su selectividad frente al metano garantiza un proceso más limpio y preciso, minimizando interferencias de otros gases presentes en la mezcla.

Una de sus ventajas más destacadas es su regenerabilidad, ya que pueden ser reutilizadas mediante tratamientos térmicos o químicos, reduciendo el impacto ambiental y los costos operativos a largo plazo. A esto se suma su bajo consumo energético, ya que no requieren procesos complejos como presurización extrema o refrigeración, lo que las hace ideales para aplicaciones donde la eficiencia energética es prioritaria.

Desde el punto de vista económico y práctico, las zeolitas ofrecen un costo moderado y una alta escalabilidad, siendo más accesibles que tecnologías como la oxidación catalítica, que implican el uso de metales nobles. Finalmente, su versatilidad industrial las convierte

en una herramienta clave para el tratamiento y almacenamiento de gases, adaptándose fácilmente a diferentes entornos y necesidades operativas.

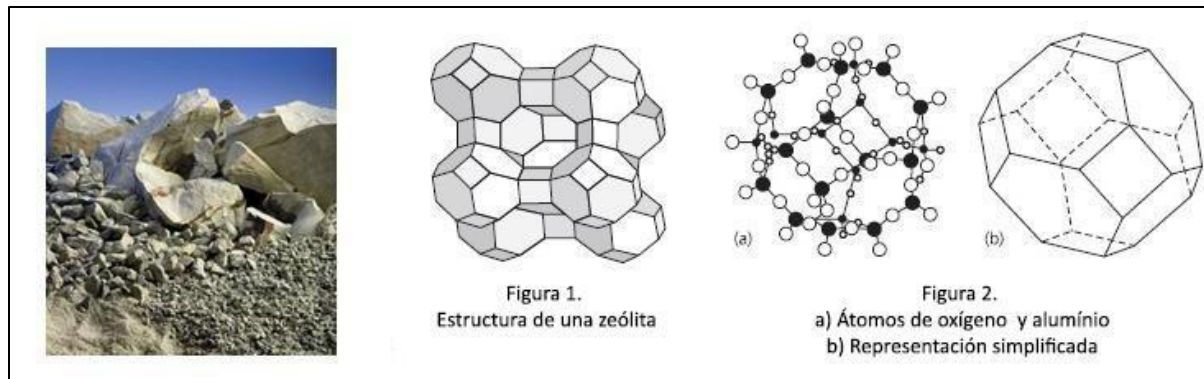


Figura 12. Estructura y composición de las zeolitas[31].

Las zeolitas, según diversos estudios e investigaciones recientes, se perfilan como una opción altamente eficiente para la captura de metano, gracias a sus características mencionadas antes. Sin embargo, es importante destacar que existen diferentes tipos de zeolitas, tanto naturales como sintéticas, cada una con propiedades estructurales y químicas específicas que influyen en su rendimiento (ver Tabla 12). Factores como el tamaño de poro, la composición química y el grado de acidez determinan su capacidad de adsorción y selectividad frente al metano.

La zeolita 13X se destaca como una de las opciones más eficaces para la captura de metano (ver Tabla 12), principalmente debido a su amplio tamaño de poro, que facilita una adsorción altamente eficiente de este gas. Esta zeolita pertenece a la familia faujasita (tipo X) y presenta un diámetro de poro efectivo de aproximadamente 8 a 10 Ångstroms (0.8–1.0 nm), lo que la clasifica como una zeolita de poro grande.

El metano es una molécula pequeña y no polar, con un diámetro cinético cercano a 3.8 Å, lo que le permite ingresar sin dificultad en la estructura porosa de la zeolita 13X. Esta compatibilidad dimensional, junto con su alta área superficial y su elevada capacidad de adsorción, permite que las moléculas de metano sean capturadas eficazmente en el interior de su red cristalina, sin obstrucciones ni restricciones espaciales.

Zeolita	Tamaño de poro (Å)	Área superficial (m²/g)	Estabilidad térmica	Capacidad de adsorción de CH₄	Justificación
ZSM-5	5.3 – 5.6	350 – 450	Alta	Moderada	Buena estabilidad y selectividad, pero su estructura estrecha limita la difusión de CH ₄ .
Zeolita 13X	7.4	600 – 800	Alta	Alta	Mayor tamaño de poro y área superficial, ideal para capturar grandes cantidades de CH ₄ .
Zeolita A	4.1 – 4.2	400 – 500	Moderada	Baja	Poros muy pequeños, limita el acceso del metano.
Zeolita Y	7.4	700 – 900	Alta	Alta	Muy buena capacidad, aunque menos selectiva que la 13X.
Clinoptilolita (natural)	4 – 7	100 – 200	Media	Baja moderada	Económica, pero con baja capacidad comparada con zeolitas sintéticas.

Tabla 12. Comparación tipos de zeolitas.

Además, la alta estabilidad térmica de la zeolita 13X la hace especialmente adecuada para su uso en entornos industriales exigentes, como procesos de separación de gases o sistemas de almacenamiento. En comparación con otras zeolitas, la 13X ofrece un equilibrio sobresaliente entre eficiencia de captura, capacidad de adsorción y versatilidad operativa, lo que la convierte en una solución óptima para aplicaciones relacionadas con el tratamiento y aprovechamiento del metano.

9.3.1 Capacidad de captura:

La zeolita 13X ha demostrado ser una de las opciones más eficaces para la captura de metano (CH_4) gracias a su alta capacidad de adsorción, buen comportamiento cinético y estabilidad térmica. En el estudio "Adsorption of CO_2 , CH_4 and H_2 onto zeolite 13X: Kinetic and equilibrium studies", se presentan datos clave que sustentan esta afirmación.

En primer lugar, las isothermas de adsorción (ver Figura 13) revelan que la zeolita 13X puede adsorber hasta 2.2 mmol/g de CH_4 a 303 K y 0.8 atm, lo que equivale aproximadamente a un 3.5 % de su peso. A presiones mayores, como las empleadas en procesos industriales (por ejemplo, 5–10 atm), se alcanzan capacidades de adsorción de hasta 4.4 mmol/g, o cerca de 7 % en peso, lo que refleja una eficiencia considerable para un gas tan poco polar como el metano.

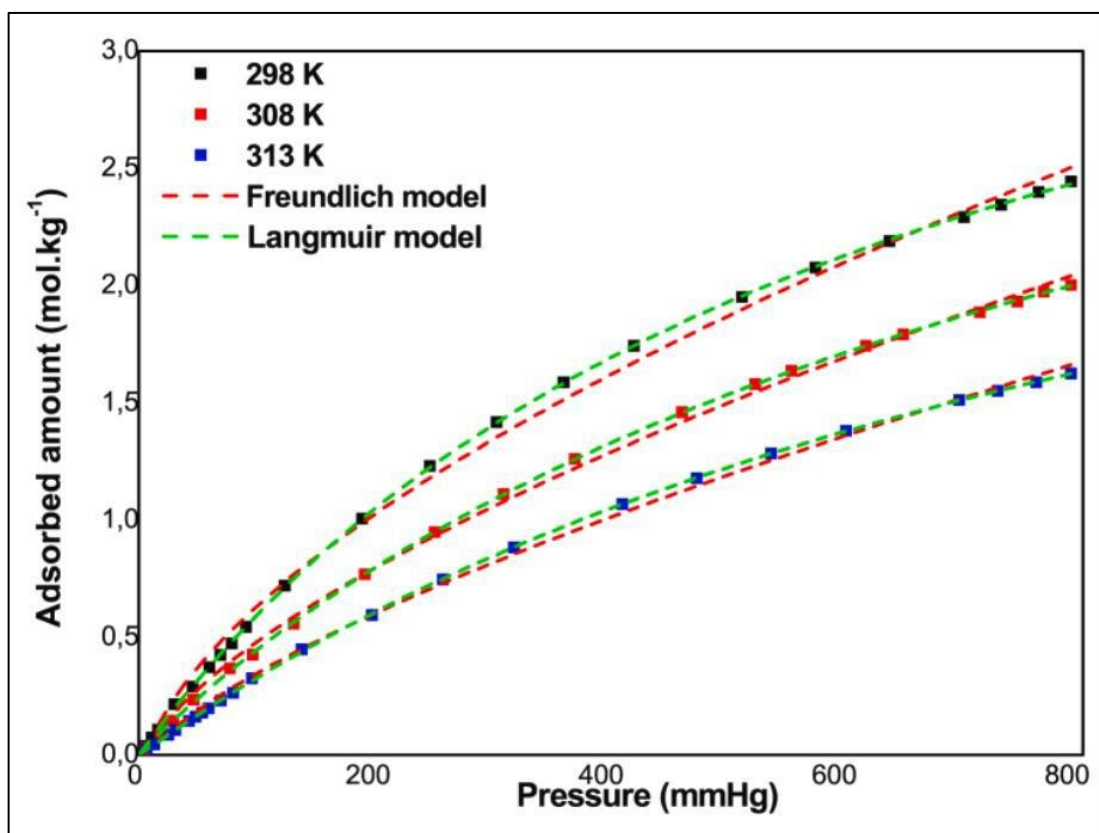


Figura 13. Comportamiento adsorción zeolita 13X [31].

Por otro lado, las curvas cinéticas de adsorción (ver Figura 14) indican que la zeolita 13X alcanza el equilibrio de adsorción en pocos minutos, lo cual es ideal para aplicaciones en procesos cíclicos como la adsorción por oscilación de presión (PSA). Esto significa que no solo tiene buena capacidad, sino que además captura el metano de forma rápida y efectiva.

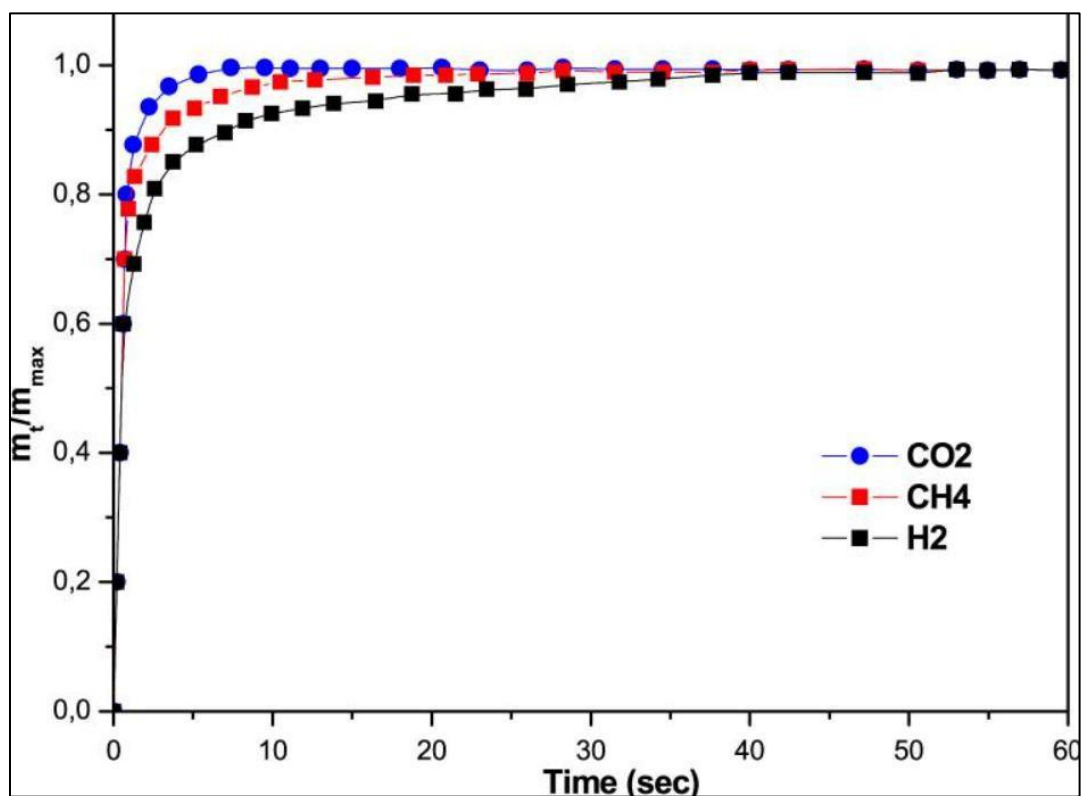


Figura 14. Curva cinética adsorción [31].

La gráfica de difusividad (ver Figura 15) muestra el comportamiento de adsorción normalizada (m_t/m_{max}) de distintos gases CO_2 , CH_4 y H_2 en función del tiempo. En esta figura se observa que el CH_4 (metano), representado por cuadrados rojos, alcanza una fracción de masa adsorbida cercana al valor máximo en un tiempo comparable al del CO_2 y superior al del H_2 . Esto indica que el metano presenta una movilidad intermedia, mayor que la del CO_2 pero menor que la del H_2 , lo cual sí permite hacer inferencias válidas sobre su capacidad de difusión dentro de la estructura de la zeolita 13X.

Aunque el metano es una molécula más grande y menos polar que el CO_2 , la curva demuestra que logra difundirse eficientemente dentro de la red porosa de la zeolita sin

mostrar bloqueos significativos. Por lo tanto, es incorrecto afirmar que no se puede concluir nada sobre su movilidad. De hecho, los datos muestran una adsorción progresiva y estable, lo que sugiere que la estructura microporosa de la zeolita 13X es adecuada para permitir el paso del CH_4 bajo las condiciones evaluadas.

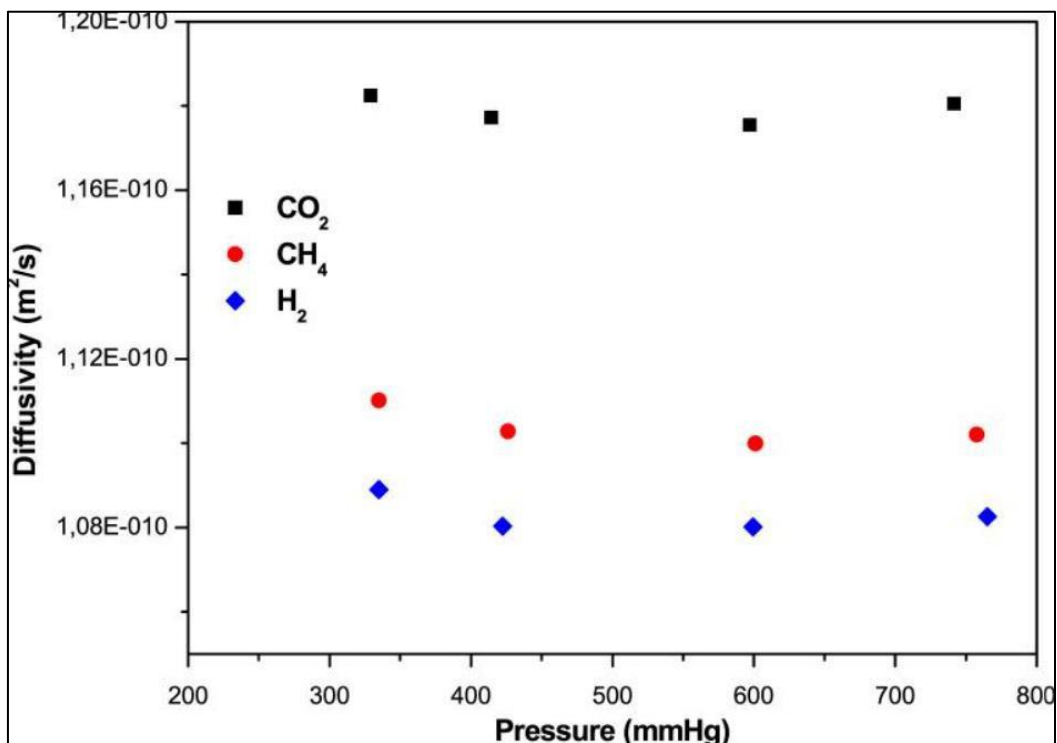


Figura 15. Gráfica de difusividad [31].

La Figura 15, que muestra el calor isostérico de adsorción, permite evaluar la intensidad con la que las moléculas de metano (CH_4) interactúan con la superficie de la zeolita. En este caso, los valores observados indican que la interacción es de intensidad moderada, lo cual representa una condición óptima para procesos de captura y liberación de gases. Específicamente, esta fuerza de adsorción moderada significa que la zeolita puede retener eficazmente al metano durante la fase de captura, asegurando una buena eficiencia del proceso; pero, al mismo tiempo, no es tan fuerte como para impedir que el gas sea liberado con facilidad durante la etapa de regeneración del material adsorbente.

Este equilibrio es esencial ya que una adsorción demasiado débil reduciría la capacidad de captura, mientras que una adsorción excesivamente fuerte dificultaría la reutilización de la zeolita, encareciendo el proceso. Por tanto, se concluye que la zeolita 13X ofrece un desempeño técnico adecuado para la adsorción de metano en ciclos repetitivos, combinando buena capacidad de retención con facilidad de regeneración.

En conjunto, estas evidencias confirman que la zeolita 13X puede capturar entre el 70 y el 90 % del metano disponible en corrientes de gas. Este rango se justifica al considerar que:

- La evolución temporal de la adsorción indica que el sólido logra una alta fracción de saturación en tiempos cortos, lo cual evidencia una capacidad efectiva de captura para el metano.
- Las curvas cinéticas indican que el sistema puede alcanzar esa saturación rápidamente, sin tiempos muertos significativos.
- La buena difusividad asegura un contacto eficiente entre el metano y los sitios activos de la zeolita.
- Y la adsorción moderadamente exotérmica permite regenerar el material sin un consumo energético extremo.

Por tanto, cuando se diseña un sistema bien optimizado es posible capturar hasta el 90 % del metano contenido en una corriente de gas, lo que hace de la zeolita 13X una de las mejores alternativas disponibles para aplicaciones de separación y purificación de metano.

9.4 Selección de método de medición:

Esta elección se basa en la capacidad del sensor para ofrecer un rendimiento óptimo en las condiciones específicas de la aplicación, asegurando mediciones precisas y confiables a lo largo del tiempo (ver Tabla 13). La selección del sensor adecuado garantiza el éxito del proyecto, maximizando la eficiencia operativa y la sostenibilidad.

Sensor	Precisión	Selec-tividad	Vida útil	Resistencia al ambiente	Manteni-miento	Costo	Tiempo de respuesta	Aplica-ción	Total
NDIR (Grado Industrial)	3	3	3	3	2	2	3	3	22
MQ-4 (Semiconductor)	2	1	1	1	3	3	3	2	16
Pellistor (Catalítico)	2	1	2	2	1	2	3	3	16
Fotoacústico (PAS)	3	3	2	3	3	1	1	3	19

Tabla 13. Comparación métodos de medición de metano.

Su alta precisión, selectividad y estabilidad en la medición de gases como el metano (CH₄). Su funcionamiento se basa en la absorción específica de radiación infrarroja por parte del gas objetivo, lo cual permite una detección altamente selectiva y sin interferencias de otros compuestos comunes en el ambiente.

A diferencia de sensores como los semiconductores (ej. MQ-4) o catalíticos (pellistores), que pueden ser sensibles a varios gases simultáneamente, el NDIR mide únicamente gases que absorben en el espectro infrarrojo, lo que elimina falsos positivos y mejora la calidad del dato.

Además, el NDIR no requiere contacto directo con el gas ni reacciones químicas para funcionar, lo que reduce significativamente el desgaste y la necesidad de mantenimiento. Gracias a esto, su vida útil puede superar los 5 años, mientras mantiene una alta confiabilidad. También es resistente a cambios de temperatura, humedad y otros factores ambientales que suelen afectar a otros tipos de sensores.

9.5 Diseño en detalle:

El diagrama representa la clasificación de fases y elementos necesarios para elaborar una máquina destinada a la captura y medición de metano (ver Figura 16), organizada en tres fases principales que abarcan desde el diseño inicial hasta la automatización del sistema.

En la FASE I, se establecen las bases funcionales de la máquina. Primero, se elige el sistema de succión, comenzando con cálculos técnicos como caudal, diámetro y pérdidas para garantizar un transporte eficiente del gas. Con estos datos se selecciona el ventilador adecuado. Luego, se diseña el sistema de medición, lo que implica seleccionar el tipo de sensor más adecuado para detectar metano y elegir el modelo específico con base en su hoja técnica (datasheet). Paralelamente, se diseña el sistema de captura, eligiendo el método más eficiente para retener el gas (como el uso de zeolitas), así como el tipo de zeolita específica según su eficacia para adsorber metano.

En la FASE II, se avanza en el desarrollo físico de la máquina. Se diseña el comedero considerando aspectos ergonómicos y funcionales, seleccionando materiales resistentes y adecuados para el contacto con animales. También se diseña el sistema de canales por donde circula el gas, lo que requiere la selección adecuada de tuberías y codos, así como sus materiales. Además, se aborda la selección del filtro mediante el análisis de sus características técnicas y una investigación de mercado para encontrar la opción más eficiente y viable económicamente.

Finalmente, la FASE III contempla la automatización del sistema. Esta etapa incluye la selección de sensores adicionales, PLC (controlador lógico programable). El diseño del control del sistema se plasma a través de un diagrama GRAFCET, el cual define la lógica secuencial de operación, facilitando la programación del PLC y asegurando un comportamiento automatizado, ordenado y confiable del dispositivo completo.

En conjunto, este proceso sistemático garantiza el desarrollo de una máquina funcional, precisa y eficiente para la detección y análisis de metano, desde la captación hasta la gestión automática de los datos obtenidos.

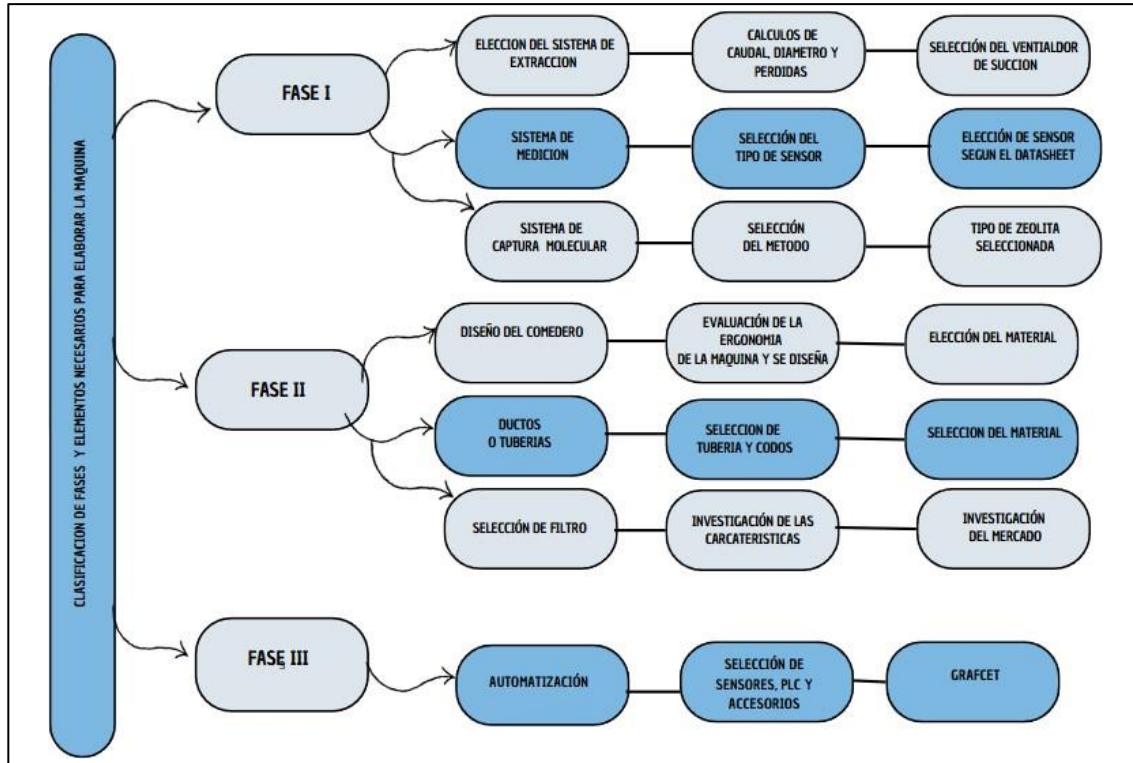


Figura 16. Diagrama fases y elementos para el desarrollo de la máquina.

9.5.1 Ventilador:

Para la correcta selección del ventilador en un sistema de transporte de gas, es indispensable partir de un análisis detallado del comportamiento del fluido. A partir de los cálculos realizados, se determinaron parámetros fundamentales como el diámetro de las tuberías, las pérdidas de carga, el caudal de aire, entre otros factores críticos. Estos datos fueron esenciales para elegir un ventilador capaz de generar la succión necesaria, asegurando un funcionamiento eficiente y seguro conforme a los requerimientos del proyecto.

A continuación, se presenta un esquema general del sistema de tuberías utilizado como base para estos cálculos. Este diseño muestra cómo se distribuyen las líneas de conducción del gas y cómo se integran con los demás elementos del sistema. Figura 17.

Posteriormente, se incluye una vista desde abajo de la máquina, donde se puede observar claramente una estructura en forma de "L", destinada al alojamiento de las zeolitas (ver Figura 18). En el diagrama 2D, esta "L" se visualiza como un codo recto, lo que facilita su identificación dentro del conjunto, para más detalle de los componentes (ver Figura 35). Finalmente, se presenta un esquema correspondiente del sistema en la Figura 19, lo que permitirá continuar con un análisis técnico preciso y asegurar una implementación adecuada.

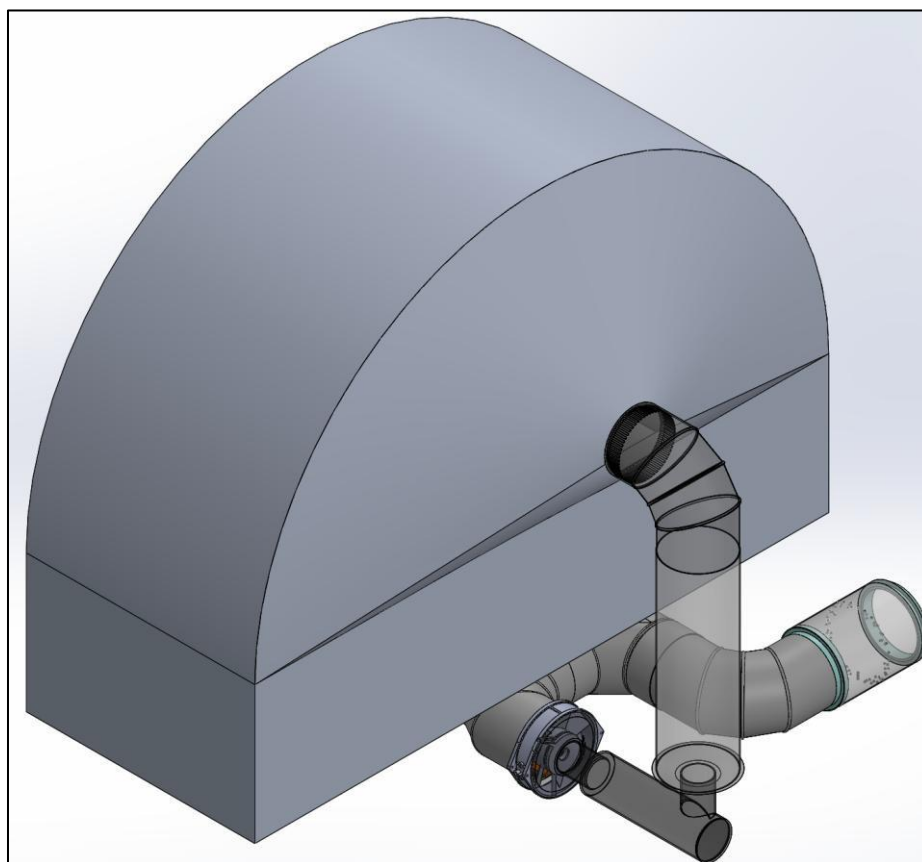


Figura 17. Vista isométrica del sistema de extracción

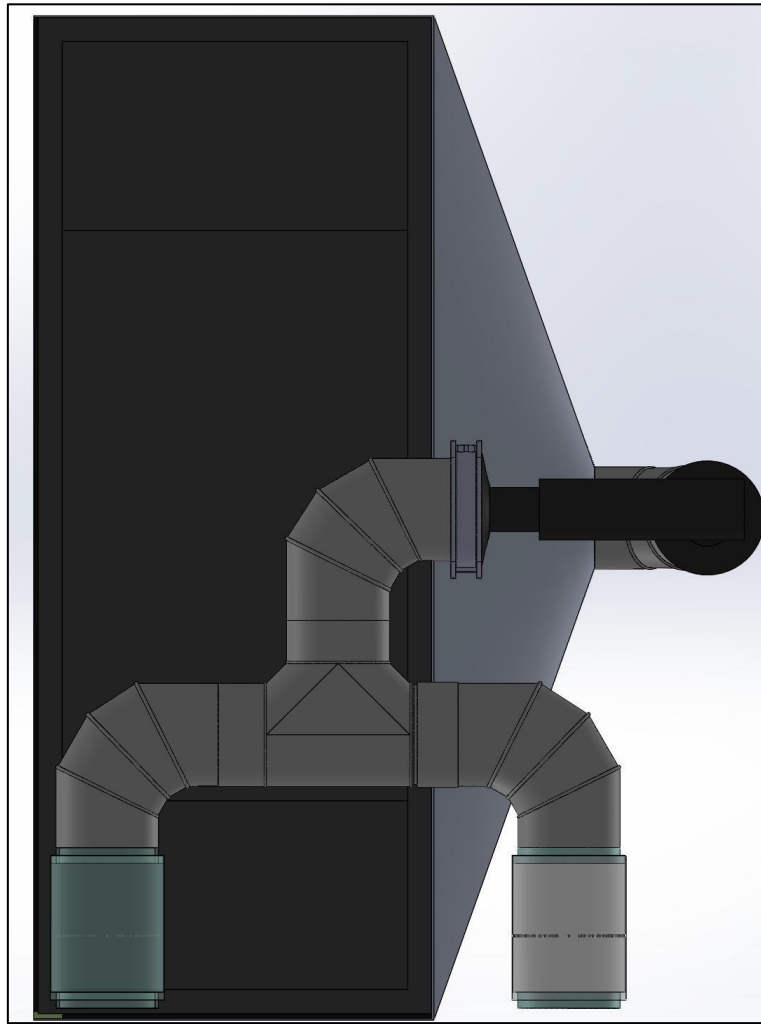


Figura 18. Vista inferior sistema de extracción.

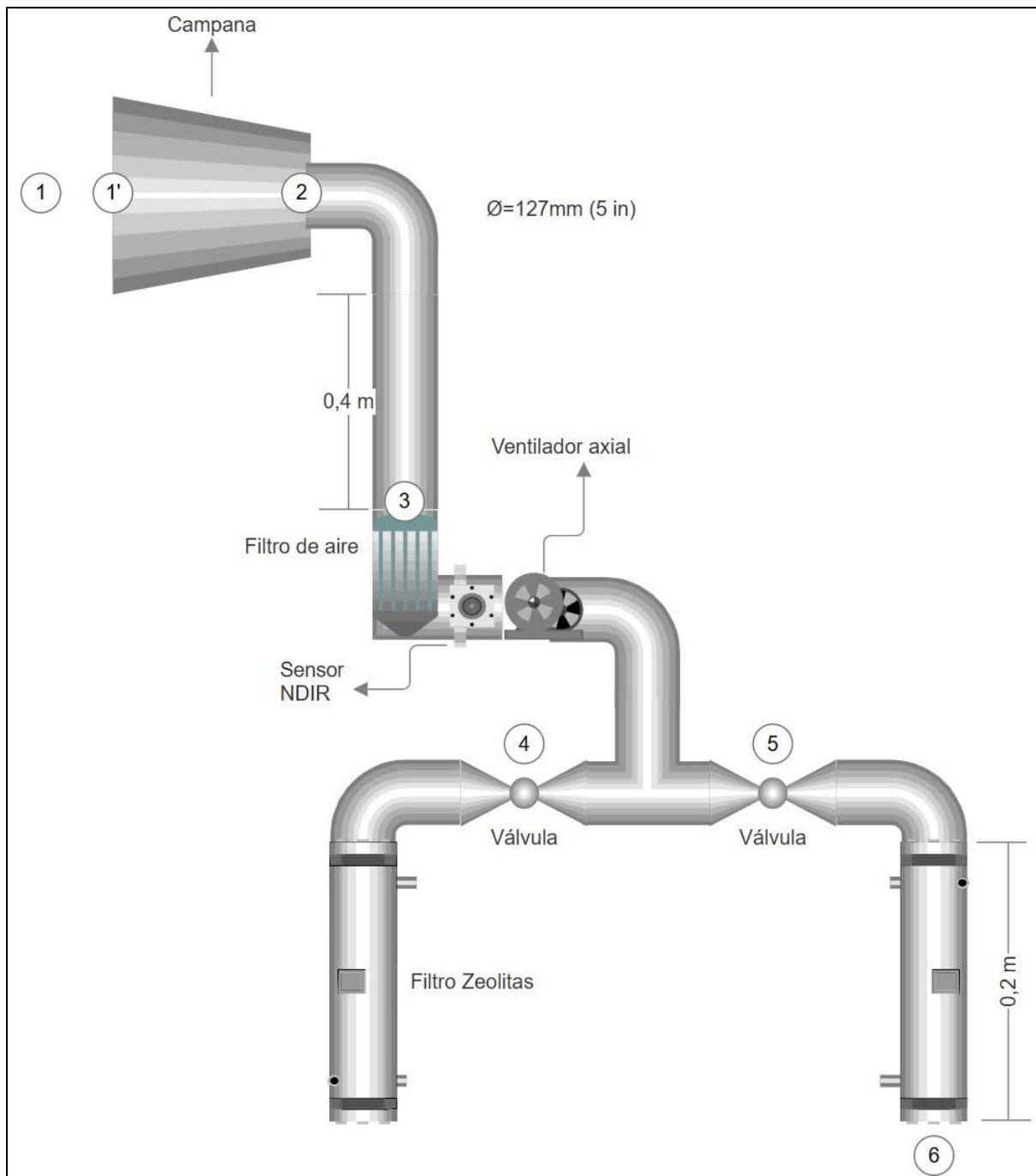


Figura 19. Esquema del sistema de ventilación del sistema.

Autor/Referencia	Ecuación
Ecuación de energía	1. $\frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_2 \times V_2^2 - \alpha_1 \times V_1^2}{2g} + z_2 - z_1 + h_l \text{ total}$
Darcy-Weisbach	2. $h = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_l \right) \frac{V^2}{2g}$
Continuidad de flujo	3. $Q = V \times A$
Velocidad captura a x distancia de la campana	4. $V_c = \frac{V_{onD}^2}{48x^2}$
Definición de número de Reynolds	5. $Re = \frac{v \times D}{\nu}$
Relación de rugosidad relativa	6. $\frac{\epsilon}{D}$
Sumatoria de perdidas accesorios	7. $\sum K_l$
Energía de bombeo y carga requerida	8. $H = \left(\alpha_2 + f \times \frac{L}{D} + \sum K_l \right) \frac{V^2}{2g}$
Conversión requerimiento agua	9. $H_{req} = H \times \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}}$

Tabla 14. Ecuaciones para cálculo de requerimientos del sistema y ventilador.

Para iniciar con los cálculos, se toman las propiedades típicas del aire a 25°C., luego, a partir de la literatura, se obtiene que el volumen de respiración de un bovino es de 6,20± 1,38 litros por segundo [32], con una velocidad de expulsión de 2 m/s. Este volumen de respiración se convierte a metros cúbicos por minuto y finalmente a pies cúbicos por minuto (CFM). Luego, con la ecuación 4 se calcula la velocidad de captura basado en lo que propone la ASHRAE [33], se toma el caso más crítico que es que la vaca este en el punto 1', en el límite de la campana y se desea captar el gas en el punto 2, que está a 0,5 m, justo a la entrada del ducto como se observa en la Figura 19; con esta velocidad y el área transversal de la campana que es de aproximadamente 1m² (ver Anexo D: Cálculos sistema de ventilación, para profundizar en los cálculos), se determina el caudal requerido. Con un diámetro de ducto seleccionado en 127mm (5 in), según criterios de diseño (los cuales regulan la velocidad del flujo), el cual es contante desde 2 a 6, excepto por el paso por 3, el flujo por el filtro de aire presenta una reducción de diámetro, a continuación, con la ecuación 3, conociendo el caudal y el área del ducto (ver punto 2), se calcula la velocidad interna del aire.

Cabe señalar que, este análisis se realiza considerando la operación del sistema con una válvula cerrada, de modo que el flujo atraviesa los puntos 1, 1', 2, 3, 5 y 6 (ver Figura 19). Este esquema permite que un filtro de zeolitas se encuentre en funcionamiento mientras el otro permanece en reserva, lo cual garantiza la continuidad operativa del sistema en caso de que el filtro activo alcance su capacidad máxima de adsorción y requiera ser reemplazado, además en la ecuación 1, los valores relacionados con el punto 1 (P_1, V_1, z_1) corresponden al punto 1 del esquema, seleccionado estratégicamente para simplificar los cálculos, mientras los relacionados al punto 2 (P_2, V_2, z_2) corresponden al punto 6 del esquema (ver Figura 19), para el cálculo se ignora la diferencia de alturas ($z_2 - z_1$) en el caso de los gases.

A continuación, se calcula el número de Reynolds utilizando la ecuación 5 para determinar el régimen de flujo, con la velocidad y diámetro del ducto (en el punto 2). Posteriormente, se estiman las pérdidas en el sistema (ver Tabla 15), considerando pérdidas por fricción y por accesorios como los codos, la campana, las zeolitas, el filtro de aire y la válvula, mediante la aplicación de la ecuación 7. Finalmente, se realiza la sumatoria total de las pérdidas. Continuando, se calcula la carga hidrostática requerida (ecuación 8), tomando factores como el de fricción y difusividad térmica acordes a nuestro contexto [34], el resultado de la carga requerida es de 4,41 metros de columna de aire, para profundizar en el desarrollo, ver el Anexo D: Cálculos sistema de ventilación.

Lista de componentes	Descripción
Longitud total del ducto	600mm
Diámetro interno del ducto	127mm (5 in)
Campana	Campana de extracción (ver anexo A)
Codo 90°	$K = 1,2$
Conexión en T	$K = 1$
Filtro de aire	$K = 8$
Zeolitas	Filtro zeolitas ($K = 10$)
Válvula	$K = 0,2$
Contracción repentina del filtro de aire	Reducción de sección en el filtro de aire ($K = 0,7$)
Expansión repentina del filtro de aire	Cambio de sección filtro de aire ($K = 0,45$)

Tabla 15. Lista de componentes del sistema de ventilación.

Como los fabricantes de ventiladores expresan sus especificaciones en términos de columna de agua, es necesario convertir los metros de aire a metros de agua, para esto aplicamos la ecuación 9, considerando la diferencia de densidades entre ambos fluidos. Finalmente, se convierte esta medida a pulgadas de agua, que es la unidad común en los catálogos de fabricantes.

Después de esto, se elabora una tabla con los valores calculados para distintos caudales, para graficar la curva de requerimientos del sistema (gráfico verde) (para consultar en detalle los cálculos realizados, véase el Anexo D: Cálculos sistema de ventilación). Esta curva se compara con la curva de rendimiento del ventilador W2G115AD1501 proporcionada por el fabricante (ver Figura 20). El punto donde ambas curvas se interceptan representa el punto de operación óptimo del sistema (ver Figura 21).

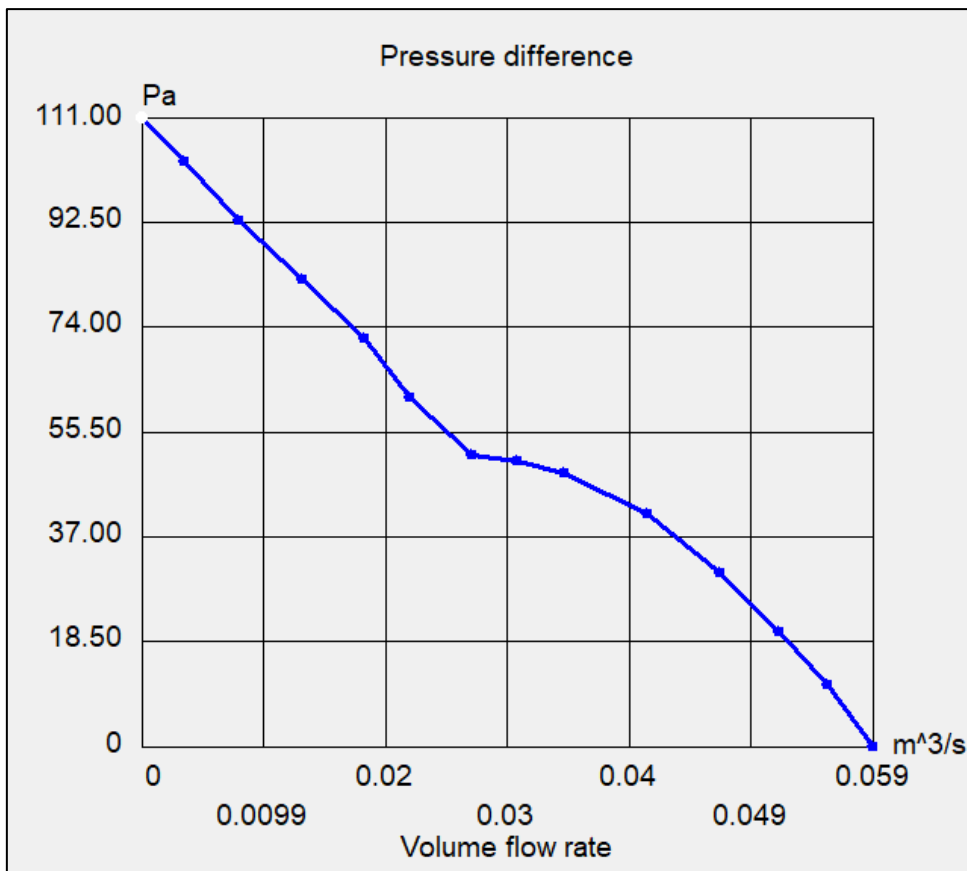


Figura 20. Curva característica de ventiladores axiales[35].

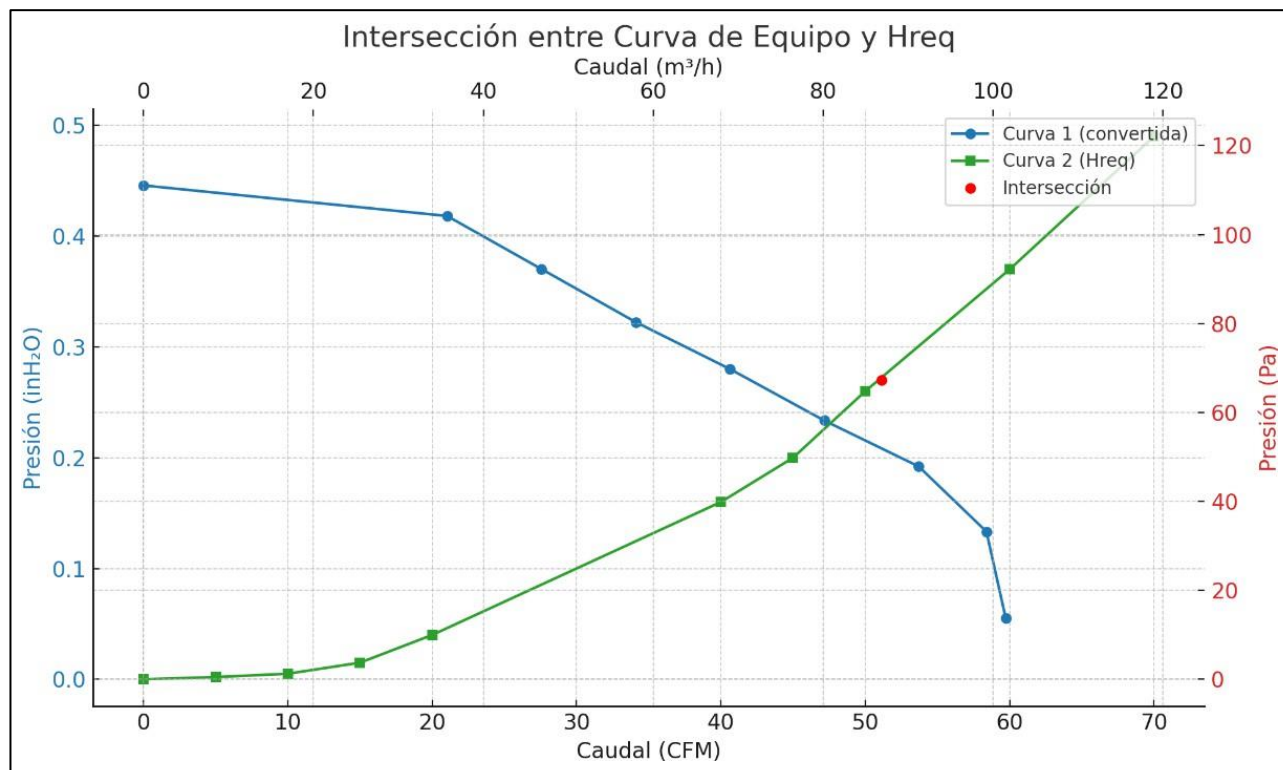


Figura 21. Punto de operación para el sistema.

Según los cálculos técnicos previos de caudal requerido, se seleccionó el ventilador axial DC (W2G115AD1501) como el componente más adecuado para garantizar una succión efectiva y estable dentro del sistema de recolección de metano, con un punto de operación óptimo en 0,24m³/seg (51,1 CFM).

Constituye una solución eficiente, compacta y confiable para la generación de succión en sistemas de captación de gases, como es el caso de la máquina diseñada para la recolección de metano. Su principio de funcionamiento se basa en el desplazamiento del aire de forma paralela al eje del rotor (flujo axial), lo que permite canalizar el gas de manera controlada hacia zonas específicas, como cámaras de almacenamiento o sensores de detección. Este tipo de ventilador opera típicamente con tensiones de 12 V DC, lo que facilita su integración con sistemas electrónicos de bajo consumo energético y controlados mediante microcontroladores.

En cuanto a su rendimiento, los ventiladores axiales DC presentan velocidades de rotación que oscilan entre 1500 y 5000 RPM, y son capaces de generar caudales de aire comprendidos entre 10 y 200 CFM (pies cúbicos por minuto), lo cual resulta adecuado para mantener una succión continua y eficiente en aplicaciones cerradas. Si bien la presión estática generada por este tipo de ventilador suele ser inferior a la que ofrecen los ventiladores centrífugos, existen modelos optimizados que alcanzan niveles de presión suficientes para operar eficazmente en configuraciones que incluyen filtros o trayectos de corta longitud.

Adicionalmente, los ventiladores axiales DC destacan por su bajo nivel de ruido, con 44 dBA, su eficiencia energética y su larga vida útil, la cual puede superar las 30.000 horas de operación continua en versiones que incorporan rodamientos de alta calidad. Estas características, sumadas a su disponibilidad comercial, bajo costo y facilidad de instalación, consolidan a este tipo de ventilador como la opción más adecuada para sistemas de succión en aplicaciones agroindustriales orientadas a la captura de metano.

A continuación, se presentarán las especificaciones del ventilador necesarias para llevar a cabo el diseño. (ver Figura 22).

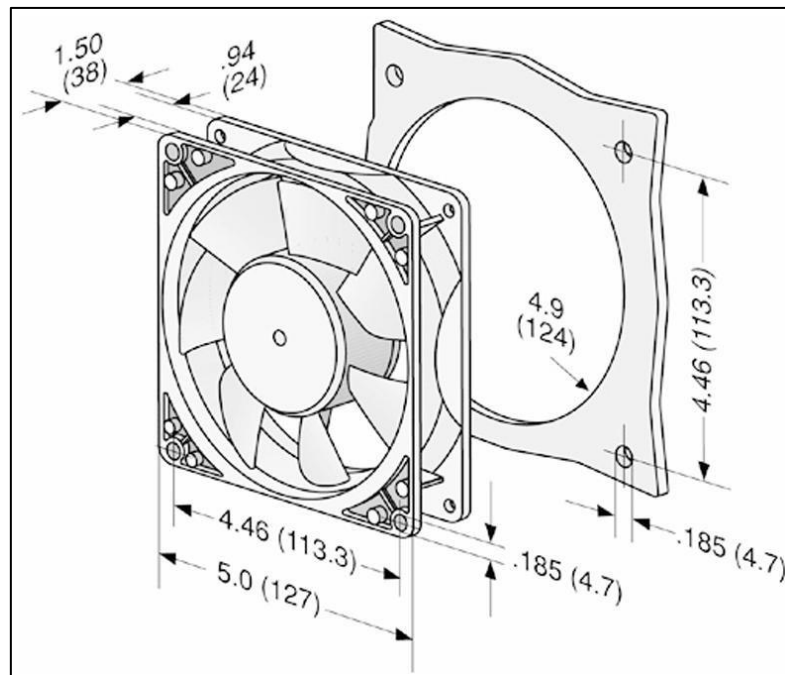


Figura 22. Dimensiones en pulgadas y mm del ventilador axial.

9.6 Selección de sensores:

9.6.1 Sensor de medición:

En este caso particular, se consideraron sensores NDIR que pueden ser utilizados en aplicaciones de monitoreo ambiental, detección de fugas, y sistemas autónomos, como en el caso de la máquina de medición de metano para bovinos (ver Tabla 16). La matriz también incluye un análisis de factores como la fiabilidad y el costo, que son determinantes en aplicaciones industriales y rurales.

Sensor	Rango de Detección (vol % CH ₄)	Consumo de Energía	Salida	Tiempo de Respuesta (T90)	Vida Útil	Punto Destacado	Sensibilidad
MIPEX-04	0–100	Ultra bajo (<1 mW)	Digital (UART)	<30 s	>10 años	Precisión alta y mínimo consumo	Alta
Cubic SJH-100A-L	0–100	Moderado	UART / Voltaje	<30 s	>5 años	Buen balance costo/rendimiento	Media
Winsen MH-441D	0–10	<85 mA	UART / Voltaje	<30 s	>5 años	Accesible y funcional	Media
N.E.T. IRNET-P 20mm	0–100	45 mA	Digital / Analógica	<30 s	>5 años	Alta robustez industrial	Alta
eLichens Cranberry	Hasta 5% LEL	Bajo	Digital (2 Hz)	0.5 s	>10 años	Respuesta ultrarrápida para IoT	Alta

Tabla 16. Comparación sensores NDIR.

El sensor MIPEX-04 fue seleccionado por su bajo consumo energético (ver Figura 23), lo convierte en una opción ideal para sistemas autónomos dentro de dispositivos compactos y portátiles, facilitando su instalación directa en la estructura de alimentación del animal sin requerir fuentes de energía complejas o costosas. Además, su amplio rango de detección, que va desde concentraciones muy bajas hasta niveles peligrosos de metano, permite obtener mediciones precisas y confiables del gas emitido directamente por el bovino durante el proceso de alimentación, sin interferencias ni necesidad de sensores externos.

Su alta precisión y fiabilidad garantizan la consistencia de los datos recolectados, lo que es fundamental en emisiones ganaderas y su impacto ambiental. A esto se suma su resistencia y durabilidad, especialmente importantes en entornos rurales donde las condiciones pueden ser variables y demandantes.



Figura 23. Sensor NDIR MIPEX-04.

La gráfica de respuesta del sensor MIPEX-04-1-XX-3.1 (ver Figura 21) resulta fundamental para evaluar su idoneidad en la medición precisa de metano (CH_4), especialmente en aplicaciones agropecuarias. En dicha gráfica se observa cómo el sensor responde no solo al metano, sino también a otros gases inflamables como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), hexano (C_6H_{14}) y etileno (C_2H_4), con diferentes niveles de sensibilidad.

Un buen sensor de metano debe mostrar una alta sensibilidad y una respuesta lineal y predecible únicamente al metano, mientras mantiene una baja interferencia frente a otros compuestos. En este sentido, el MIPEX-04 demuestra un comportamiento proporcional y estable ante el CH_4 , lo cual es altamente positivo. No obstante, también registra respuestas cruzadas ante algunos hidrocarburos: por ejemplo, el etano (C_2H_6) genera una lectura anormalmente elevada, mientras que el etileno (C_2H_4) apenas activa el sensor. Estas observaciones son clave, ya que en entornos donde existan mezclas de gases, podrían afectar la precisión de la medición si no se cuenta con una calibración adecuada.

Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de estas respuestas secundarias, la señal que entrega el sensor al sistema está específicamente calibrada y filtrada para representar únicamente la concentración de metano. Esto se logra mediante el uso de filtros ópticos

estrechos, que permiten al sensor aislar las longitudes de onda de absorción características del CH_4 , discriminándolo eficazmente de otros gases presentes en el entorno.

En cuanto a posibles interferencias por etanol, un compuesto de uso común en procesos industriales y laboratorios se debe señalar que este no comparte la misma banda de absorción infrarroja dominante del metano, por lo que su interferencia en sensores NDIR como el MIPEX-04 es mínima o nula en condiciones normales de operación. Además, en el contexto específico de instalaciones ganaderas, donde se prevé el uso del sensor, la presencia de etanol es prácticamente inexistente o en concentraciones irrelevantes, por lo que no representa una amenaza para la precisión del sistema.

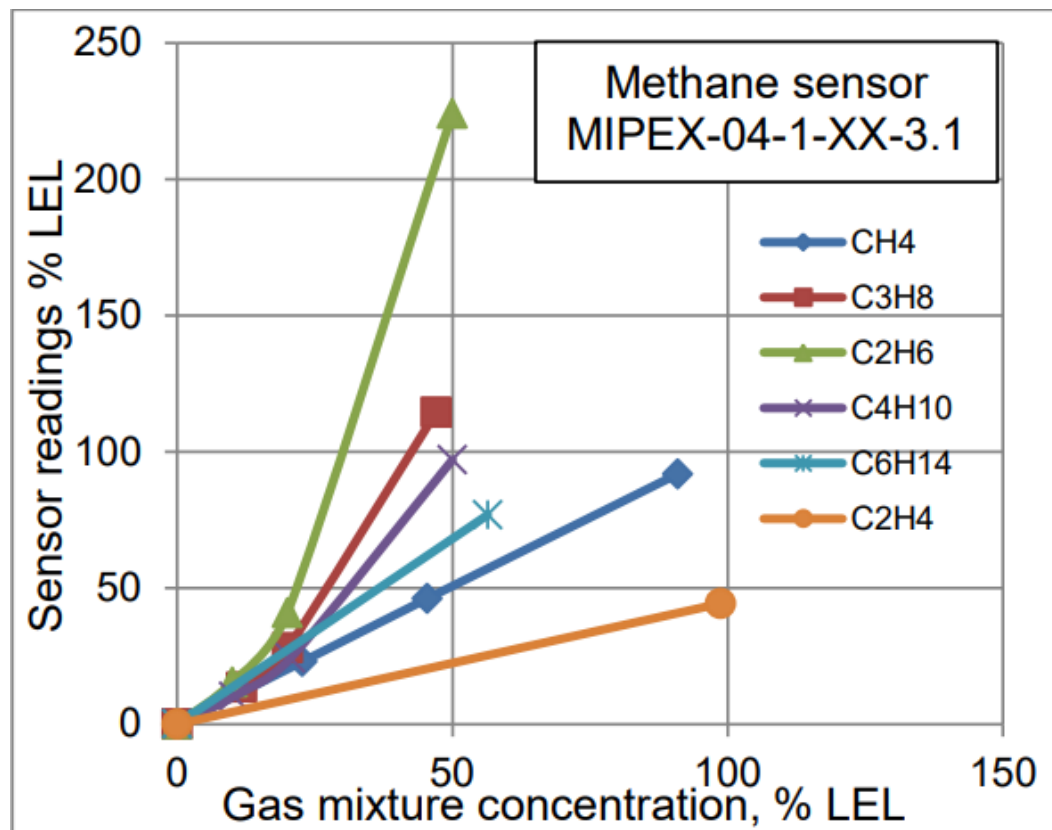


Figura 24. Gráfico precisión MIPEX-04-1-XX-3.1.

El sensor MIPEX-04 se destaca por sus dimensiones en milímetros de manera compacta, lo que lo convierte en una opción ideal para integrarse en sistemas de medición de metano

donde el espacio es limitado. Su tamaño reducido permite que se ubique fácilmente en las máquinas, incluso en aquellos dispositivos que requieren de una instalación discreta y eficiente. Esta característica de diseño facilita su integración sin interferir con otras partes del sistema, asegurando una instalación sencilla y sin complicaciones.

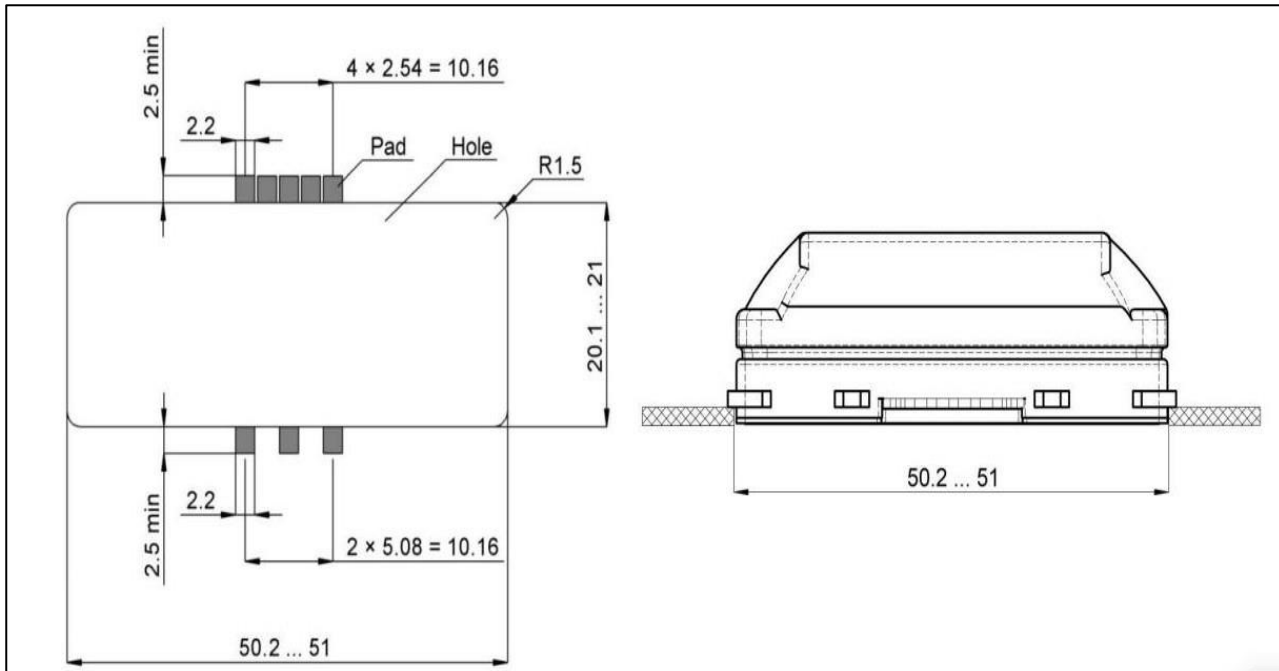


Figura 25. Dimensiones en mm del sensor NDIR.

Porcentaje de medición: está diseñado para detectar concentraciones de 0 a 100% en volumen de metano (CH_4) en el aire. Este modelo permite cubrir un amplio rango de posibles niveles de gas, garantizando una detección efectiva tanto en condiciones normales como en posibles escenarios de fuga o concentración elevada.

Precisión del sensor: este sensor ofrece una precisión de $\pm 0,1$ % vol. o ± 5 % del valor medido para metano, dentro del rango de temperatura de $+20$ °C a $+25$ °C. La comunicación se realiza a través de una interfaz digital UART. Se recomienda mantener el sensor dentro del rango de temperatura indicado para garantizar una medición precisa y evitar una disminución en la eficiencia del dispositivo, para más especificaciones ver Anexo C: DataSheet sensor NDIR.

9.6.2 Sensor de movimiento:

El sensor RCWL-0516 (ver Figura 26), se presenta como una solución altamente eficiente y confiable para la detección de movimiento en aplicaciones industriales y agrícolas, particularmente en sistemas automatizados destinados a monitorear la entrada de bovinos a zonas específicas, como la entrada de una máquina. Este sensor emplea tecnología de microondas basada en el principio del radar Doppler, lo que le permite detectar movimiento sin necesidad de contacto directo con el objeto o de una línea de visión clara, superando así las limitaciones de los sensores infrarrojos pasivos (PIR), que dependen de la radiación térmica y requieren condiciones de visibilidad directa.

Una de las características más destacadas del RCWL-0516 es su alto alcance y sensibilidad, con una capacidad de detección de hasta 5 metros, lo que lo convierte en una opción ideal para detectar objetos grandes y en movimiento, como los bovinos, incluso en entornos donde la visibilidad pueda estar obstruida por barreras físicas. Esta capacidad de detección sin contacto directo es fundamental para garantizar una operación precisa y confiable en sistemas donde los animales deben ser detectados de manera rápida y eficiente.

Adicionalmente, el bajo consumo energético del RCWL-0516 lo convierte en una opción adecuada para aplicaciones de monitoreo continuo, optimizando el uso de recursos y permitiendo su implementación en sistemas de largo plazo sin un impacto significativo en el consumo de energía. Esto resulta particularmente relevante en aplicaciones industriales o agrícolas donde la eficiencia energética es crucial para mantener la rentabilidad operativa.

En términos de integración con sistemas automatizados, el RCWL-0516 ofrece una fácil compatibilidad con plataformas como microcontroladores (por ejemplo, Arduino o Raspberry Pi), facilitando su implementación en diversas arquitecturas de control. Una vez que el sensor detecta el movimiento, puede generar una señal que active automáticamente mecanismos de control, como puertas automáticas, sistemas de alimentación o cualquier otro dispositivo de acción, lo que mejora la eficiencia operativa y permite un sistema automatizado que reacciona en tiempo real a la presencia del bovino.

El sensor RCWL-0516 también destaca por su robustez frente a variaciones ambientales, como cambios en temperatura, humedad o presencia de polvo, lo que le otorga un rendimiento confiable en entornos agrícolas o industriales, donde estas condiciones pueden

ser impredecibles. A diferencia de los sensores PIR, que pueden ser sensibles a las fluctuaciones térmicas y a la interferencia de elementos ambientales, el RCWL-0516 mantiene su rendimiento constante, garantizando una detección precisa bajo diversas condiciones operativas.

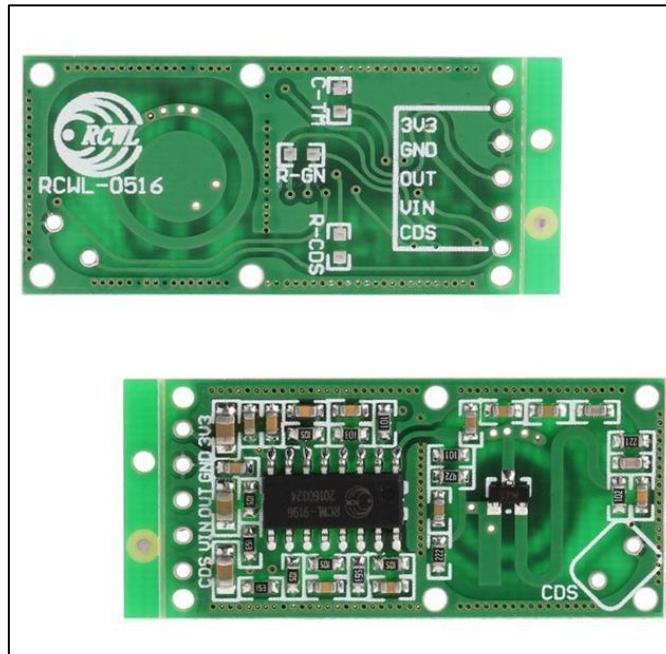


Figura 26. Sensor RCWL-0516.

A continuación, se presentan las dimensiones físicas del sensor RCWL-0516, las cuales son relevantes para su integración en el sistema.

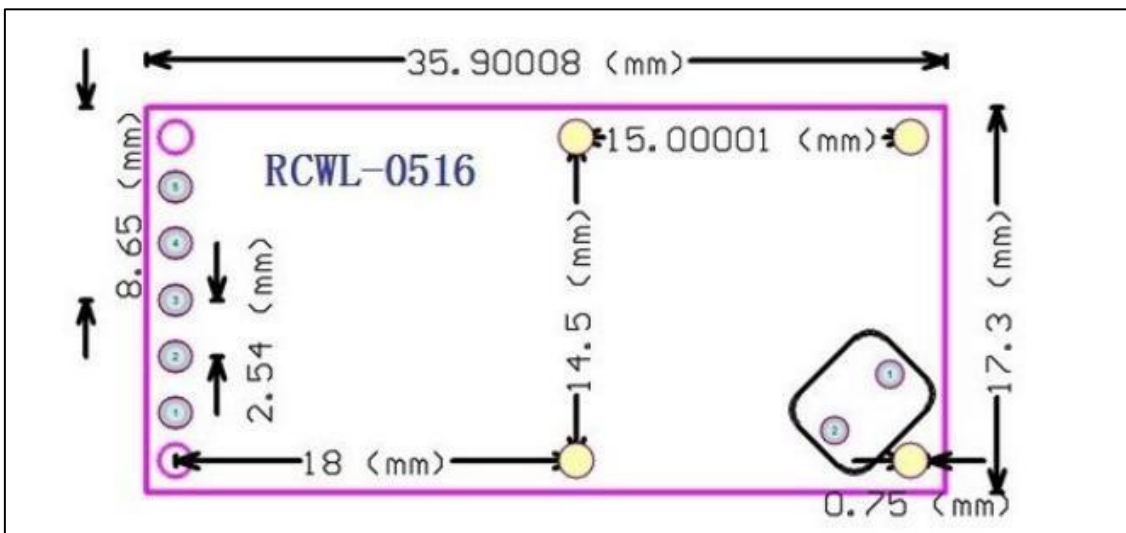


Figura 27. Dimensiones sensor RCWL-0516.

9.6.3 Sensor de detección de saturación:

Tipo de sensor	Precisión típica	Tiempo de respuesta	Sensibilidad a CH ₄	Tolerancia ambiental (humedad/temperatura)	Consumo energético
NDIR (infrarrojo no dispersivo)	Alta ($\pm 2-5$ ppm)	Rápido (1-3 s)	Alta	Alta (hasta 95% HR, -20 a 60°C)	Bajo-medio
TCD (Detector de conductividad térmica)	Media	Lento (10-60 s)	Media	Media	Medio
MOS (Metal Oxide Semiconductor)	Baja-media	Rápido (5-10 s)	Media	Baja (afectado por humedad)	Alto
PID (Fotoionización)	Muy baja para CH ₄	Rápido	Muy baja	Alta	Alto
QCM (Cristal de cuarzo microbalance)	Alta ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Muy lento	Alta (en masa)	Muy sensible a temperatura	Bajo

Tabla 17. Comparación métodos de medición.

El sensor NDIR (Infrarrojo No Dispersivo) fue seleccionado como parte del sistema automatizado de detección de saturación del adsorbente debido a su alta sensibilidad y selectividad para la detección de metano, su capacidad de operar en tiempo real y en condiciones ambientales variables, así como su bajo mantenimiento y larga vida útil. Este tipo de sensor permite detectar con precisión el aumento en la concentración de metano a la salida del cartucho de zeolitas, lo cual indica que el material ha alcanzado su punto de saturación. Su principio de funcionamiento, basado en la absorción de radiación infrarroja por parte del metano, evita interferencias con otros gases y lo hace ideal para aplicaciones ganaderas, donde se requiere monitoreo continuo, fiable y no invasivo.



Figura 28. Sensor NDIR.

9.6.4 Almacenamiento de datos:

Se muestra las concentraciones de metano medidas con el sensor MIPEX-04 directamente en el celular, utilizando una plataforma IoT (como Blynk), que permite visualizar los datos en tiempo real a través de una app móvil, sin necesidad de desarrollar una aplicación desde cero.

Para lograrlo, primero se conectará el sensor MIPEX-04 a una placa ESP32, que es un microcontrolador con Wi-Fi integrado (ver Figura 29). El sensor se conectará al pin analógico (A0) del ESP32, y se alimentará según sus especificaciones (generalmente 3.3 V o 5 V). En el ESP32 se cargará un código usando el Arduino IDE, que se encargará de leer la señal analógica del sensor, convertir esa señal a partes por millón (ppm) según la curva de calibración del sensor, y enviar esos datos a través de Internet a la nube.

Para la comunicación entre el ESP32 y el celular, se usará la plataforma Blynk, que ofrece una app móvil con una interfaz visual configurable y una biblioteca para integrar fácilmente con Arduino. Dentro de la app de Blynk se creará un proyecto y se generará un Auth Token, que se colocará en el código del ESP32 junto con el nombre y la contraseña del Wi-Fi local. El código incluirá un temporizador (BlynkTimer) que cada segundo lee el valor del sensor,

lo convierte y lo envía al servidor de Blynk usando una función como `Blynk.virtualWrite(V1, ppm)`, donde V1 es el pin virtual vinculado a un widget en la app.

Una vez cargado el código en el ESP32 y conectado a Wi-Fi, se abrirá la app de Blynk en el celular. Ahí se añadirá un gauge o un gráfico de línea al panel, configurado para mostrar los datos del pin virtual V1, en unidades de ppm. Al ejecutar el sistema, las concentraciones de metano comenzarán a mostrarse en tiempo real en el celular, con actualizaciones automáticas y visualización clara.

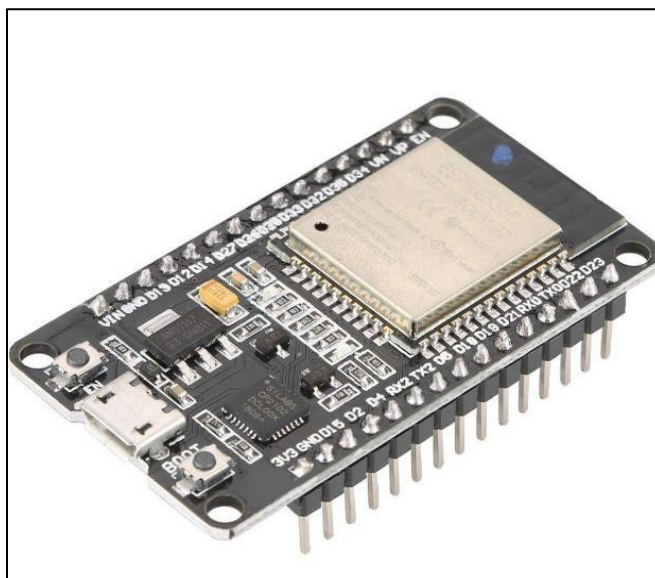


Figura 29. Microcontrolador ESP32.

9.6.5 GRAFCET:

La siguiente imagen muestra un diagrama GRAFCET (ver Figura 30) que representa la secuencia lógica de funcionamiento de una máquina diseñada para alimentar animales e identificar su nivel de emisión de metano. El proceso es completamente automatizado e incluye la detección de movimiento, identificación del animal, activación del sistema de alimentación, medición de metano, captura de metano y almacenamiento de datos.

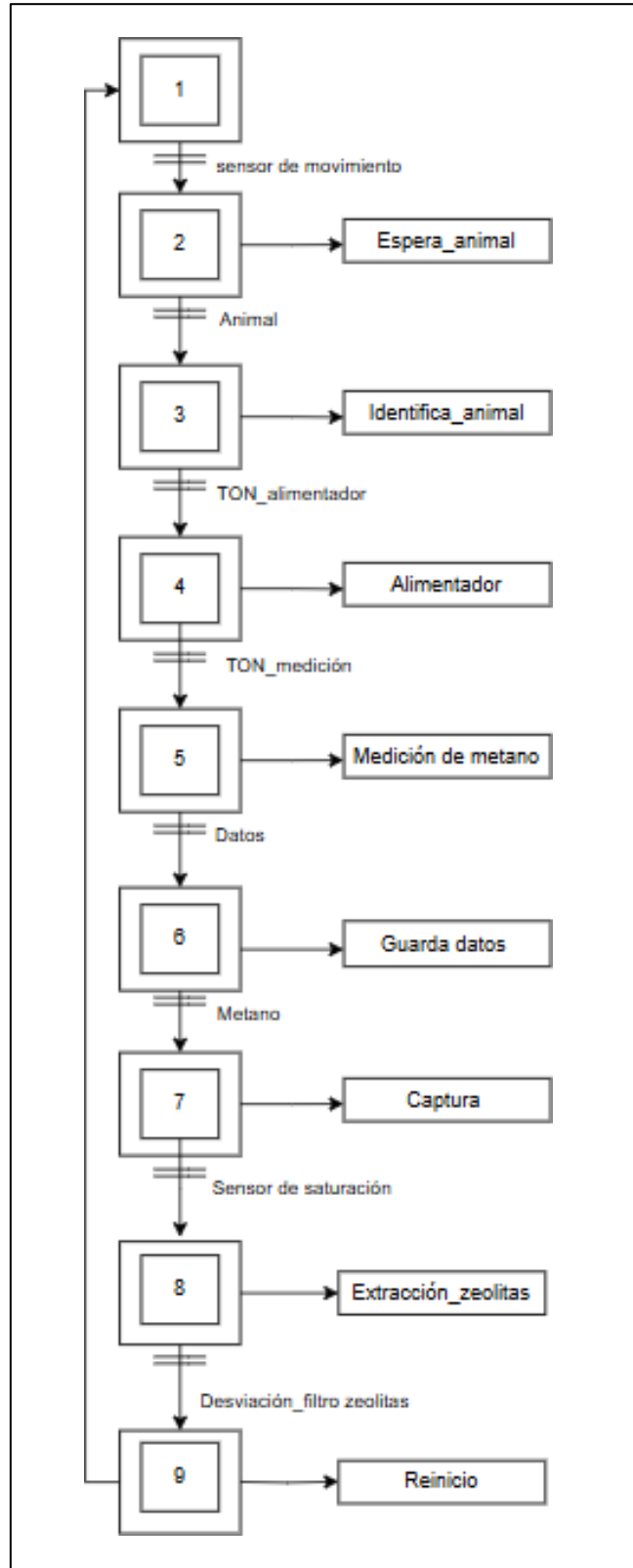


Figura 30. Diagrama GRAFCET.

Etapa 1: Detección de presencia

Acción: Se activa un sensor de movimiento.

Objetivo: Detectar que un animal ha ingresado a la zona de medición.

Transición: Cuando hay movimiento, se pasa a la siguiente etapa.

Etapa 2: Espera del animal

Acción: El sistema entra en un estado de espera hasta que el animal esté completamente presente en el área de medición.

Condición: Confirmación de presencia del animal.

Etapa 3: Identificación del animal

Acción: Se ejecuta la función `Identifica_animal` a través de un sensor de movimiento método de identificación individual.

Condición de transición: Temporizador para activar el alimentador.

Etapa 4: Activación del alimentador

Acción: Se acciona el alimentador, lo que incentiva al animal a permanecer en el área durante el proceso de medición.

Condición de transición: Temporizador para iniciar medición de metano.

Etapa 5: Medición de metano

Acción: Se activa el sensor (MIPEX-04) para iniciar la medición de concentración de metano exhalado por el animal.

Salida de datos: El sensor genera una lectura en datos digitales.

Etapa 6: Guardado de datos

Acción: Se ejecuta la función Guarda datos, almacenando los valores medidos de metano junto con la identificación del animal en una base de datos.

Etapa 7: Captura

El sistema activa la captura del metano mediante el paso del flujo hacia el módulo de zeolitas.

Durante esta fase, un sensor de saturación monitorea la capacidad del adsorbente

Etapa 8: Extracción_zeolitas

Si el sensor detecta que las zeolitas están saturadas, se activa un mecanismo de desviación de flujo hacia un nuevo cartucho.

Se da paso al proceso de regeneración o recambio.

Etapa 9: Reinicio

Una vez redireccionado el flujo y asegurada la capacidad de captura, el sistema reinicia el ciclo para un nuevo animal.

9.6.6 Diagrama de control:

El siguiente diagrama de flujo (ver Figura 31) representa de manera general el funcionamiento del sistema automatizado para la detección y medición de metano emitido por bovinos. Este sistema está diseñado para capturar la presencia del animal, medir los gases emitidos y almacenar los datos obtenidos de forma estructurada.

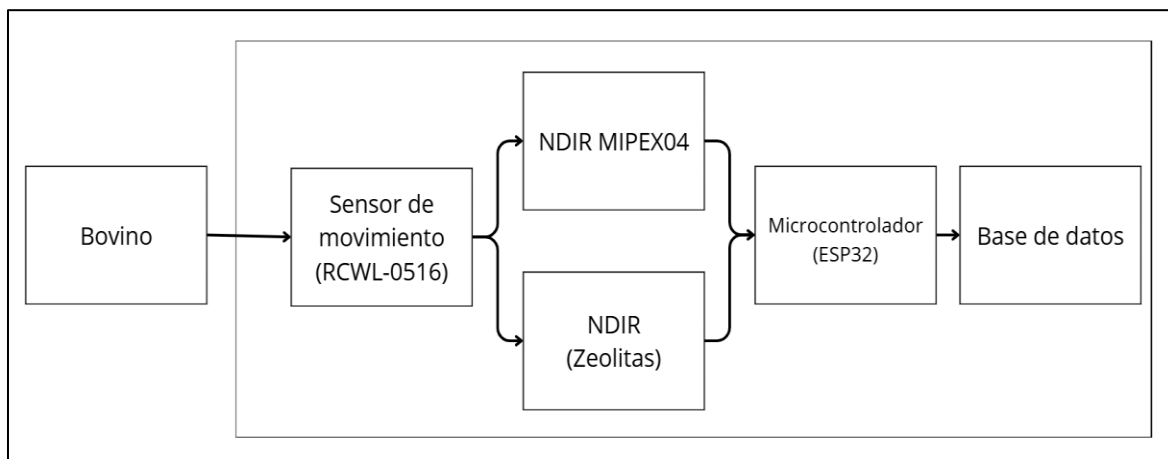


Figura 31. Diagrama de flujo del sistema.

El diagrama de control presentado describe el funcionamiento básico del sistema de medición de metano en bovinos, desde la detección del animal hasta el almacenamiento de los datos en una base digital. El proceso comienza cuando un bovino se posiciona frente al equipo. Su presencia es detectada por un sensor de movimiento, que activa el sistema y da paso al siguiente bloque. Una vez activado, entra en funcionamiento el sensor NDIR (Infrarrojo No Dispersivo), especializado en la detección de gases como el metano. Este sensor mide la concentración de metano exhalado por el animal, utilizando tecnología óptica que identifica las longitudes de onda específicas del CH₄. Aunque puede detectar otros gases, el sistema está calibrado para interpretar y registrar únicamente los valores correspondientes al metano.

La señal generada por el sensor es leída por un microcontrolador, como un ESP32, que se encarga de convertir dicha señal en una unidad interpretable, generalmente en partes por millón (ppm). Este microcontrolador también gestiona la transmisión de los datos a una plataforma digital. Finalmente, la información procesada se almacena en una base de datos, que puede estar alojada en un servidor local o en la nube. Esta base de datos facilita la visualización, el monitoreo en tiempo real y el análisis posterior de las emisiones de metano generadas por los animales.

Este sistema automatizado permite la recopilación continua y confiable de datos sin intervención humana constante, lo que resulta altamente eficiente para estudios de

emisiones en ambientes ganaderos. Además, puede integrarse fácilmente con plataformas IoT como Blynk para su visualización directa en una aplicación móvil.

9.7 Diseño del sistema:

Con base en la información previamente presentada, se diseñó el sistema para la captura y medición de metano Figura 32 y Figura 33, el cual integra una campana, un comedero, una tubería para el transporte de los gases y un ventilador encargado de generar la succión necesaria. Además, se incluye una estructura en forma de "L", dentro de la cual se alojan las zeolitas, responsables de capturar el metano a nivel molecular. Las dimensiones generales del sistema son 1,25 m x 1,125 m x 0,92 m, lo que asegura un diseño ergonómico para el animal y adecuado para el funcionamiento y eficiencia del proceso de captura y análisis de gases (ver Figura 34 y Figura 35).

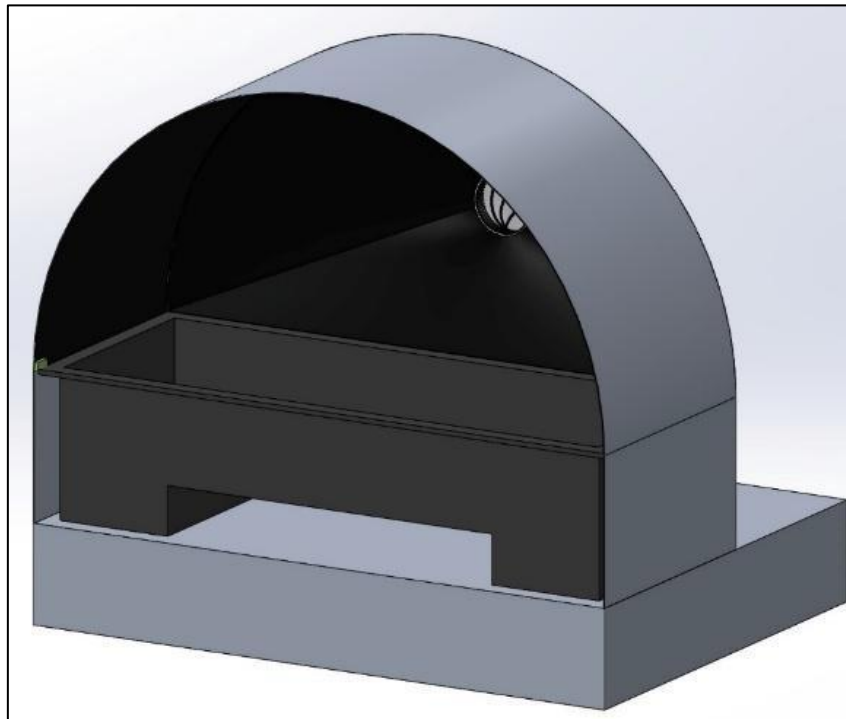


Figura 32. Vista plano del comedero

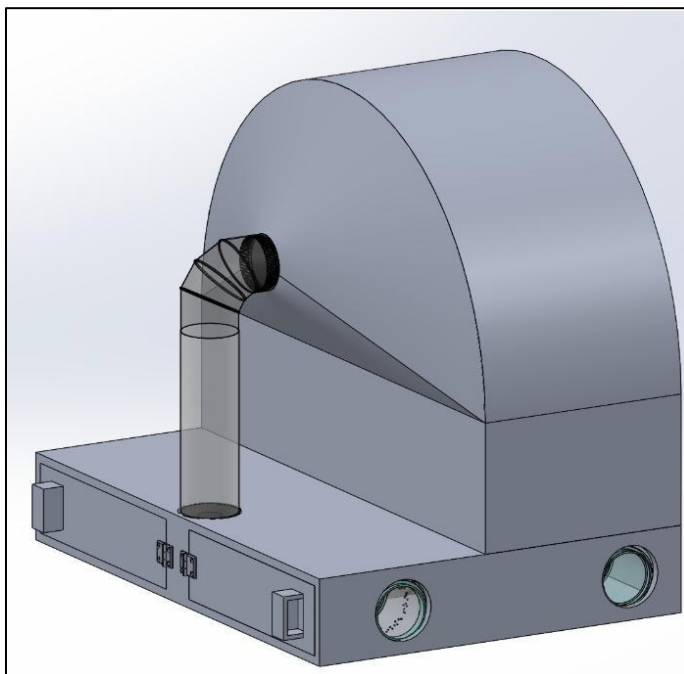


Figura 33. Vista plano filtro de zeolitas.

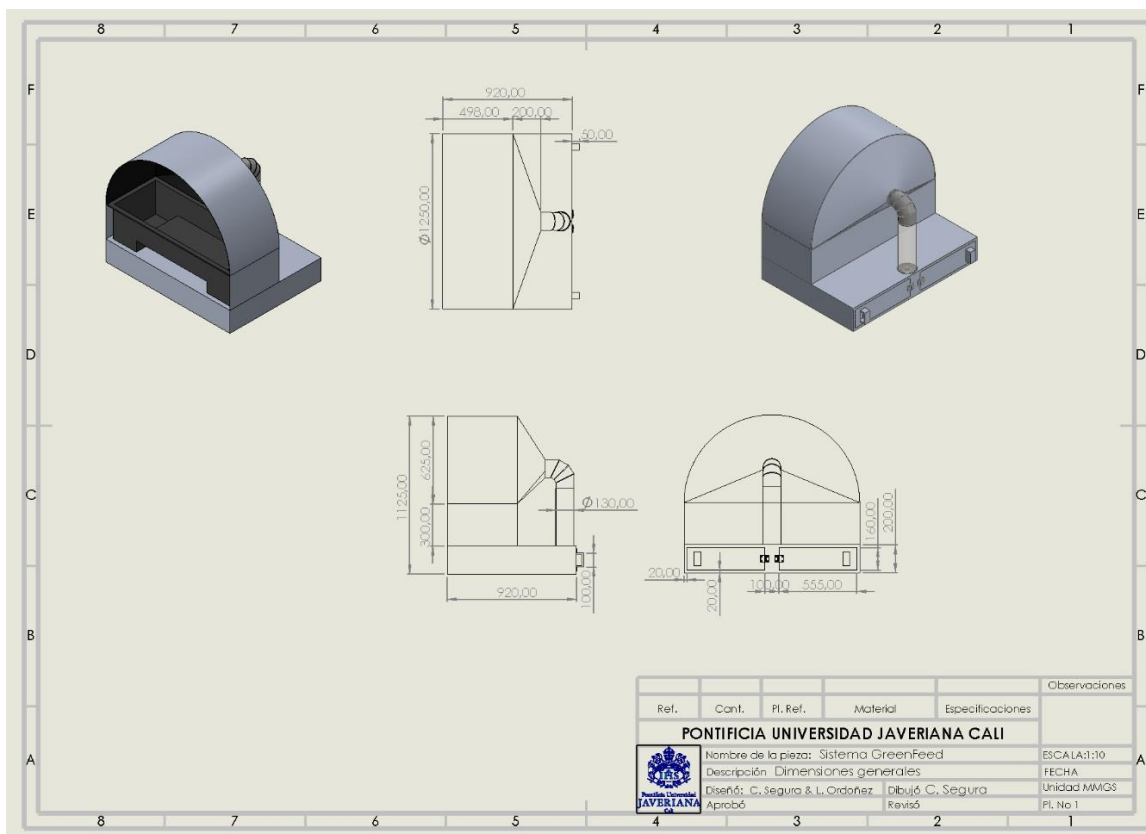


Figura 34. Plano Sistema Greenfeed.

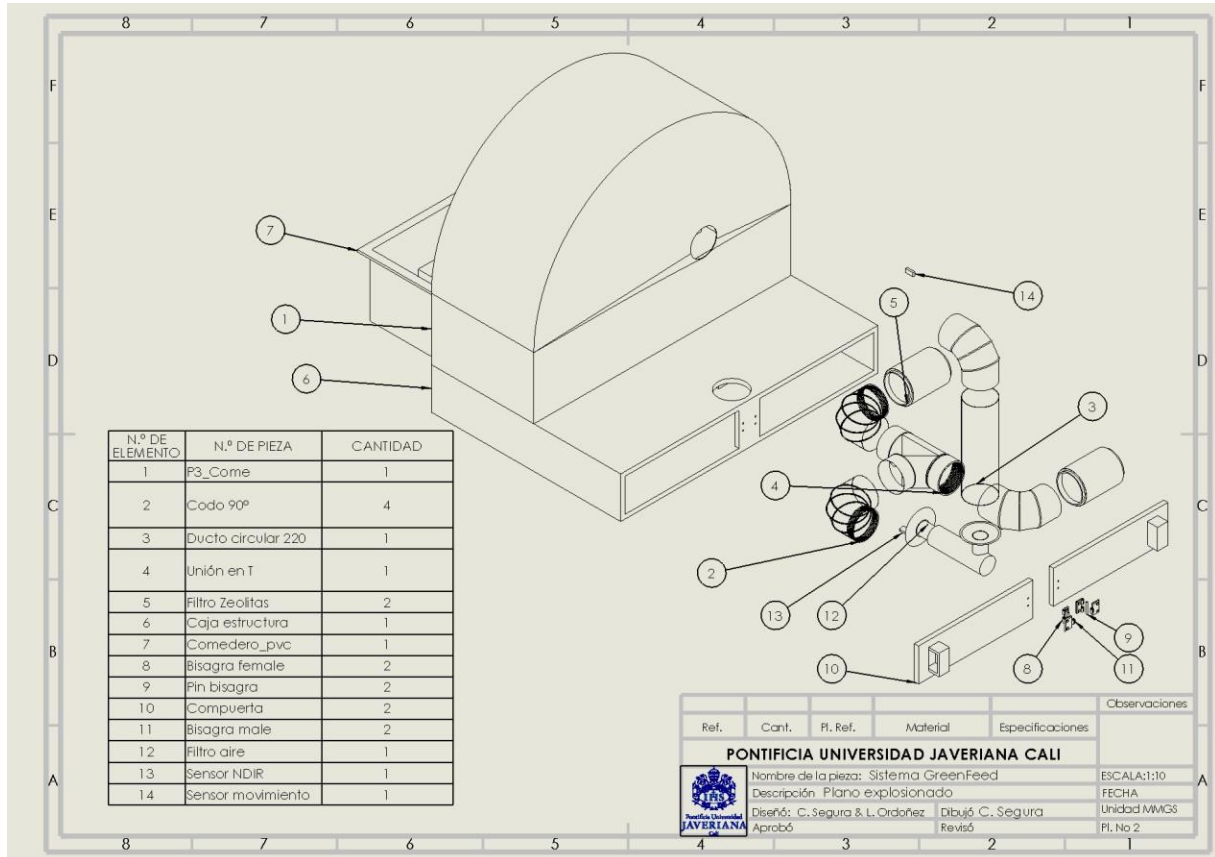


Figura 35. Plano explotado.

9.7.1 Campana:

El comedero fue ubicado a un nivel bajo, orientado hacia el suelo, teniendo en cuenta la anatomía y el comportamiento natural de las vacas. Las vacas, como animales rumiantes, están biológicamente adaptadas para comer pasto directamente del suelo. Su estructura corporal especialmente la posición de su cuello, la forma de su cabeza y la disposición de sus dientes incisivos inferiores frente a una encía superior dura facilita que arranquen y mastiquen el alimento de forma eficiente cuando mantienen la cabeza inclinada hacia abajo.

Además, comer en esta posición incrementa hasta un 12 % la producción de saliva, lo que mejora un 26% el consumo de alimento, además, de ser un factor clave para su proceso

de rumia y digestión, ya que la saliva ayuda a amortiguar el pH del rumen y mejora la fermentación de los alimentos [32]. Para favorecer esta postura, el comedero debe estar al menos a 15 cm encima del nivel del suelo donde se encuentran los animales (ver Figura 36), lo que permite a las vacas mantener una posición corporal cómoda y natural durante el tiempo que dedican a alimentarse, reduciendo el estrés físico y favoreciendo su bienestar.

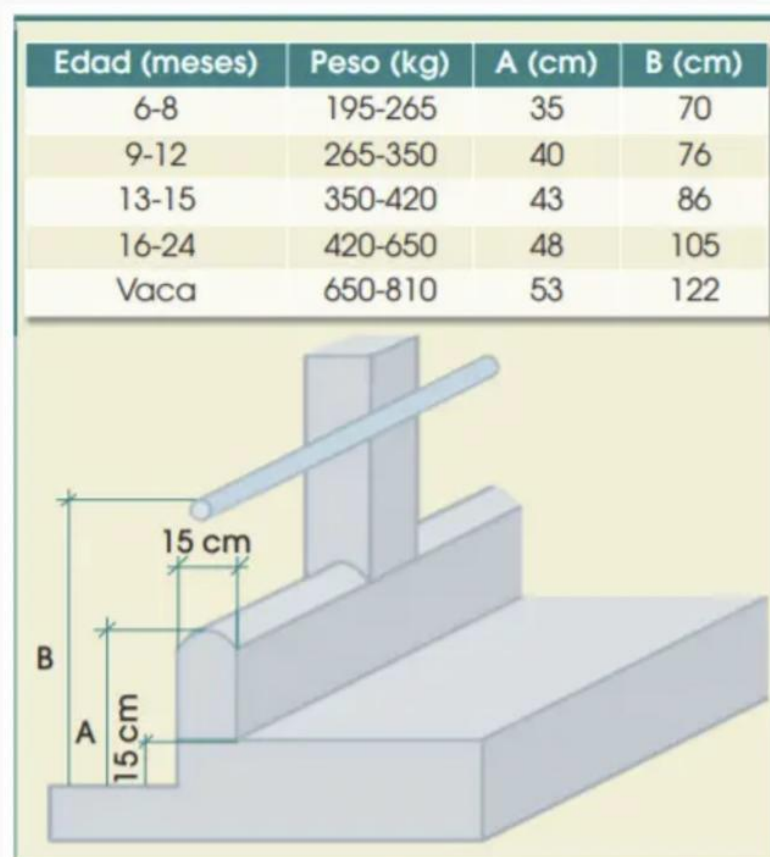


Figura 36. Dimensiones referencia para comedero de bovinos [36].

Se tomó como referencia un comedero comercial para ganado, específicamente el modelo de saladero con capacidad de 120 litros, con el fin de asegurar un dimensionamiento adecuado que permita a la vaca alimentarse cómodamente, sin generar estrés, además de certificaciones y garantías (ver Anexo D: Ficha técnica comedero/saladero). Por otra parte, tomando en cuenta la Figura 38 que muestra las dimensiones generales de una vaca, fue posible estimar las medidas necesarias de la cabeza para el diseño de un comedero. La

imagen proporciona datos como la longitud de la nariz a la cola, la altura a la cruz, la altura del pecho y la longitud del paso. Aunque no se especifican directamente las dimensiones de la cabeza, al analizar las proporciones del cuerpo, se observa que la cabeza ocupa aproximadamente un quinto del largo total del animal. Dado que la distancia de la nariz a la cola es de 2.550 mm, se estima que el largo de la cabeza es de aproximadamente 400 a 500 mm. Comparando la altura del pecho, que es de 825 mm, se puede inferir que la altura de la cabeza también se sitúa entre 400 y 500 mm. Respecto al ancho de la cabeza, aunque no se muestra en la imagen, se puede considerar un valor típico para vacas de razas lecheras como la Holstein, que varía entre 200 y 300 mm. Estas estimaciones permiten diseñar adecuadamente la abertura y la altura del comedero, asegurando que las vacas puedan alimentarse de manera cómoda y natural, respetando su anatomía y promoviendo su bienestar.



Figura 37. Dimensiones comedero comercial [37].

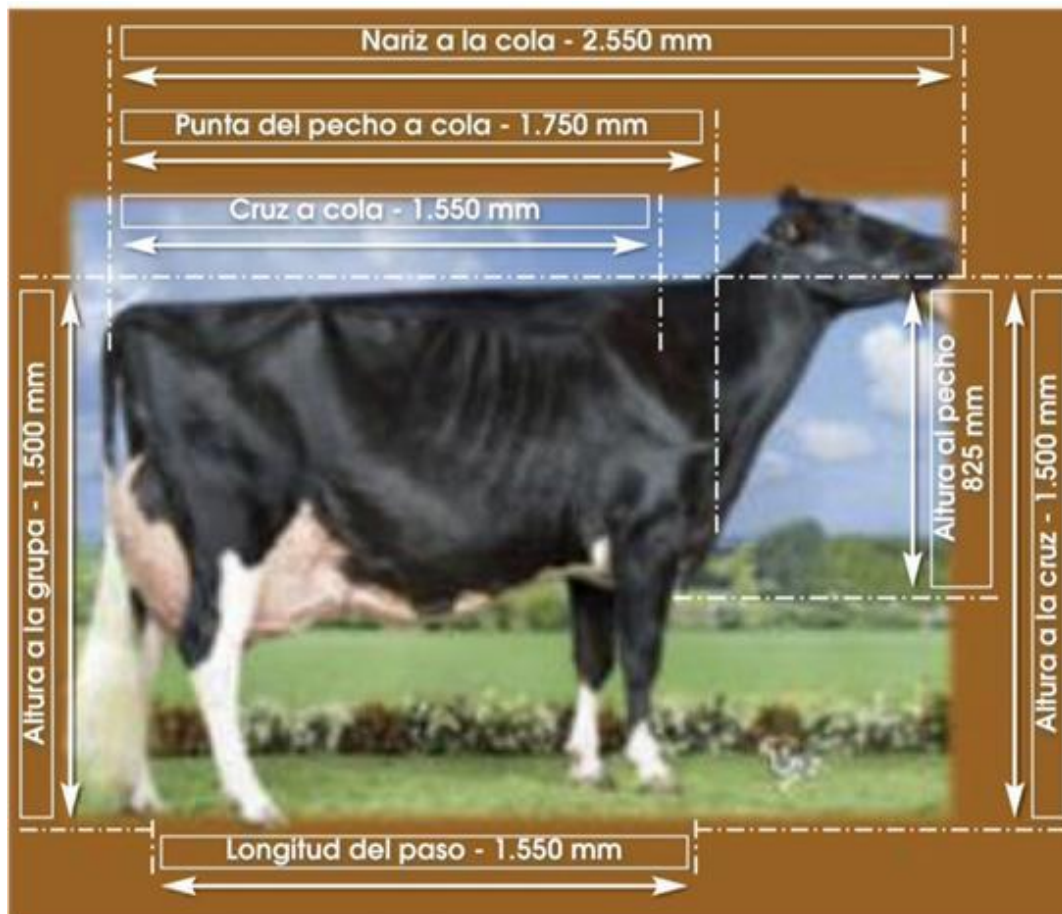


Figura 38. Dimensiones de una vaca Holstein[36].

Se utilizó el software SolidWorks para diseñar el comedero, tomando como referencia el tercer requerimiento de normativa, el cual establece la necesidad de evitar superficies agudas o formas que puedan causar estrés en los animales. Por ello, se optó por una estructura de forma ovalada y bordes redondeados. En el diseño se consideraron las dimensiones promedio de la cabeza de la vaca, las cuales son el largo de la cabeza es de aproximadamente 40 a 50 cm, 20-30 cm de ancho, asegurando un acceso cómodo y seguro. Asimismo, se seleccionó el material indicado en la Tabla 10. Comparación materiales para el comedero., garantizando resistencia y facilidad de limpieza. El comedero incluye un compartimiento inferior destinado a contener los ductos y equipos del sistema y todo el conjunto será pintado en color negro mate para minimizar reflejos y contribuir al bienestar animal.

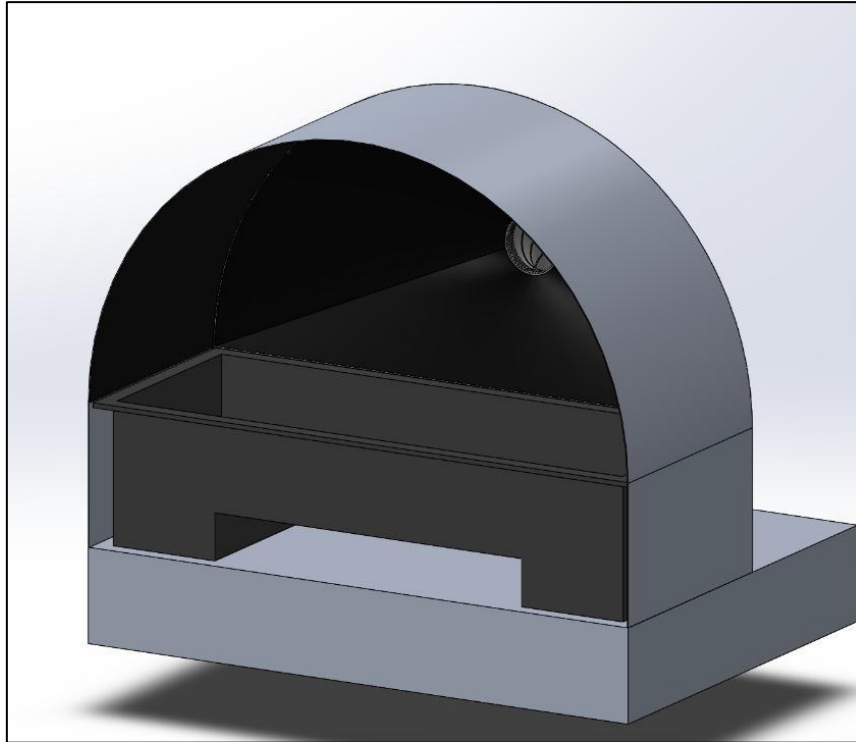


Figura 39. Modelo 3D del comedero diseñado para bovinos.

9.7.2 Sistema de detección de saturación del adsorbente:

Con el fin de garantizar un funcionamiento continuo y eficiente del sistema de captura de metano, se implementó un mecanismo automatizado de detección de saturación del material adsorbente (zeolita). Este sistema se basa en la medición en tiempo real de la concentración de metano a la salida del módulo de adsorción. Para ello, se integró un sensor infrarrojo no dispersivo (NDIR), el cual permite cuantificar la presencia del gas en el flujo efluente.

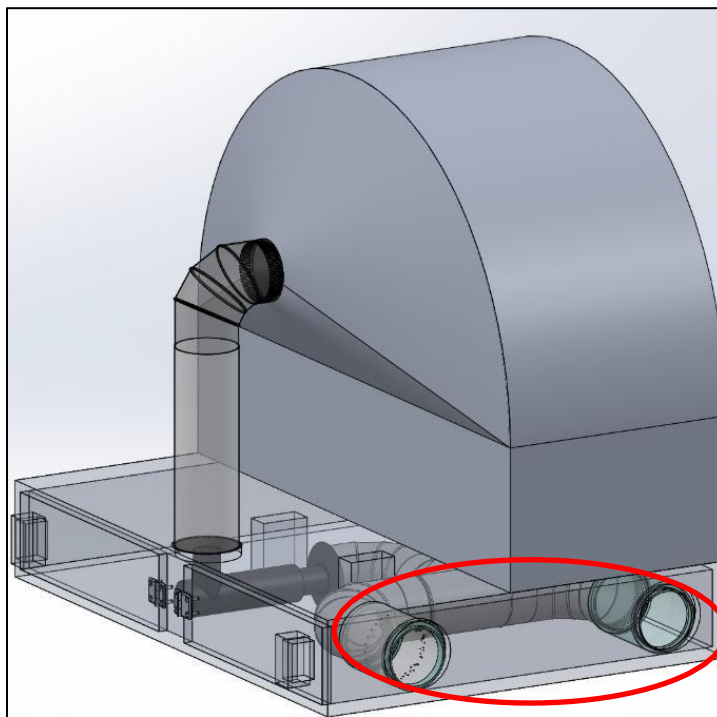


Figura 40. Sistema de adsorción por zeolitas.

Durante el funcionamiento normal, cuando las zeolitas aún no han alcanzado su punto de saturación, la concentración de metano medida en el gas de salida es cercana a cero. No obstante, a medida que el material adsorbente se aproxima a su capacidad máxima, comienza a observarse un aumento progresivo en la concentración de metano en el efluente. El sistema ha sido programado para detectar un umbral de concentración predefinido (por ejemplo, >10 ppm), que actúa como señal de saturación del adsorbente.

Al alcanzarse este umbral, el sistema desvía el flujo de aire hacia un segundo cartucho con zeolita nueva o regenerada. De esta manera, se asegura la continuidad del proceso sin pérdida significativa de metano hacia la atmósfera.

La lógica de control puede ser implementada en una placa microcontroladora programable, la cual recibe datos en tiempo real del sensor NDIR y ejecuta las acciones correspondientes según la lógica de umbral. Esta integración facilita la operación autónoma del sistema, minimiza la necesidad de intervención humana y aumenta la eficiencia general del proceso de captura de metano en entornos ganaderos.

9.7.3 Filtro:

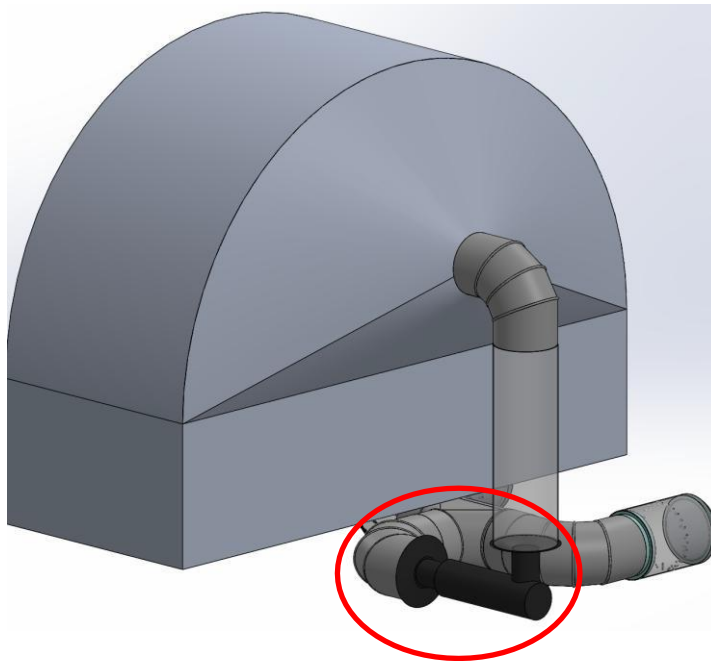


Figura 41. Modelo 3D del comedero, ubicación filtro de aire.

Considerando las condiciones del entorno en el que se implementará el sistema propuesto, se identificó la presencia de residuos y partículas que podrían afectar la precisión de las mediciones, tales como el polvo generado por el forraje verde, el concentrado y otras fuentes propias del ambiente en sistemas de producción animal. Con el fin de mitigar esta interferencia, se determinó la necesidad de incorporar un elemento filtrante que impidiera el ingreso de dichas partículas a la zona de medición.

La selección del filtro se fundamentó en los tamaños de partícula reportados por la norma ASHRAE (2015), la cual establece que en ambientes animales es común la presencia de partículas denominadas 'polvo respirable' [38], con diámetros superiores a 10 μm . Dado que estas partículas provienen en gran medida del alimento y del ambiente circundante, su consideración resulta pertinente para este caso de estudio. En función de este criterio y con el objetivo de garantizar una filtración eficiente, se seleccionó el filtro modelo C125003 (ver Figura 33), el cual presenta una geometría compatible con el diseño del sistema y cumple con los requerimientos técnicos de la aplicación.

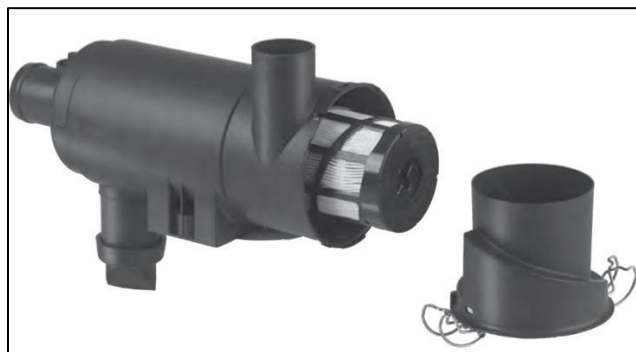


Figura 42. Filtro de aire B045008.

Para seleccionar el filtro de aire, se ubicó el caudal del sistema ($1,26 \text{ m}^3/\text{min}$) en las curvas de desempeño proporcionadas por el fabricante. Se optó por el filtro que generara la menor restricción (ver Figura 43), sin embargo, dado que el caudal de operación está por debajo del rango especificado por el fabricante, se eligió el filtro modelo filtro B045008 de Donaldson (ver Tabla 18), ya que presenta la menor diferencia respecto al caudal recomendado, además de contar con una geometría, diseño y mecanismo de funcionamiento adecuados para nuestra aplicación.

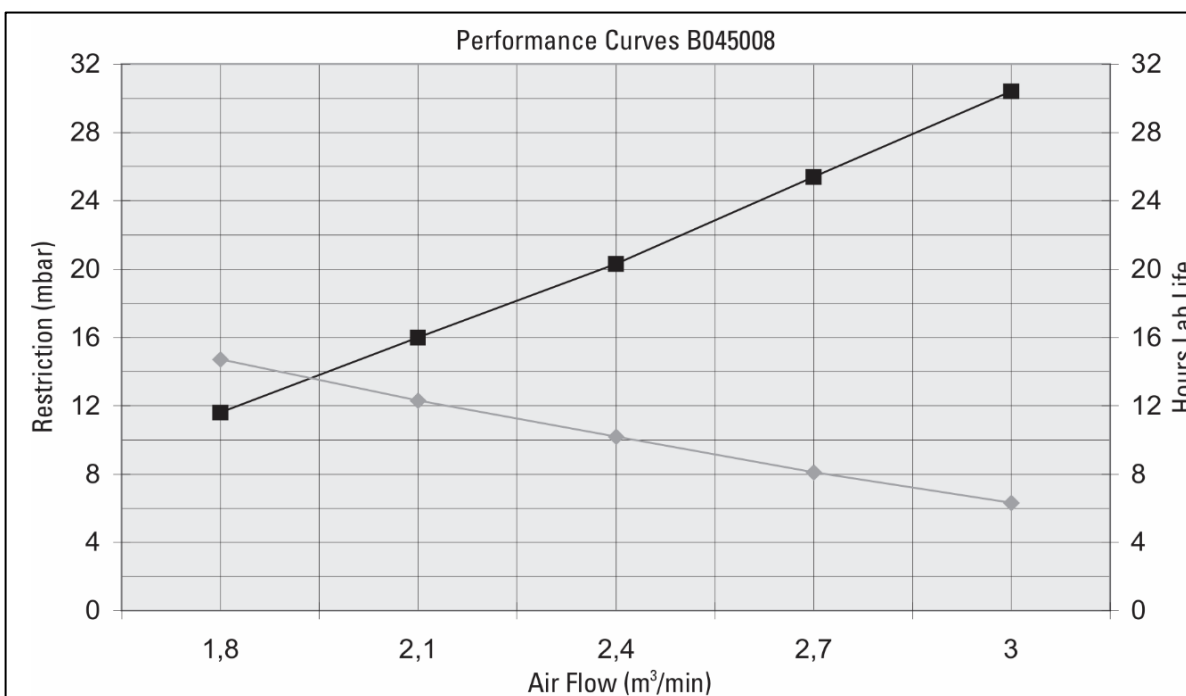


Figura 43. Gráfico operación filtro B045008.

Air Cleaner Model No.	Airflow m ³ /min.	Range Dimensions (mm)										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
B045008	2 - 3	133	51	51	342	99	72	41	157	189	52	72
B055006	3 - 4	152	64	64	404	99	73	49	157	244	52	77
B065045	4 - 6	180	76	76	408	120	73	53	188	241	52	90

Tabla 18. Comparación filtros de aire.

El sistema cuenta con un compartimiento inferior, denominado base, sobre el cual se apoya toda la estructura del dispositivo (ver Anexo A. Plano piezas).

Este espacio fue diseñado con una doble función: por un lado, conducir el flujo de aire proveniente del comedero hacia un filtro de aire, el cual evita la entrada de partículas de polvo que podrían afectar la precisión del sensor de medición de metano; y por otro, servir como zona de organización interna para componentes esenciales del sistema, como el ventilador, la fuente de alimentación y los módulos de control electrónico (ver Figura 44).

Posteriormente, el sistema pasa a una etapa de captura de metano mediante zeolitas, un material con alta capacidad de adsorción. Esta etapa está organizada con un sistema de doble filtro: el flujo pasa inicialmente por un filtro cargado con zeolitas, y una vez este alcanza su capacidad máxima de adsorción, se activa una válvula de conmutación que redirige el flujo hacia un segundo filtro, permitiendo que el primero sea vaciado o regenerado sin interrumpir la operación continua del sistema.

Este diseño cíclico asegura una captura eficiente y constante del metano, permitiendo al mismo tiempo un mantenimiento ordenado y sin pérdida de datos, lo cual es clave para aplicaciones de monitoreo ambiental y análisis de emisiones en ganado.

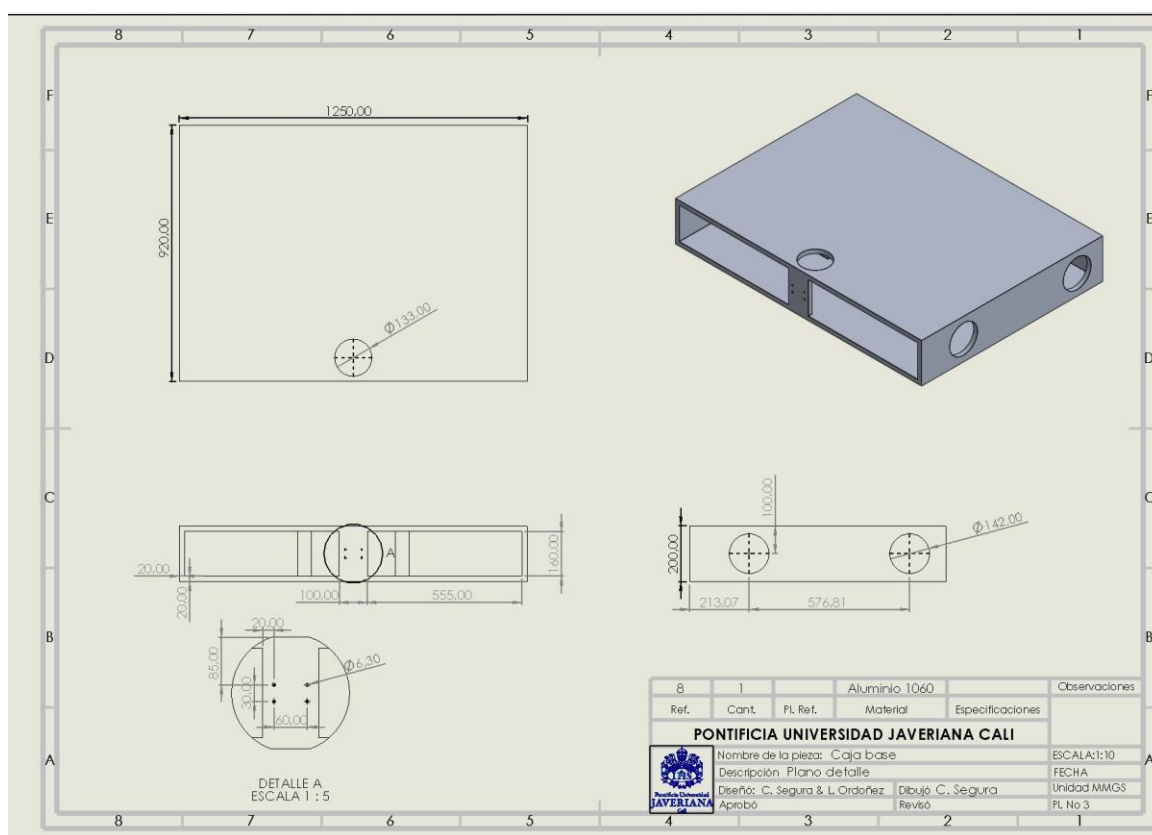


Figura 44. Plano caja base.

Para el modelado en CAD, algunos componentes como el sensor NDIR y la fuente de alimentación y control fueron simplificados con el fin de facilitar el diseño general del sistema. Sin embargo, en el caso específico del sensor, se utilizaron las dimensiones reales proporcionadas en su datasheet (ver Figura 25). Este detalle fue crucial, ya que las medidas

del sensor representaron uno de los principales criterios para su selección frente a otros métodos de medición. Su reducido diámetro de 21 mm permitió incorporarlo directamente dentro del ducto de 12,7 cm, por donde pasa el flujo de metano, asegurando así una lectura precisa y representativa de las emisiones generadas durante el proceso de alimentación.

Adicionalmente, las dimensiones propuestas para el comedero fueron definidas considerando una dieta mixta compuesta por concentrado y forraje verde, con una densidad estimada del concentrado entre 500 y 600 kg/m³. Bajo estos parámetros, el comedero cuenta con una capacidad de carga de entre 105 y 126 kg, suficiente para cubrir una sesión típica de alimentación sin necesidad de recarga inmediata.

Por último, se incorporaron componentes descargados de la plataforma McMaster y GrabCAD, tales como el ventilador y las bisagras, respectivamente, otorgando el debido crédito a sus autores originales (ver

Recursos Externos Utilizados). Para obtener información más detallada sobre componentes específicos, por favor consulte los anexos al final de este documento.

9.8 Análisis mecánico:

El análisis mecánico del presente elemento fue realizado mediante el software SolidWorks, empleando su módulo de simulación para evaluar los esfuerzos a tensión. Con el objetivo de validar dicho análisis, se procedió al cálculo de la fuerza aplicada en un escenario representativo: el impacto del bovino con la cabeza contra la estructura de la campana. En consecuencia, la simulación se efectuó en la zona de mayor criticidad, la cual se presenta en la Figura 45. En esta se detallan tanto la dirección como la magnitud de la fuerza aplicada. Los cálculos asociados a esta fuerza se desarrollan en la siguiente sección.

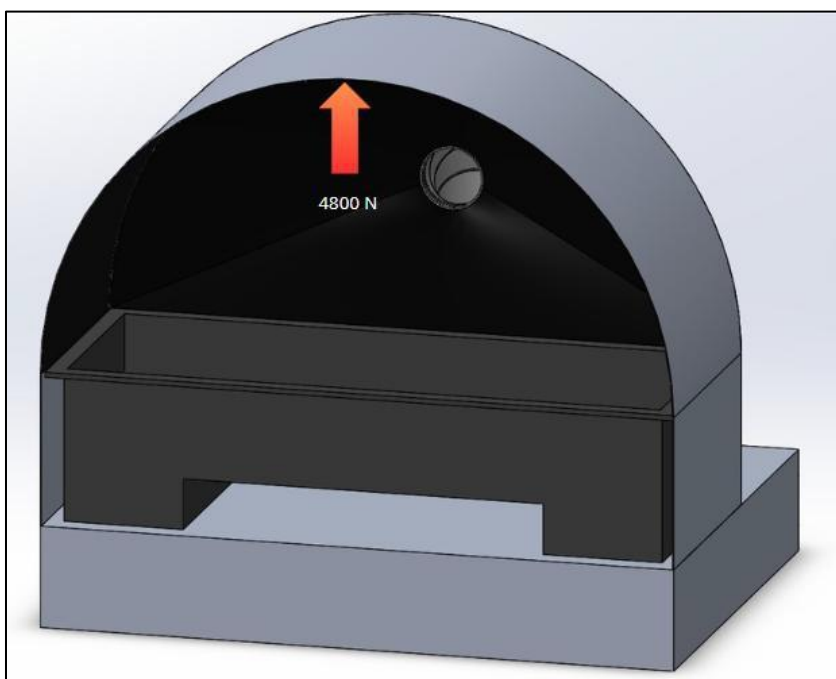


Figura 45. Representación del esfuerzo por impacto generado por el cabezazo de una vaca (4800 N) sobre la campana de captura.

En el siguiente cálculo se realizó un análisis dinámico para determinar la fuerza ejercida por el bovino al impactar la carcasa estructural de la campana.

Parámetro	Valor
Masa de la cabeza (kg)	80
Velocidad del impacto (m/s)	3
Tiempo de contacto (s)	0.05
Cambio de momento (kg·m/s)	240
Fórmula utilizada:	$F = (m * \Delta v) / \Delta t$
Donde:	
F = Fuerza promedio (N)	
m = Masa de la cabeza de la vaca (kg)	
Δv = Velocidad de impacto (m/s)	
Δt = Tiempo de contacto (s)	
Cálculo:	$F = (80 \text{ kg} * 3 \text{ m/s}) / 0.05 \text{ s}$
	F = 4800.00 N

Tabla16. Calculo Dinámica

Para estimar la magnitud de la fuerza que puede generar una vaca al propinar un cabezazo a una estructura, se recurre a los principios de la dinámica del impacto, específicamente al concepto de impulso. En impactos de corta duración, como es el caso de un cabezazo, la fuerza promedio F ejercida durante el choque puede calcularse mediante la relación:

$$F = \frac{m \times \Delta v}{\Delta \tau}$$

Donde m representa la masa de la cabeza de la vaca, Δv es el cambio de velocidad (que en este caso se asume igual a la velocidad de impacto, ya que se detiene bruscamente al chocar con la estructura), y $\Delta \tau$ es el tiempo de contacto durante el impacto.

En este estudio, se asumieron los siguientes valores aproximados, basados en literatura de anatomía veterinaria, estudios de biomecánica animal y observaciones empíricas del comportamiento bovino:

Masa de la cabeza: 80 kg. Esta estimación se basa en una vaca adulta de aproximadamente 700–800 kg, considerando que la cabeza representa entre un 10 y un 12% de la masa corporal total.

Velocidad de impacto: 3 m/s. Este valor representa una embestida significativa pero razonable, teniendo en cuenta la capacidad de aceleración de un bovino y comparaciones con animales similares como carneros y toros.

Tiempo de contacto: 0.05 s. Se trata de un valor representativo de un impacto brusco contra una superficie sólida, como madera o metal, según datos de biomecánica y simulaciones de colisiones.

Sustituyendo estos valores en la ecuación:

$$F = \frac{80 \times 3}{0.05} = 4800N$$

De este modo, se obtiene que la fuerza promedio ejercida por la vaca durante el cabezazo es del orden de 4800 newtons. Esta magnitud es equivalente al peso de aproximadamente 490 kg bajo la gravedad terrestre, lo cual permite dimensionar la severidad del impacto y su posible efecto estructural.

Este tipo de estimación es útil para el diseño de estructuras rurales resistentes al contacto con animales grandes, así como para estudios de seguridad y comportamiento animal en espacios confinados o de manejo intensivo.

Con base en los cálculos previos, se procedió a establecer las condiciones necesarias para llevar a cabo el análisis de esfuerzos a tensión.

Para ello, se definieron manualmente los parámetros correspondientes a la malla, las condiciones de sujeción y la aplicación de la fuerza. En particular, la malla fue configurada de manera que se garantizara una calidad óptima, adecuada para obtener resultados precisos y confiables en la simulación mostrada en la Figura 47.

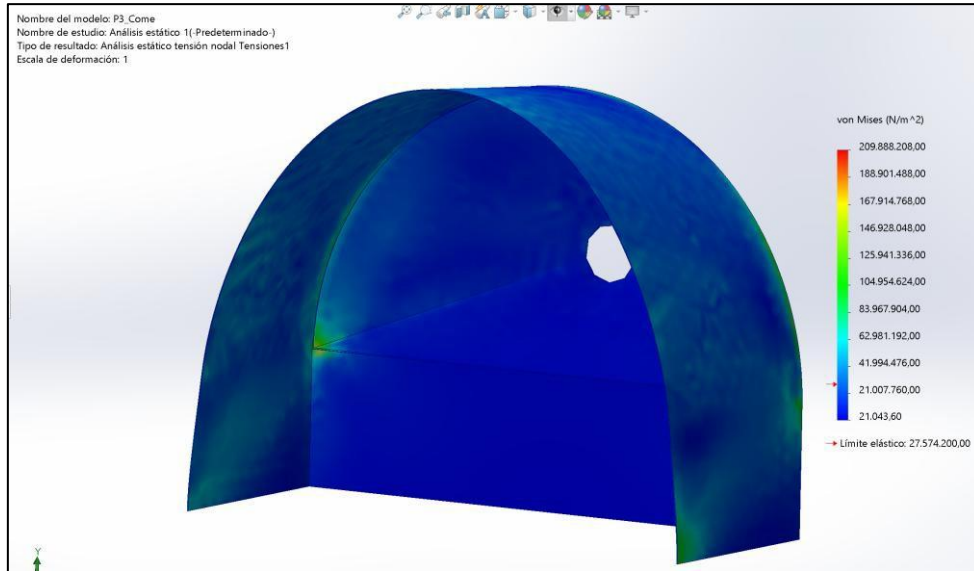


Figura 46. Simulación del esfuerzo por impacto generado por el cabezazo de una vaca (4800 N) sobre la campana de captura.

9.8.1 Cubierta:

El análisis mecánico de la cubierta fue realizado utilizando el software SolidWorks, mediante su módulo de simulación orientado a la evaluación de esfuerzos a tensión. Con el objetivo de validar dicho análisis, se consideró como escenario representativo la carga generada por el peso propio de la campana sobre la cubierta figura 38. En consecuencia, la simulación se llevó a cabo en la zona de mayor criticidad, la cual se presenta en la figura 39. En dicha figura se ilustran tanto la dirección como la magnitud de la carga aplicada, así como el factor de seguridad resultante del análisis.

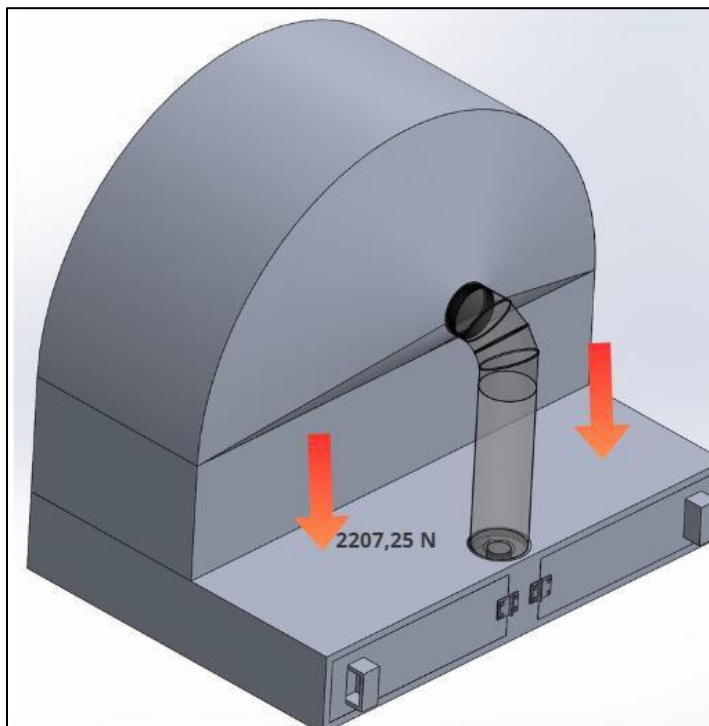


Figura 47. Representación de la carga estática (2207,25 N) ejercida por el peso combinado de la campana y el comedero lleno.

En el siguiente Tabla 19 se presentan los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de la fuerza ejercida. Dicha fuerza fue determinada aplicando el procedimiento que se detalla a continuación:

Elemento	Peso
Campana	14kg
Comedero	210 L

Tabla 19. Peso componentes.

Se parte de la suposición de que el comedero se encuentra completamente lleno de agua como caso crítico. Para determinar la masa del líquido contenido, es necesario realizar una conversión de unidades de litros (L) a metros cúbicos (m^3). Posteriormente, este volumen se multiplica por la densidad del agua ($1000 \text{ kg}/m^3$), obteniéndose así la masa del fluido. A partir de este valor, se le agrega el peso de la campana y se aplica la correspondiente ecuación 10, para calcular la fuerza ejercida, expresada en newtons (N).

$$F = 225 \times 9.81 = 2207,25N \text{ (10)}$$

A continuación, se presenta la imagen correspondiente al análisis de esfuerzos realizado en la cubierta, donde se visualiza la distribución de los esfuerzos y el factor de seguridad resultante de la simulación.

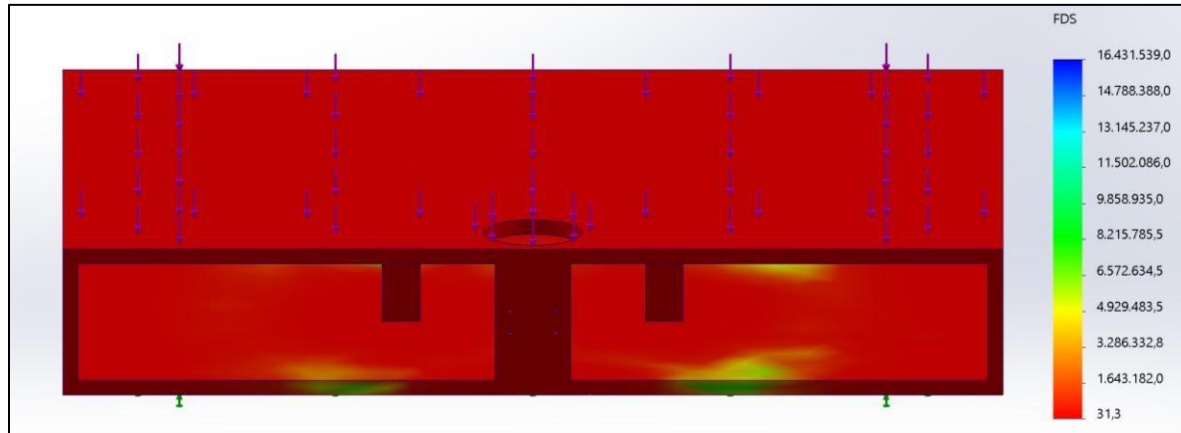


Figura 48. Factor de seguridad.

El color predominante en la figura es el rojo, que representa el mínimo factor de seguridad (FDS), superior a 30, como se observa en la barra de escala de la derecha. Este valor sugiere que en la mayoría de las zonas la estructura está muy por encima del umbral mínimo requerido, proporcionando una gran robustez y margen de seguridad.

En las esquinas inferiores y algunos puntos cercanos al centro de la base, se observan áreas en tonos verdes y amarillos, que corresponden a factores de seguridad más altos, entre 226,682 y 906,715, pero aun significativamente superiores a 1, que es el valor mínimo aceptado para evitar fallas.

Este comportamiento es esperado, ya que en estas zonas se concentran esfuerzos derivados de puntos de apoyo o transferencia de carga, como el ventilador axial central, el peso del sensor NDIR o los componentes internos, los cuales generan ligeras concentraciones de esfuerzos.

No se presentan zonas críticas en color azul o violeta, lo que indica que en ninguna parte de la estructura el FDS se aproxima al límite inferior de seguridad. En consecuencia, se puede concluir que el diseño estructural de la máquina cumple satisfactoriamente con los criterios de integridad mecánica y confiabilidad operativa.

9.9 Análisis Simulación de fluidos:

Para evaluar el comportamiento del sistema, se realizó una simulación en SolidWorks utilizando el complemento Flow Simulation, con el fin de observar el flujo del fluido bajo condiciones normales de operación. Se estableció una temperatura ambiente de 20°C y condiciones de salida a presión atmosférica (101,325 kPa).

En los resultados se identificaron zonas donde la velocidad del fluido aumenta, tal como se espera en puntos de reducción del área de flujo. Los vectores de velocidad obtenidos en el volumen simulado revelan un comportamiento altamente dirigido. El aire, con una condición de entrada que incluye metano a una velocidad de 2 m/s, es conducido desde el comedero a través del ducto hasta la salida, la cual se encuentra también a presión atmosférica.

En la sección de salida se presenta un incremento de la velocidad, y la ausencia de zonas de recirculación caótica, junto con la morfología suave de las líneas de corriente, indica un régimen de flujo predominantemente laminar. Esto evidencia la eficacia del diseño para guiar y controlar el movimiento del fluido de manera eficiente.

Desde la perspectiva del análisis de pérdidas de carga, se identificaron como puntos críticos los cambios de dirección en los codos del ducto, así como las caídas de presión asociadas al paso del fluido a través del filtro de aire y el lecho de zeolitas. Estos elementos podrían incrementar la fricción y reducir el caudal útil del sistema.

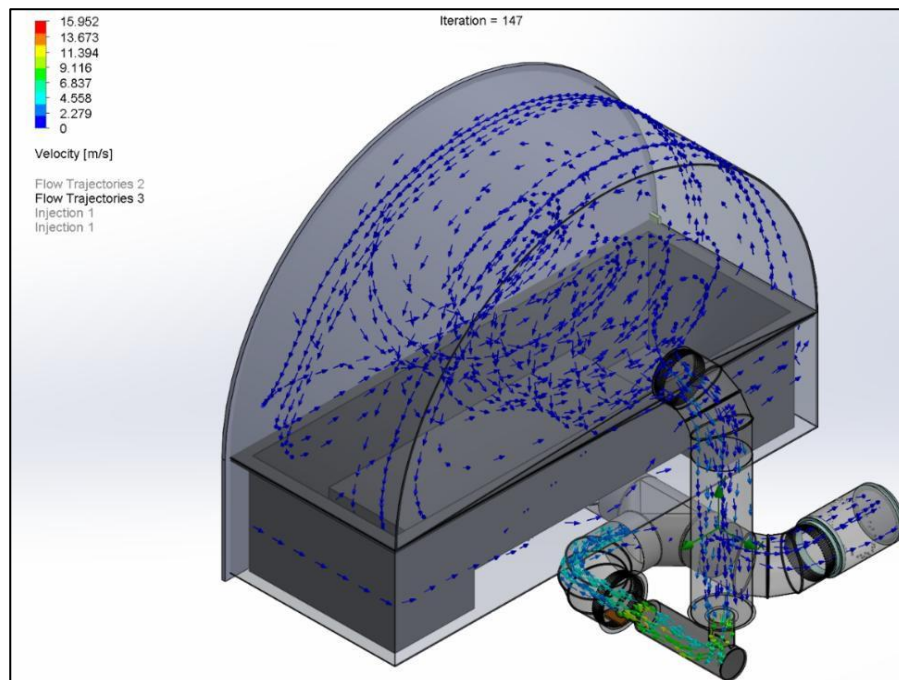


Figura 49. Simulación CFD del sistema de ventilación.

9.10 Consumo energético estimado:

Basado en la información técnica suministrada en las hojas de datos de los componentes del sistema, incluyendo el ventilador axial W2G115AT2901, el sensor NDIR para detección de metano (ver Anexo C: DataSheet sensor NDIR) y el sensor de movimiento PIR, se realizó una estimación preliminar del consumo energético total. Este análisis permite determinar el requerimiento energético diario del sistema, el cual asciende a aproximadamente 1.84 kWh por día, considerando un régimen de operación de 8 horas diarias.

Componente	Voltaje operación	Corriente (A)	Potencia (W)
Ventilador	12	0,375	4,5
Sensor NDIR	5	0,04	0,2
Sensor PIR movimiento	5	0,00017	0,00085
Total estimado (W)		4,7	
Consumo diario (KWh/día)		0,11	
Consumo mes (KWh/mes)		3,38	

Tabla 20. Consumo energético estimado.

Este valor es fundamental para el dimensionamiento del sistema de alimentación, en particular al considerar una fuente basada en batería y/o paneles solares. Asegurar una autonomía energética suficiente garantiza la continuidad del funcionamiento del sistema aún en condiciones de baja radiación solar o desconexión de red. Adicionalmente, el uso de energía solar y almacenamiento en baterías contribuye significativamente a la reducción de la huella de carbono del sistema, promoviendo una operación más limpia, sostenible y alineada con principios de ingeniería ambiental y eficiencia energética.

9.11 Presupuesto:

Se presenta la estructura del presupuesto está organizada por categorías clave, incluyendo elementos mecánicos, electrónicos, sensores, sistemas de ventilación, y mano de obra técnica. Cada ítem ha sido evaluado en función de su funcionalidad dentro del sistema, su

disponibilidad en el mercado colombiano y su relación costo-beneficio para garantizar un diseño eficiente, duradero y adaptado a las condiciones operativas requeridas.

Parte	Cantidad	Valor unitario (COP)	Costo de manufactura (COP)	Valor de montaje (COP)	Valor total (COP)
Campana	1	150000	200000	200000	550000
Comedero	1	120000	80000	80000	280000
Burletes de goma	3	6817	0	0	20451
Bisagra de piano	2	15000	0	0	30000
Cabina	1	200000	600000	200000	1000000
Tuberías	2	10000	400000	300000	720000
DC Axial Fan	1	55000	0	320000	375000
Microcontrolador	1	32000	0	30000	62000
Sensor de movimiento	1	7000	0	0	7000
Sensor NDIR	1	500000	800000	0	1300000
Cauchos	4	20000	0	20000	100000
Filtro	1	150000	0	30000	180000
Codos	2	5000	0	10000	20000
Zeolitas	25	3708	320000	0	412700
Cambio Zeolitas	1	50000	100000	0	150000
Tornillos con tuerca autobl.	26	2000	0	20000	72000
Tiempo de diseño	80	9070	0	0	725600
SUBTOTALES					
Total costos de compra					3050000
Total manufactura/montaje					2621751
TOTAL GENERAL					5.671.751

Tabla 21. Presupuesto propuesto.

El costo total estimado para la fabricación y diseño del sistema mecánico propuesto asciende a \$5.280.934 COP, incluyendo tanto los materiales y componentes técnicos como el tiempo de diseño dedicado al desarrollo de la solución. Esta estimación se basa en cotizaciones reales dentro del mercado colombiano, considerando proveedores locales y plataformas de acceso general, lo que facilita su replicabilidad. La tabla de presupuesto permite visualizar de manera detallada cada uno de los elementos seleccionados, junto con sus respectivas fuentes de adquisición, cantidades, unidades de medida y costos de montaje o manufactura, cuando corresponde.

Cabe destacar que ciertos componentes no están disponibles de forma estandarizada y requieren procesos de manufactura personalizada. Tal es el caso de la campana de captura, que debe incorporar bordes redondeados para facilitar el flujo de alimento y evitar acumulaciones, garantizando así tanto el funcionamiento técnico del sistema como el bienestar del animal. Esta geometría se obtiene mediante procesos de rolado o curvado de lámina de aluminio, los cuales permiten moldear la chapa en formas circulares utilizando rodillos. De manera similar, el comedero —al presentar una forma cuadrada— puede ser fabricado mediante técnicas convencionales de corte y doblado, utilizando herramientas básicas de manufactura.

Adicionalmente, la estructura de la cabina o caja requiere perforaciones específicas para el montaje de sensores, ventiladores y cableado. Estas adaptaciones implican procesos de taladrado y mecanizado sobre perfiles y placas de aluminio, todos ellos contemplados dentro del presupuesto final. Estas tareas son indispensables para asegurar la integridad del sistema, su precisión funcional y su adaptabilidad a los diferentes componentes electrónicos seleccionados.

Finalmente, es importante subrayar que los sistemas comerciales destinados a la medición de metano en bovinos pueden alcanzar precios que oscilan entre USD \$50.000 y \$500.000 [7], [8], dependiendo del proveedor, las especificaciones técnicas y los servicios adicionales incluidos. En comparación, el sistema desarrollado en este proyecto representa una alternativa de bajo costo, con funcionalidades equivalentes y adaptaciones ergonómicas que respetan el comportamiento natural del animal. Esta propuesta se constituye como una herramienta eficiente, accesible y escalable, que puede ser implementada en entornos productivos y experimentales, contribuyendo activamente a los esfuerzos de mitigación de emisiones en el sector ganadero.

10. Conclusiones

A partir de una revisión sistemática de la literatura y del análisis de sistemas existentes, se identificaron los principales requerimientos técnicos y operativos para el diseño de un sistema eficaz de medición y captura de metano en bovinos. El sistema debía adaptarse a la morfología de razas como la Holstein y operar de forma continua durante la alimentación y la rumia, sin interferir con el comportamiento natural del animal. Las variables fisiológicas como el flujo y la velocidad de exhalación, así como los rangos típicos de concentración de metano, fueron el punto de partida para definir las características del sistema, permitiendo un diseño que minimizara la dispersión del gas y asegurara la representatividad de las muestras. Finalmente, se priorizó un enfoque no invasivo, con niveles de presión sonora inferiores a 60 dB, para preservar el bienestar animal y garantizar la viabilidad del sistema en condiciones reales de uso.

A partir de los requerimientos técnicos identificados y las normas sacadas ASHRAE handbook, HVAC Applications, sacado de los capítulos Sound and Vibration Control y Animal Facilities, para ventilación en ductos. Se diseñó un sistema mecánico integrado con un mecanismo de ventilación y una estructura base que permite su acoplamiento estable, garantizando la seguridad y el correcto funcionamiento del conjunto bovinas an. El diseño fue desarrollado considerando las dimensiones anatómicas de una vaca Holstein, los perfiles de exhalación, así como las condiciones necesarias de flujo de aire y presión para asegurar una recolección eficiente del metano, sin generar molestias ni interferir con el comportamiento natural de los animales. Se evaluaron parámetros clave como la velocidad de captura del gas, la naturaleza del flujo interno y el nivel de ruido. En función de estos

criterios, se seleccionó un ventilador que cumpliera con los requerimientos del sistema, priorizando un bajo nivel sonoro y un desempeño eficiente en la extracción de gases.

Mediante un análisis comparativo de tecnologías existentes, se seleccionó un módulo de medición NDIR y captura molecular adecuado para la detección precisa de metano en condiciones dinámicas propias del ambiente bovino. Se priorizaron características como la sensibilidad, precisión y repetibilidad, asegurando la identificación fiable de concentraciones bajas y variables de metano. El módulo de captura de zeolitas 13x, ofrece una adsorción del metano, que se caracteriza por ser estable, las zeolitas tienen porosidades que aumentan el área transversal que mejora la adsorción superficial de las moléculas de metano, con una capacidad de capturar entre un 70-90% del metano del flujo. Esta selección garantiza que el sistema final pueda ofrecer mediciones continuas y representativas, fundamentales para el monitoreo ambiental y la evaluación de estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero.

Se llevaron a cabo simulaciones computacionales mediante análisis por elementos finitos y dinámica de fluidos computacional con el propósito de evaluar la resistencia mecánica y el comportamiento del flujo volumétrico en los componentes críticos del sistema. Los resultados demostraron que elementos estructurales, como la caja base, soportan adecuadamente las cargas operativas previstas, alcanzando un factor de seguridad mínimo superior a 31, lo cual garantiza su integridad y durabilidad. De igual manera, la campana, sometida a una carga equivalente al impacto generado por un cabezazo bovino, no presentó deformaciones relevantes, lo que confirma su rigidez estructural. Las simulaciones de flujo permitieron, además, identificar zonas críticas, como codos y reducciones de sección, en las que se generan alteraciones en la dinámica del flujo.

Por último, el diseño propuesto representa una reducción de costos de entre 97.46 % y 99.75 %, comparado con cámaras de respiración que oscilan entre \$50,000 y \$500,000 USD. Esta diferencia convierte al sistema en una solución viable y accesible para entornos ganaderos de diferentes escalas, especialmente en países en desarrollo.

11. Cronograma

Actividades	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14
OBJETIVO 1														
Revisión de literatura sobre sistemas y tecnologías de captura de metano	•	•	•											
Identificación de sistemas existentes: evaluación de ventajas y desventajas		•	•											
Definición de requerimientos específicos del diseño basado en literatura			•	•										
Consulta con expertos en medición de metano y bienestar animal				•	•									
OBJETIVO 2														
Lluvia de ideas y análisis de métodos de diseño: selección de alternativas				•	•									
Diseño preliminar de la cámara de alimentación: esquemas y requisitos estructurales					•	•								
Selección y evaluación de sensores de metano					•	•								
Simulación inicial de funcionamiento en software CAD					•	•	•							
OBJETIVO 3														
Elección del sistema de flujo de aire para mejorar la captura de metano							•	•						
Evaluación de materiales para la cámara y componentes que minimicen la absorción de gases							•	•						
Simulación de flujo de aire y distribución de metano en el diseño								•						
Análisis estructural mediante elementos finitos									•					
OBJETIVO 4														
Pruebas preliminares del sistema en ambiente controlado										•				
Análisis de datos de captura de metano en simulación controlada										•				
Iteración y ajustes al diseño según resultados de pruebas											•			
Validación final del sistema en simulaciones de condiciones reales												•		
REPORTE FINAL														•

Figura 50. Cronograma actividades

12. Bibliografía

- [1] “Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU),” in *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press, 2023, pp. 747–860. doi: 10.1017/9781009157926.009.
- [2] P. J. Gerber, “Tackling climate change through livestock A global assessment of emissions and mitigation opportunities,” 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/289509969>
- [3] Haro Reyes José and Gómez Bravo Carlos, “Mitigación de emisiones provenientes de la ganadería en la región andina,” 2018.
- [4] S. O’Connor, F. Noonan, D. Savage, and J. Walsh, “Advancements in Real-Time Monitoring of Enteric Methane Emissions from Ruminants,” *Agriculture 2024, Vol. 14, Page 1096*, vol. 14, no. 7, p. 1096, Jul. 2024, doi: 10.3390/AGRICULTURE14071096.
- [5] T. D. Gardiner *et al.*, “Determination of the absolute accuracy of UK chamber facilities used in measuring methane emissions from livestock,” *Measurement*, vol. 66, pp. 272–279, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2015.02.029.
- [6] Oswaldo Ramos Ramos Jaime, “Condiciones de alimentación en ganado bovino para disminuir las emisiones de metano en el contexto nariñense,” Mar. 2019.
- [7] G. Blanco, E. Santalla, and N. Del, “Estandarización de costos para proyectos de captura de metano en rellenos sanitarios.”
- [8] J. Ghassemi Nejad *et al.*, “Advances in Methane Emission Estimation in Livestock: A Review of Data Collection Methods, Model Development and the Role of AI Technologies,” Feb. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ani14030435.
- [9] L. Wu, P. W. G. G. Koerkamp, and N. Ogink, “Uncertainty assessment of the breath methane concentration method to determine methane production of

- dairy cows,” *J Dairy Sci*, vol. 101, no. 2, pp. 1554–1564, Feb. 2018, doi: 10.3168/JDS.2017-12710.
- [10] V. C. Souza *et al.*, “Modeling the effects of heat stress in animal performance and enteric methane emissions in lactating dairy cows,” *J Dairy Sci*, vol. 106, no. 7, pp. 4725–4737, Jul. 2023, doi: 10.3168/JDS.2022-22658.
- [11] Dhakal Shobhakar, Minx Jan Christoph, and Toth Ferenc L., “Emissions Trends and Drivers,” in *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press, 2023, pp. 215–294. doi: 10.1017/9781009157926.004.
- [12] P. C. Garnsworthy, J. Craigon, J. H. Hernandez-Medrano, and N. Saunders, “Variation among individual dairy cows in methane measurements made on farm during milking,” *J Dairy Sci*, vol. 95, no. 6, pp. 3181–3189, Jun. 2012, doi: 10.3168/jds.2011-4606.
- [13] “Home - WOAHP - World Organisation for Animal Health.” Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.woah.org/en/home/>
- [14] “A-emissao-de-metano-pelas-vacas”.
- [15] “Cocho automatizado mede gases de efeito estufa na bovinocultura | Canal Rural.” Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.canalrural.com.br/pecuaria/cocho-automatizado-mede-gases-efeito-estufa-bovinocultura-54241/>
- [16] A. Thacharodi *et al.*, “The ruminant gut microbiome vs enteric methane emission: The essential microbes may help to mitigate the global methane crisis,” *Environ Res*, vol. 261, p. 119661, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119661>.
- [17] C. Benchaar, C. Pomar, and J. Chiquette, “Evaluation of dietary strategies to reduce methane production in ruminants: A modelling approach.”
- [18] M. G. G. Chagunda *et al.*, “Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector,” *Acta Agriculturae Scandinavica A: Animal Sciences*, vol. 63, no. 2, pp. 68–75, 2013, doi: 10.1080/09064702.2013.797487/ASSET/AF00287D-C55F-48D8-93AF-53609113F1B2/ASSETS/IMAGES/SAGA_A_797487_O_F0003G.GIF.
- [19] K. J. Hammond, D. J. Humphries, L. A. Crompton, C. Green, and C. K. Reynolds, “Methane emissions from cattle: Estimates from short-term measurements using a GreenFeed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer,” *Anim*

- Feed Sci Technol*, vol. 203, pp. 41–52, May 2015, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2015.02.008.
- [20] “Ley_84_de_1989 Experimentacion con animales”.
- [21] “RESOLUCIÓN 136 DE 2020 MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL Por la cual se adopta el Manual de Condiciones de Bienestar.”
- [22] C. Sanitarias and Y. De, “REGLAMENTACION SOBRE LAS PRIMARIA DE GANADO BOVINO Y PORCINO SUBGERENCIA DE PROTECCIÓN Y REGULACIÓN PECUARIA.”
- [23] Anten, “Tamiz molecular de zeolita.” Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: <https://antenchem.com/es/zeolite-molecular-sieve/>
- [24] C. I. V. Manzanilla-Pech, D. Gordo, G. F. Difford, P. Løvendahl, and J. Lassen, “Multitrait genomic prediction of methane emissions in Danish Holstein cattle,” *J Dairy Sci*, vol. 103, no. 10, pp. 9195–9206, Oct. 2020, doi: 10.3168/jds.2019-17857.
- [25] J. Rodolfo *et al.*, “Design and construction of low-cost respiration chambers for ruminal methane measurements in ruminants Diseño y construcción de cámaras de respiración de bajo costo para la medición de metano entérico en rumiantes,” *Rev Mex Cienc Pecu*, vol. 8, no. 2, p. 185, 2017, doi: 10.22319/rmcp.v8i2.4442.
- [26] C. Muñoz, T. Yan, D. A. Wills, S. Murray, and A. W. Gordon, “Comparison of the sulfur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows,” *J Dairy Sci*, vol. 95, no. 6, pp. 3139–3148, Jun. 2012, doi: 10.3168/jds.2011-4298.
- [27] Y. Zhao, X. Nan, L. Yang, S. Zheng, L. Jiang, and B. Xiong, “A review of enteric methane emission measurement techniques in ruminants,” Jun. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ani10061004.
- [28] K. J. Hammond, D. J. Humphries, L. A. Crompton, C. Green, and C. K. Reynolds, “Methane emissions from cattle: Estimates from short-term measurements using a GreenFeed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer,” *Anim Feed Sci Technol*, vol. 203, pp. 41–52, May 2015, doi: 10.1016/J.ANIFEEDSCI.2015.02.008.

- [29] J. Wang *et al.*, "Machine vision for natural gas methane emissions detection using an infrared camera," *Appl Energy*, vol. 257, p. 113998, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2019.113998.
- [30] S. O'Connor, F. Noonan, D. Savage, and J. Walsh, "Advancements in real-time monitoring of enteric methane emissions from ruminants," *Agriculture*, vol. 14, no. 7, 2024, doi: 10.3390/agriculture14071096.
- [31] H. Jedli, S. M. Bouzgarrou, R. Hassani, E. Sabi, and K. Slimi, "Adsorption of CO₂, CH₄ and H₂ onto zeolite 13 X: Kinetic and equilibrium studies," *Heliyon*, vol. 10, no. 23, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e40672.
- [32] G. J. Gallivan, W. N. Mcdonell, and J. B. Forrest, "Comparative pulmonary mechanics in the horse and the cow," 1989.
- [33] H. Mckew *et al.*, "ASHRAE Handbook 2016 - HVAC Systems and Equipment (SI)," 2016. [Online]. Available: www.ashrae.org.
- [34] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, "Mecánica de Fluidos."
- [35] "Datasheet ventilador axial."
- [36] A. Callejo Ramos, "Comederos: diseño, dimensionamiento y manejo," *Frisona Española 201*, May 2021, Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: https://www.engormix.com/lecheria/instalaciones-produccion-lechera/comederos-diseno-dimensionamiento-manejo_a47160/
- [37] "Comedero para ganado ." Accessed: Apr. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.rotoplast.com.co/es/producto/comedero-para-ganado>
- [38] *2015 ASHRAE handbook : heating, ventilating, and air-conditioning applications*. ASHRAE, 2015.

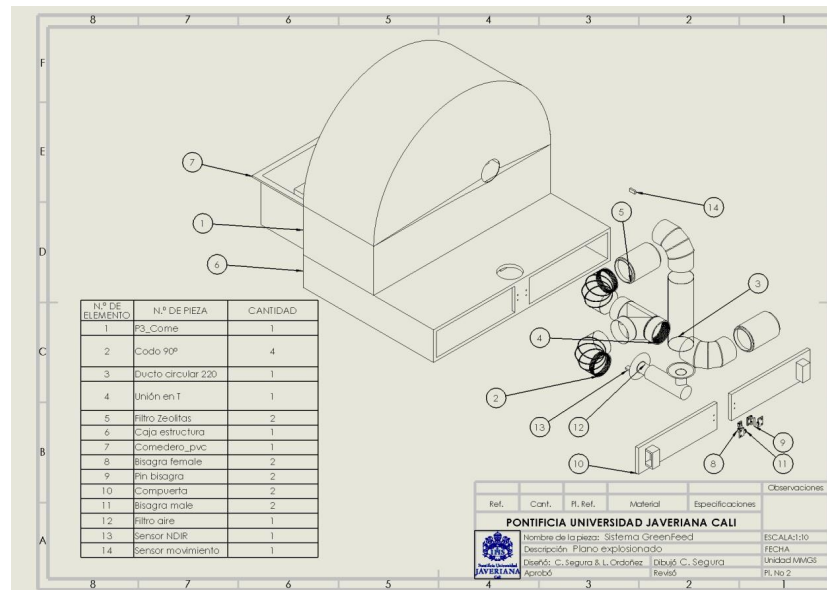
13. Recursos Externos Utilizados

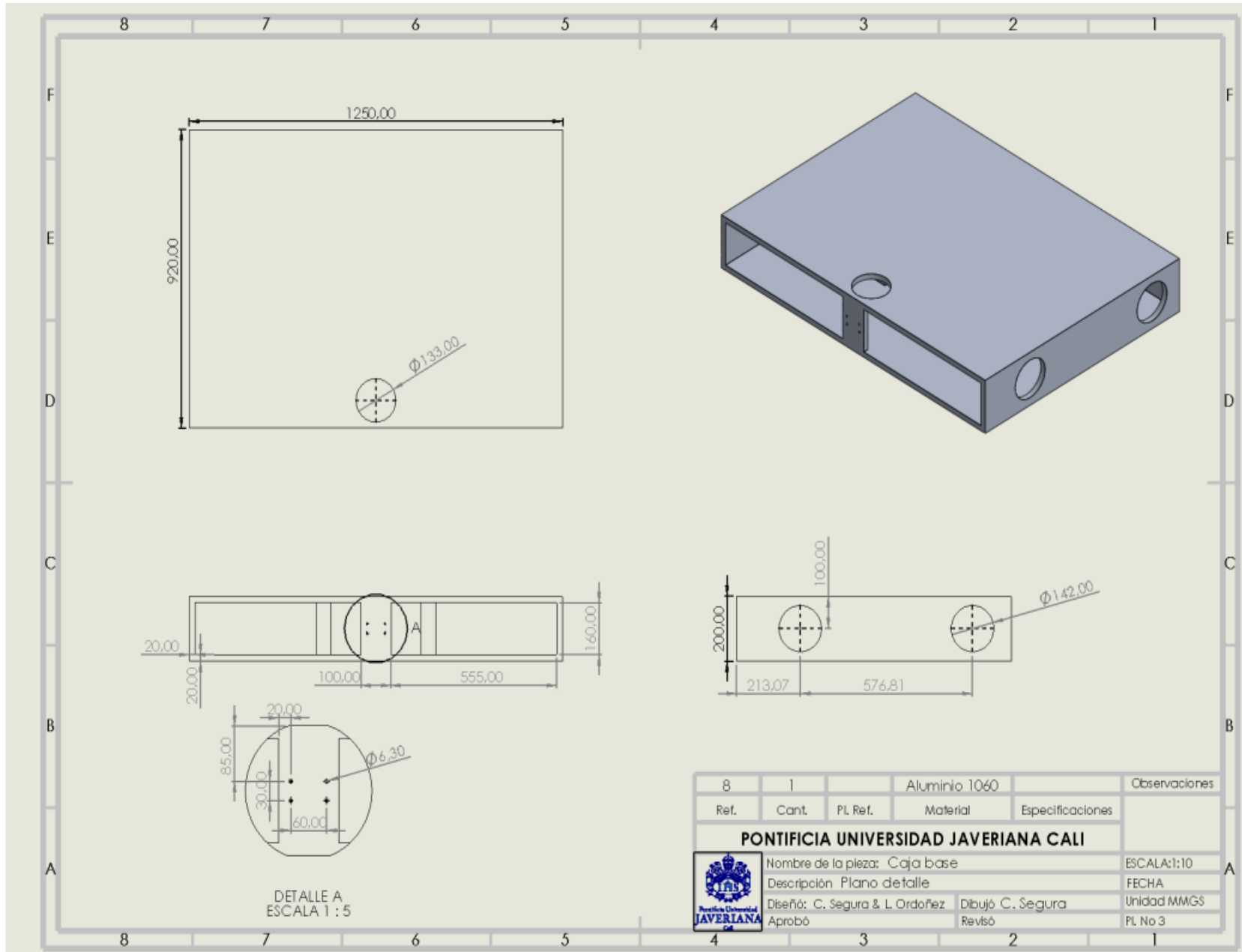
Se incorporaron modelos 3D de dominio público provenientes de la plataforma GrabCAD para representar componentes estándar en el diseño. A continuación, se detallan los modelos utilizados y sus respectivos autores:

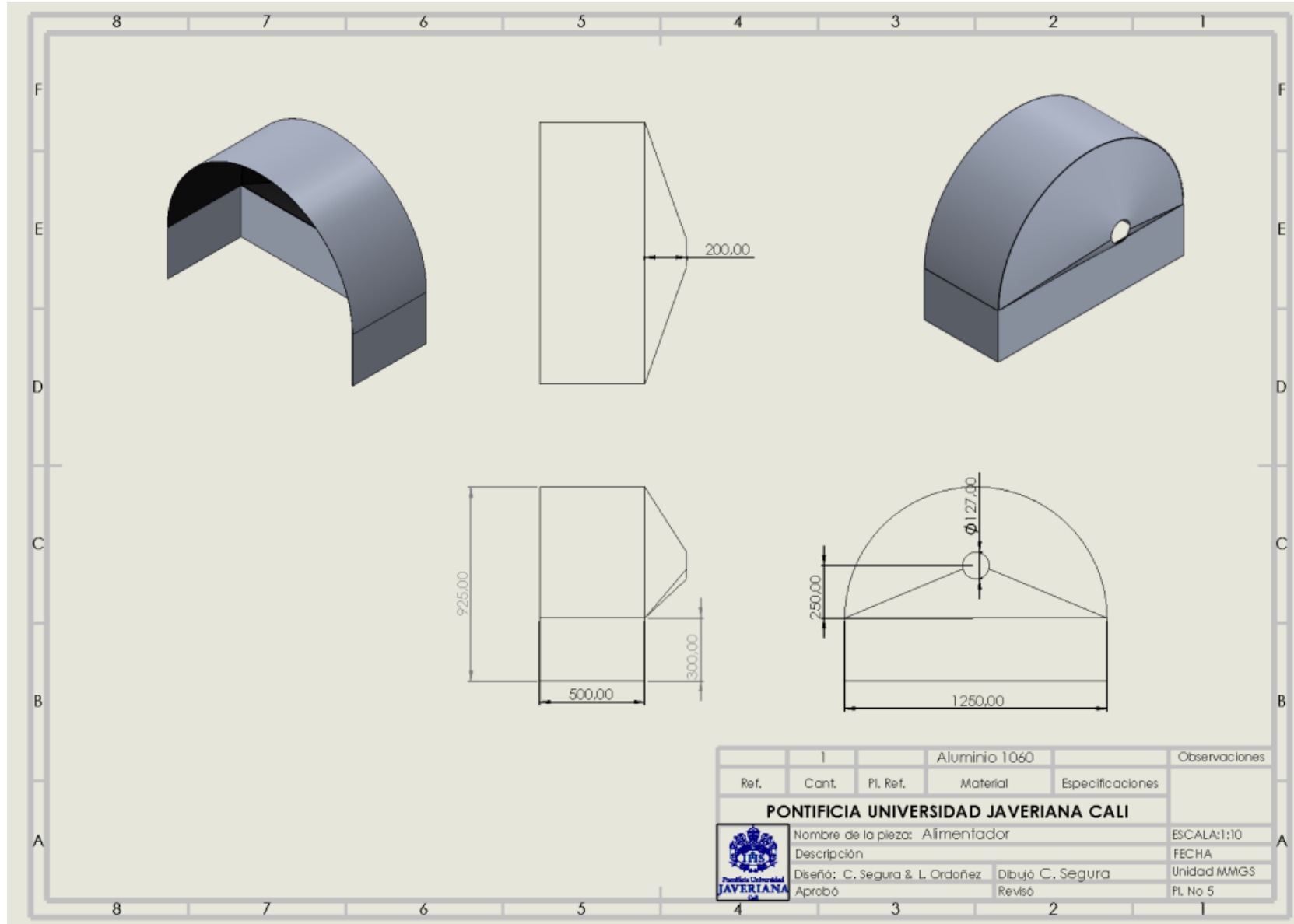
- Accesorios: Codo 90° y unión T, tomado de <https://www.mcmaster.com/>
- Bisagra: Modelo "Yaprak Mentese - Leaf Hinge" creado por Ömür Tokman. Disponible en: <https://grabcad.com/library/yaprak-mentese-leaf-hinge-1>

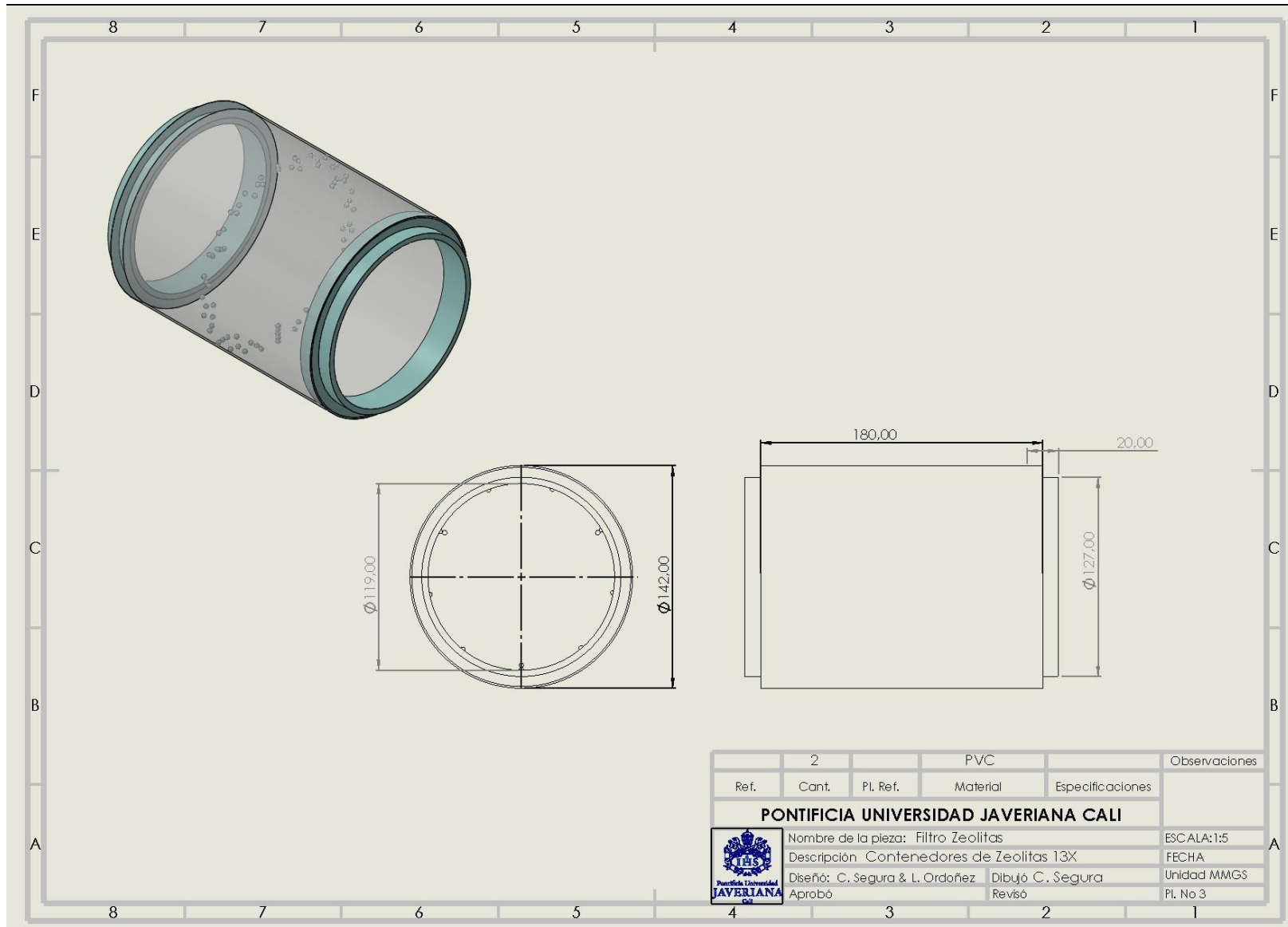
14. Anexos

Anexo A. Planos Piezas.

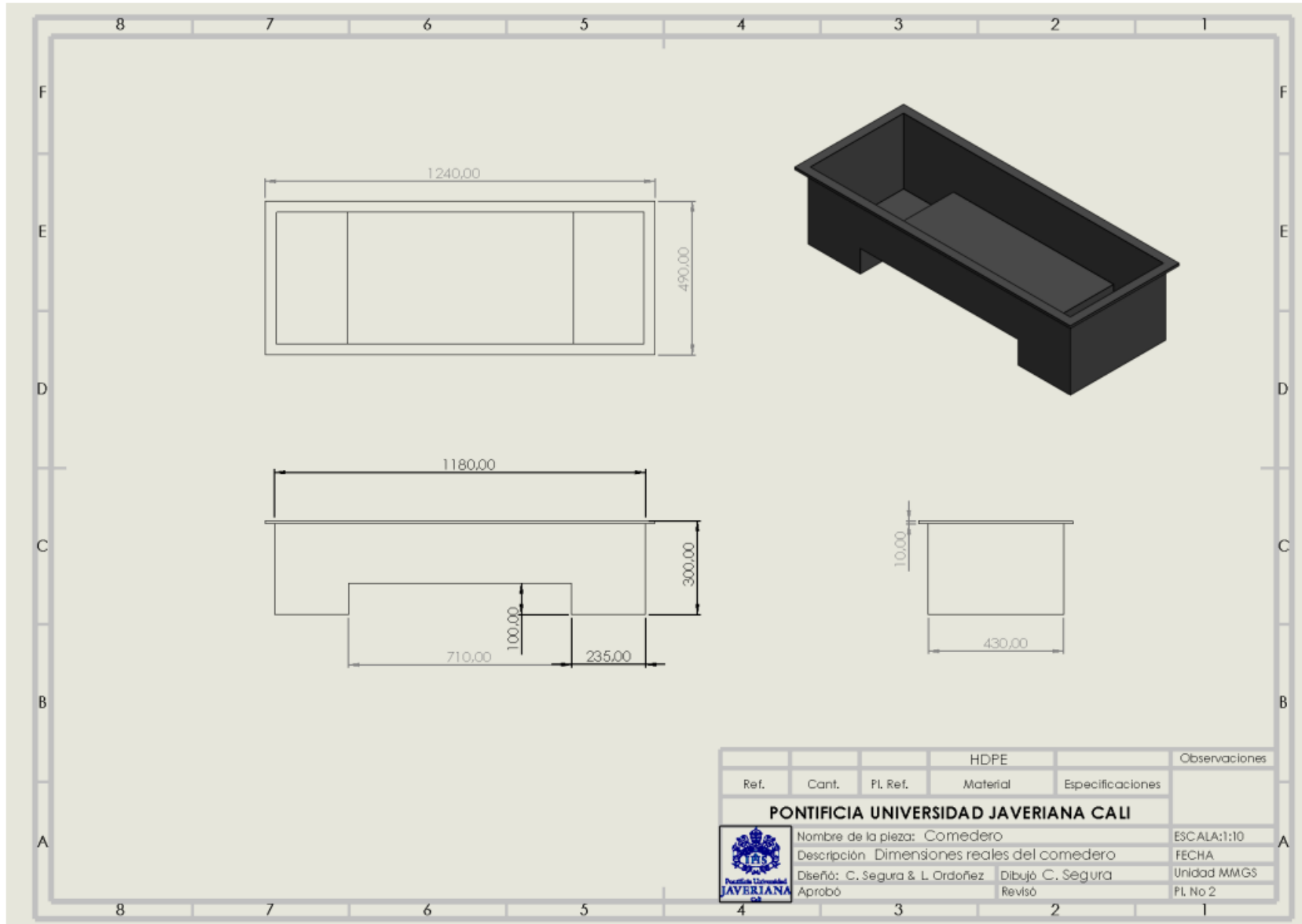








Ref.	Cant.	Pl. Ref.	Material	Especificaciones	Observaciones
	2		PVC		
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI					
Nombre de la pieza: Filtro Zeolitas					ESCALA:1:5
Descripción: Contenedores de Zeolitas 13X					FECHA
Diseño: C. Segura & L. Ordoñez			Dibujó C. Segura		Unidad MMGS
Aprobó			Revisó		Pl. No 3

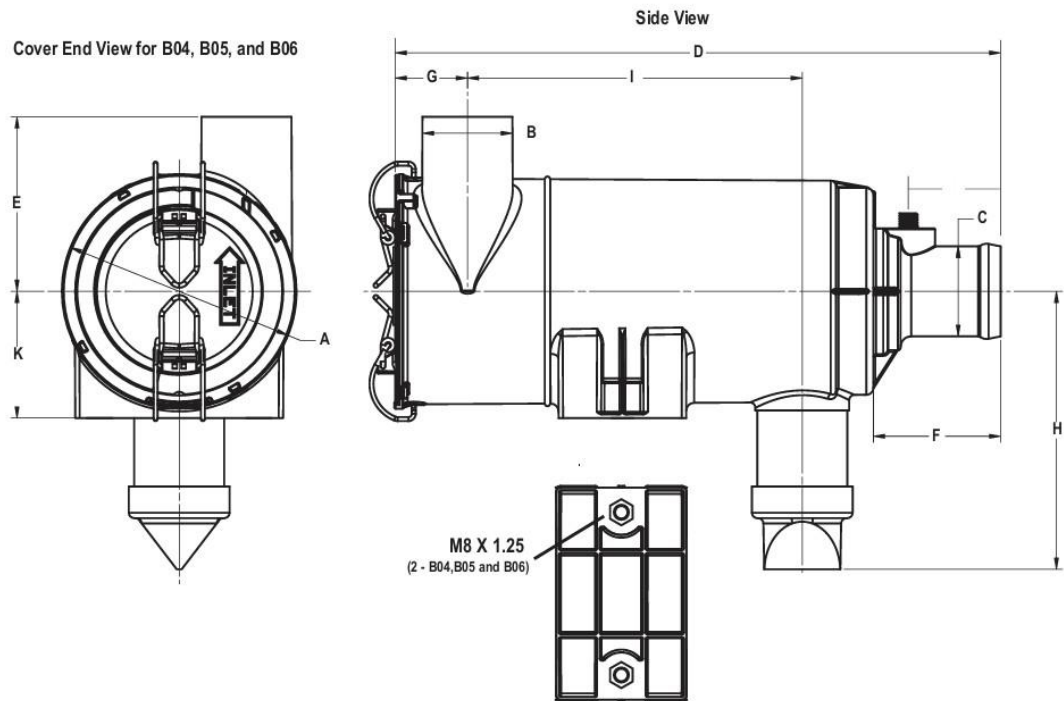


Anexo B: Dimensión filtro de aire y modelos.

FKB Air Cleaner



FKB Specifications - Service Parts



Air Cleaner Model No.	Airflow m ³ /min.	Range Dimensions (mm)										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
B045008	2 - 3	133	51	51	342	99	72	41	157	189	52	72
B055006	3 - 4	152	64	64	404	99	73	49	157	244	52	77
B065045	4 - 6	180	76	76	408	120	73	53	188	241	52	90

Medium Dust Conditions

Service Parts

Air Cleaner Model No.	Main Element	Safety Element	Access Cover Assy	Vacuator™ Valve
B045008	P604457	P603729	P606497	P158914
B055006	P609218	P602427	P609219	P158914
B065045	P609221	P608599	P608592	P158914

FKB Service Instructions

Donaldson.
Rimmon & Lufkin

Installation Recommendations

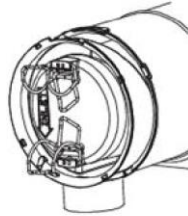
- Shut off your engine.
- Air cleaner orientation is horizontal, with the drop tube pointing down - within +/-15°. For service clearance, allow the entire length of the filter for removal and 35mm for service cover latches.
- Mounting is MB x 1,25 with a maximum torque of 20,34 Nm.
- Connections: Inlet/Outlet maximum torque 4,52 Nm Indicator port maximum torque 2 Nm.
- Inlet accessory note: The air cleaner housing can accommodate a lightweight inlet hood, but not a pre-cleaner or any other accessory. Use of an unapproved intake accessory will void your Donaldson warranty.

Service Instructions

1 Shut off your engine

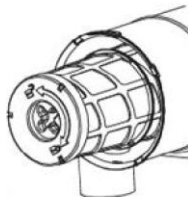
2 Remove service cover

Unlatch and remove the service cover. To remove the primary filter, press and rotate filter counterclockwise until filter is free.



3 Remove the filter

Gently pull the filter out of housing. Avoid dislodging contaminant from the filter or knocking it against the housing.

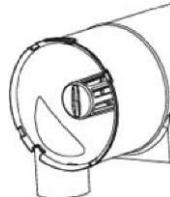


4 Clean the inside surface

With a soft rag, thoroughly clean the inside surface of the housing. **Be** careful not to introduce contaminant into the outlet tube.

5 Check the safety filter

Check safety filter for damage. If damaged, replace. Also check to insure that the safety filter is properly seated in the housing. It should fit snugly inside the outlet tube.



6 Inspect the new primary filter

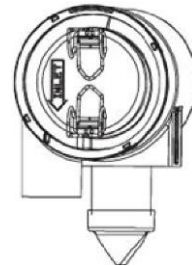
Inspect the new main filter carefully. Check for any voids, cuts, tears or indentations in the urethane-sealing surfaces.

7 Install the new filter

Install new filter by pressing and rotating the filter clockwise until fully engaged to stop.

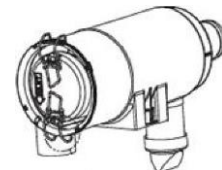
8 Replace the cover

Replace the service cover. The "INLET" arrow should line up with the air cleaner inlet. **DO NOT** force cover onto air cleaner. The cover should go on with no extra force. If cover is not flush to the body, the filter is not properly seated in the housing.



9 Refasten the latches

Refasten latches to secure cover. Make sure that latches penetrate the slots in both the body and the cover.



10 Inspect

Inspect and torque all clamps, bolts and connections in the entire air intake system. Check for holes in piping, and repair if needed. If Vacuator Valve is damaged replace.

11 Restart the engine



Anexo C: DataSheet sensor NDIR.



DATA SHEET
ULTRA-LOW POWER INFRARED
GAS SENSOR MIPEX-04-X-XX-3.1

Technical specification

General specification		
Gas sampling method:	Diffusion	
Operating principle:	Non-Dispersive Infra-Red (NDIR)	
Target gas	CH ₄	
	C ₃ H ₈	
Operating, storage and transportation conditions:	Relative humidity, %	up to 98
	Atmospheric pressure, kPa	80...120
	Temperature*, °C	-40...+60
Warm-up time, sec	≤ 120	
Overall dimensions, mm	52×24×18	
Housing material	Polycarbonate Lexan™	
Weight, g	11.0...13.5	

Measurement specification	
Measurement range, % vol.	0...2.5
	0...5
	0...100
Variability (+20...+25 °C)**	± 0.1% vol. or ± 5% of readings (whichever is greater) for CH ₄
	± 0.05% vol. or ± 5% of readings (whichever is greater) for C ₃ H ₈
Response time (t ₉₀), sec	< 30 (CH ₄ sensors)
	≤ 45 (C ₃ H ₈ sensors)

Electrical specification	
Operating supply voltage, VDC	+2.8...+5.0
Maximum supply voltage, VDC	+5.5
Communication interface	UART
Average current, µA	25...35 max at normal conditions
	40 max at -40...+60 °C
Peak current, mA	2 max

* Term **operating temperature** refers to ambient temperature at which sensor operates and its intrinsic safety is ensured, but sensor readings variability is provided only in specified **temperature range**.

** Variability in whole operating temperature range for any sensor modification is presented below.

Calibration gas	Readings variability within a temperature range	Additional variability due to pressure	Additional variability due to humidity
CH ₄	± 0.1% vol. or ± 5% of readings within the range of +20...+25 °C;	± 0.2% vol. or ± 30% of readings at 100 kPa (test: 80 kPa, 100 kPa, 120 kPa)	± 0.2% vol. or ± 15% of readings (whichever is greater) at 40 °C and 0% RH (test: 20% RH, 50% RH, 90% RH)
	± 0.2% vol. or ± 10% of readings within the range of -10...+20 °C and +25...+40 °C;		
	± 0.4% vol. or ± 20% of readings within the range of -40...-10 °C and +40...+60 °C.		
C ₃ H ₈	± 0.05% vol. or ± 5% of readings within the range of +20...+25 °C;	± 0.1% vol. or ± 30% of readings at 100 kPa (test: 80 kPa, 100 kPa, 120 kPa)	± 0.1% vol. or ± 15% of readings (whichever is greater) at 40 °C and 0% RH (test: 20% RH, 50% RH, 90% RH)
	± 0.1% vol. or ± 10% of readings within the range of -10...+20 °C and +25...+40 °C;		
	± 0.2% vol. or ± 20% of readings within the range of -40...-10 °C and +40...+60 °C.		

Anexo D: Ficha técnica comedero/saladero.

FICHA TÉCNICA		Rotoplast		
CÓDIGO AFAP006	PARTIDA ARANCELARIA 3926909090		Código	DYD-FR07
			Versión	1
			Fecha actualización	23/09/2014
			Nombre del producto:	Colores disponibles
			SALADERO 120 L	Negro ● Azul ● Y otros bajo pedido.
			Línea	<input type="checkbox"/> Agua <input checked="" type="checkbox"/> Agro <input type="checkbox"/> Aseo <input type="checkbox"/> Vial <input type="checkbox"/> Otra
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO				
<ul style="list-style-type: none"> → Su diseño y bajo peso permite apilarlo, reduciendo costos en transporte y almacenamiento. → Protección a los rayos UV. → Fácil de instalar. → Producto arrumable hasta 10 unidades. 				
INFORMACIÓN BÁSICA				
Capacidad volumétrica (LTS)	Capacidad de carga (Kg)	Dimensiones (Cm)	Materiales	Proceso de fabricación
120	N/A	124 x 49 x 30	Polietileno Lineal	Rotomoldeo
CERTIFICACIÓN Y GARANTÍA				
<p>Rotoplast certifica que este producto es fabricado con los más altos estándares de Calidad y es elaborado dando cumplimiento a todas las disposiciones de tipo legal que apliquen, acorde a los lineamientos del sistema de gestión de Calidad de ROTOPLAST, bajo la norma ISO 9001:2015 y que cuenta con (1) año de garantía siempre que el producto sea utilizado en las condiciones de uso recomendadas por el fabricante ROTOPLAST.</p>				

Anexo D: Cálculos sistema de ventilación.

Propiedades del ambiente y coeficientes del sistema		
Temperatura	25	°C
v	0,00001562	m ² /s
p_aire	1,184	Kg/m ³
p_agua	998	Kg/m ³
Patm	101,3	Kpa
α2	1,05	
Factor fricción del PVC	0,019	
Longitud (m)	0,6	
Diámetro campana (m)	1,25	
Altura rectángulo (m)	0,3	

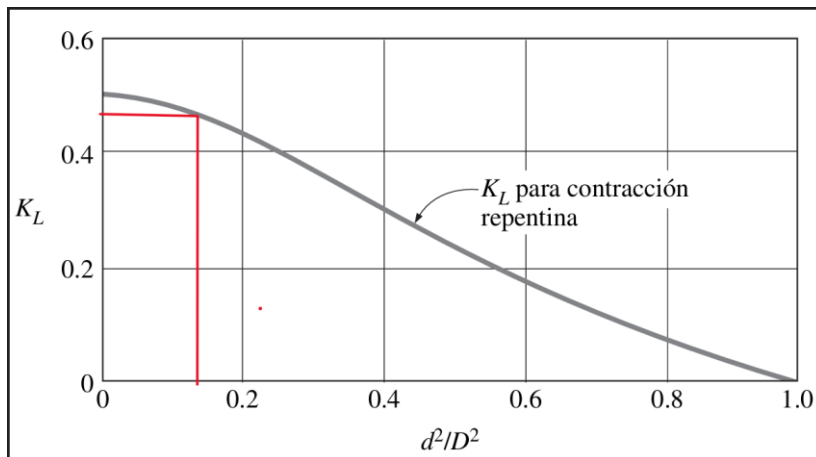
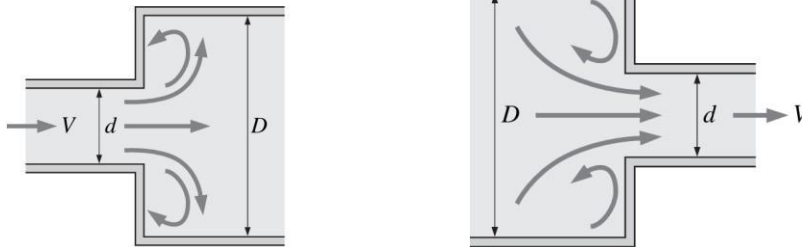
Tabla de formulas	
Área semicírculo	$A = \frac{\pi d^2}{8}$
Área rectángulo	$A = bh$
Caudal (Q)	$Q = V \times A$
Velocidad de captura	$Vc = \frac{V_0 \pi D^2}{48x^2}$
Reynolds	$Re = \frac{V \times D}{v}$
Sumatoria perdidas accesorios	$\sum K_l$
Requerimiento hidrostático del sistema (H _L)	$(f \frac{L}{D} + \sum K_l) \frac{V^2}{2g}$
Conversión requerimiento agua	$H_{req} = H \times \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}}$

Cálculo velocidad de captura		
x	0,5	m
Vc	0,02111281	m/s
Área circulo	0,61359232	m ²
Área rectángulo	0,375	m ²
Q	0,02087196	m ³ /s
	1,2523178	m ³ /min
	44,2252274	CFM

Cálculo velocidad dentro del ducto		
Diámetro interno	127	mm
Velocidad dentro del ducto	1,6577612	m/s

Cálculo Reynolds Y perdidas por accesorios		
Reynolds	Re	13478,60
Componentes	k	k
k_campana	10	
k_codos90°	1,2	4x 0,3
K_Zeolitas	10	
K_Filtro_aire	8	
K_valvula	0,2	
K_Conexión_T	1	
K_Contracción repentina	0,70	
K_expansión repentina	0,45	
Kl_total	31,55	

Expansión repentina: $K_L = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$ Contracción repentina: ver gráfica.



$d^2/D^2=0,16$

Requerimiento Hidrostático requerido (resultado perdidas por fricción y accesorios)		
H_requerida	4,57959225	m_aire
H_req_agua	0,0054331	m_agua
	0,21390171	in_H2O

Q(m3/h)	Q(L/min)	Q(m3/s)	Q(cfm)	V(m/s)	Hreq(m_aire)	Hreq(inH2O)	W(W)
0	0,00	0,000	0	0,00	0,00	0,00	0,00
6	100	0,002	3,53	0,13	0,03	0,00	0,00
12,6	210,00	0,004	7,42	0,28	0,13	0,006	0,01
18	300	0,005	10,59	0,39	0,26	0,012	0,02
24	400,00	0,007	14,13	0,53	0,46	0,022	0,04
33,98016	566,34	0,009	20	0,75	0,93	0,04	0,10
67,96032	1132,67	0,019	40	1,49	3,70	0,17	0,81
75,605856	1260,10	0,021	44,5	1,66	4,58	0,21	1,12
84,9504	1415,84	0,024	50	1,86	5,78	0,27	1,58
101,94048	1699,01	0,028	60	2,24	8,33	0,39	2,74
118,93056	1982,18	0,033	70	2,61	11,33	0,53	4,35