

**DISEÑO MECÁNICO Y TÉRMICO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN DE  
VAPOR DE BAJA POTENCIA**

**Cristian David Aguirre Álvarez**

**Sebastián Diaz Ortiz**

**Yordi Andrés Pineda Hernández**

**Trabajo de Grado en modalidad investigación, presentado como requisito parcial para**

**optar al título de:**

**Ingeniero Mecánico**

**Asesor (a):**

**Ing. Álvaro Delgado Mejía**

**Línea de Investigación:**

**S-GIEN**

**Grupo de Investigación:**

**Grupo de investigación e innovación en energía (GIEN)**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

**MEDELLÍN - COLOMBIA**

**2025**

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al profesor Álvaro Delgado Mejía, asesor de este trabajo de grado, por su orientación, compromiso y valiosos aportes durante cada etapa del proceso. A la Institución Universitaria Pascual Bravo, por brindarnos la formación, los espacios y los recursos necesarios para nuestro desarrollo académico y profesional. Y a nuestros compañeros de estudio, por su apoyo constante tanto en lo académico como en lo personal.

Agradecemos profundamente a nuestras familias, quienes nos acompañaron con amor, paciencia y consejos en los momentos más importantes de esta etapa. También extendemos nuestra gratitud a los profesores que nos guiaron con sus enseñanzas, observaciones y sugerencias, las cuales fueron fundamentales para la construcción de este proyecto.

Finalmente, reconocemos incluso a quienes alguna vez dudaron de nuestras capacidades. Sus cuestionamientos nos motivaron a confiar más en nosotros mismos y a esforzarnos por demostrar que los sueños que un día parecían lejanos, hoy comienzan a hacerse realidad gracias al trabajo, la dedicación y la perseverancia.

## DEDICATORIAS

Este trabajo de grado está dedicado, en primer lugar, a nuestras familias, quienes han sido el pilar fundamental a lo largo de todo nuestro proceso formativo. A ustedes, que con amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional nos han motivado a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Gracias por creer en nosotros, por acompañarnos en cada paso del camino y por brindarnos la fuerza necesaria para alcanzar esta meta.

También queremos dedicar este esfuerzo académico a las comunidades rurales de Colombia. Ellas, con su sabiduría ancestral, resiliencia y conexión profunda con el territorio, han sido fuente de inspiración constante para el desarrollo de este proyecto. Es nuestro deseo que esta propuesta represente una contribución significativa hacia la mejora de su calidad de vida, mediante el acceso a soluciones energéticas sostenibles, justas y adaptadas a sus realidades.

Este trabajo no solo representa el cierre de una etapa académica, sino también el inicio de un compromiso con la transformación social, la equidad energética y el bienestar de las poblaciones históricamente marginadas. A todas las personas que creen en un país más justo, inclusivo y sustentable, también les dedicamos este logro.

## 1 Tabla de contenido

1	Tabla de contenido.....	4
2	ABSTRACT .....	7
3	INTRODUCCIÓN.....	9
4	PROBLEMÁTICA.....	11
4.1	Contexto Rural en Colombia .....	11
4.2	Complejidad de Instalación y Mantenimiento:.....	12
4.3	Necesidad de Soluciones Innovadoras.....	13
5	ESTADO DEL ARTE .....	16
5.1	Evolución de las Máquinas de Vapor .....	16
5.2	Los Primeros Diseños: .....	16
5.3	La Revolución Industrial y James Watt: .....	16
5.4	La Era del Vapor en el Siglo XIX y XX: .....	17
5.5	Declive y Resurgimiento:.....	17
5.6	Tecnologías Actuales en Generación de Vapor:.....	17
5.7	Calderas de Vapor Compactas: .....	18
5.8	Sistemas de Recuperación de Calor: .....	18
5.9	Generación de Vapor Solar: .....	18
5.10	Sistemas de Baja Potencia para Áreas Rurales:.....	19
5.11	Investigaciones Recientes:.....	19
5.12	Optimización de la Transferencia de Calor: .....	19
5.13	Uso de Materiales Avanzados:.....	19
5.14	Integración con Energías Renovables: .....	20
5.15	Aplicaciones en Contextos Rurales:.....	20

<b>6</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>21</b>
6.1	Objetivo General: .....	21
6.1.1	Objetivos Específicos: .....	21
<b>7</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
7.1	Cálculos de Recipiente a Presión según ASME Sección VIII.....	22
	Figura 1. Diagrama de cuerpo libre recipiente a presión (fuente propia).....	24
	Figura 2. Diagrama de cuerpo libre con reacciones (fuente propia) .....	24
7.2	Base central del cilindro .....	25
7.3	Base lateral de cilindro .....	26
	Figura 4. Base lateral de cilindro (fuente propia).....	26
	Figura 5. Esfuerzos y reacciones en la placa del cilindro (fuente propia).....	27
	Figura 6. Esfuerzos en placa admisión-escape (fuente propia) .....	27
7.4	Diagramas de cuerpo libre .....	28
	Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del pistón (fuente propia).....	28
	Figura 8. Diagrama de cuerpo libre de la biela (fuente propia).....	29
	figura 10. Cálculos de biela (fuente propia) .....	30
	Figura 11. Esfuerzos en biela (fuente propia) .....	31
7.5	PASADOR DEL PISTÓN.....	31
	Figura 12. Análisis estático en la biela (fuente propia) .....	32
7.6	Volante (Polea de simple efecto) .....	32
	Figura 13. Diagrama de polea de simple efecto (fuente propia).....	32
	Figura 14. Diagrama de torsión en la volante (fuente propia) .....	33
	Figura 15. Tabla de acabados superficial .....	34
	Figura 16. Tabla de confiabilidad.....	35
	Figura 17. Factor de fatiga.....	35
	figura 18. Diagrama de fatiga corregida .....	36
	Figura 19. Ecuación logarítmica .....	37
	Figura 20. Tabla condiciones de trabajo.....	37
7.7	CÁLCULO DE EJES .....	38

Figura 21. Diagrama de enumeración de pasos en la construcción.....	40
Figura 22. Diagrama de diámetros de ejes.....	40
Figura 23. Diagrama de resistencia a la tracción.....	42
Figura 24. Tabla de selección de rodamientos fuente SKF- <a href="https://www.skf.com/co">https://www.skf.com/co</a> .....	45
<b>8 CÁLCULOS TÉRMICOS.....</b>	<b>46</b>
<b>8.1 Combustible.....</b>	<b>46</b>
Figura 25. Representación del poder calorífico del metano fuente <a href="https://chatgpt.com/">https://chatgpt.com/</a> .....	47
Figura 26. Presiones atmosféricas en algunas ciudades en Colombia- <a href="https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/">https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/</a> .....	48
Figura 27. Tabla propiedades del agua saturada fuente - <a href="https://personales.unican.es/reneDOC/Trasp%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GRADOS/Tablas%20Termo.pdf">https://personales.unican.es/reneDOC/Trasp%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GRADOS/Tablas%20Termo.pdf</a> .....	48
Figura 28. Esquema de energía total interna requerida fuente propia.....	49
Figura 28. Esquema caldera fuente propia.....	50
<b>9 Cálculo quemador para recipiente a presión operado a 150psi.....</b>	<b>53</b>
<b>9.1 Ecuación de Combustión Ideal.....</b>	<b>53</b>
<b>9.2 Cálculo del inyector.....</b>	<b>58</b>
<b>9.3 Cálculo del mezclador (Venturi).....</b>	<b>60</b>
<b>9.4 Cálculo del cabezal.....</b>	<b>61</b>
<b>10 Costos.....</b>	<b>63</b>
<b>10.1.1 Tabla de costos de materiales.....</b>	<b>63</b>
<b>10.1.2 Tabla 2. Mano de obra.....</b>	<b>64</b>
<b>11 . Conclusiones.....</b>	<b>65</b>
<b>12 BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>68</b>

## 2 ABSTRACT

This project focuses on the mechanical and thermal design of a low-power steam generation unit, aimed at providing sustainable energy solutions for rural and industrial areas with limited resources. The design operates at 105°C and 150 psi, combining compactness, thermal efficiency, and ease of maintenance. The system is specifically tailored to meet the needs of small communities and industrial applications where space and resources are constrained, such as in the rural areas of Colombia, particularly in the municipality of Murindó, Antioquia.

The proposed design integrates fundamental concepts of heat transfer, material selection, and mechanical strength, while addressing economic and environmental considerations. It adheres to international standards, such as ASME Section VIII for pressure vessels, ensuring safety and reliability. The system aims to minimize thermal losses and reduce emissions, promoting more efficient use of natural resources. The project also includes a detailed analysis of the design and manufacturing of the prototype, based on simulations and tests conducted using advanced tools like Autodesk Inventor and Smath Solver. These steps are crucial to validate the system's feasibility and ensure it meets functional and safety requirements.

From a social perspective, the project seeks to promote energy decentralization and improve access to sustainable technologies for vulnerable communities. The municipality of Murindó, with its abundant water resources and need for autonomous energy solutions, serves as a relevant case study for the implementation of this system. The design is expected to provide a reliable and efficient energy source, enhancing the quality of life for residents and supporting local economic activities.

The development of this project not only addresses technological challenges but also reflects a commitment to sustainability and equitable access to energy resources. By optimizing the design, this work contributes to advancements in thermal and mechanical engineering, offering practical and scalable solutions for communities with economic and geographic limitations. The results of this

project demonstrate the potential of compact steam generation systems to provide sustainable energy in resource-constrained environments, paving the way for future innovations in the field.

### 3 INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, caracterizado por una creciente demanda de soluciones energéticas sostenibles, el diseño de sistemas compactos y eficientes de generación de energía se convierte en una prioridad para atender necesidades en áreas rurales e industriales con limitaciones de espacio y recursos. Estas regiones, como muchas zonas rurales de Colombia, enfrentan desafíos significativos en el acceso a tecnologías avanzadas debido a factores como la complejidad de instalación, el alto costo de implementación y las condiciones ambientales adversas. La dependencia de fuentes de energía tradicionales y menos eficientes impacta negativamente la sostenibilidad ambiental, la productividad económica y la calidad de vida de las comunidades afectadas.

Históricamente, las máquinas de vapor, como las desarrolladas durante la Revolución Industrial, marcaron un punto de inflexión en la transformación energética. El motor de vapor tipo James Watt, conocido por su capacidad para convertir energía térmica en movimiento mecánico, sentó las bases para avances posteriores en ingeniería térmica. Sin embargo, su escala y complejidad lo hicieron inapropiado para aplicaciones modernas en espacios reducidos. Este trabajo busca superar esas limitaciones mediante el diseño de una unidad de generación de vapor de baja potencia que funcione en condiciones operativas específicas de 105°C y 150 psi. Este enfoque combina aspectos de compacidad, eficiencia térmica y facilidad de mantenimiento, adaptándose a las necesidades específicas de pequeñas comunidades y aplicaciones industriales.

El diseño propuesto integra conceptos fundamentales de termodinámica y transferencia de calor, selección de materiales y resistencia de materiales, abordando simultáneamente consideraciones económicas y ambientales. Desde un enfoque académico, el proyecto aprovecha normativas internacionales como la Sección VIII del código ASME para recipientes a presión, lo que garantiza estándares de seguridad y fiabilidad. En términos ambientales, la implementación de este sistema busca minimizar las pérdidas térmicas y reducir las emisiones, promoviendo así un uso más eficiente de los recursos naturales.

Además, el proyecto incluye un análisis detallado del diseño y fabricación del prototipo, basado en simulaciones y pruebas realizadas con herramientas avanzadas como Autodesk Inventor y Smath Solver. Estos pasos son esenciales para validar la viabilidad del sistema y garantizar que cumpla con los requisitos funcionales y de seguridad. A nivel social, el diseño de una solución accesible y adaptable busca promover la descentralización energética, facilitando el acceso a tecnologías sostenibles para comunidades vulnerables en áreas rurales, como Murindó en Antioquia. En esta región, la abundancia de recursos hídricos y la necesidad de soluciones autónomas hacen de este proyecto una propuesta altamente relevante.

El desarrollo de este trabajo no solo responde a desafíos tecnológicos, sino también a un compromiso con la sostenibilidad y la equidad en el acceso a recursos energéticos. A través de un diseño optimizado, se espera contribuir al avance en la ingeniería térmica y mecánica, al tiempo que se ofrecen soluciones prácticas y escalables para comunidades con limitaciones económicas y geográficas.

## 4 PROBLEMÁTICA

### 4.1 Contexto Rural en Colombia

En Colombia, especialmente en zonas rurales como el municipio de Murindó en Antioquia, el acceso a energía eléctrica y tecnologías avanzadas es limitado. Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), muchas comunidades rurales carecen de infraestructura energética adecuada, lo que afecta su calidad de vida y desarrollo económico. En estas regiones, la dependencia de fuentes de energía tradicionales, como la leña y el diésel, es común, pero estas opciones son insostenibles a largo plazo debido a su impacto ambiental y económico.

- **Condiciones Geográficas y Climáticas:** Murindó, ubicado en la margen derecha del río Atrato, es una región con abundantes recursos hídricos, lo que la hace ideal para proyectos de generación de energía basados en vapor. Sin embargo, su ubicación geográfica también presenta desafíos, como el difícil acceso a tecnologías avanzadas y la falta de infraestructura para la distribución de energía. Además, las condiciones climáticas, como la alta humedad y las lluvias frecuentes, pueden afectar el funcionamiento de los sistemas convencionales.
- **Impacto Social y Económico:** La falta de acceso a energía eléctrica confiable tiene un impacto directo en la calidad de vida de los habitantes de Murindó. Las actividades económicas, como la agricultura y la pesca, se ven limitadas por la falta de maquinaria y sistemas de refrigeración. Además, la ausencia de energía eléctrica en hogares y escuelas dificulta el acceso a educación y servicios básicos, perpetuando el ciclo de pobreza en la región.

- **Necesidad de Soluciones Energéticas:** Dada la abundancia de recursos hídricos en Murindó, existe un potencial significativo para implementar sistemas de generación de energía basados en vapor. Sin embargo, estos sistemas deben ser compactos, eficientes y fáciles de mantener, ya que las comunidades rurales carecen de los recursos técnicos y financieros para operar sistemas complejos.
- **Limitaciones de los Sistemas Convencionales:** Los sistemas convencionales de generación de energía, como las centrales eléctricas a gran escala y los generadores diésel, no son viables en áreas rurales como Murindó debido a varias limitaciones, como su ubicación geográfica y la ausencia de proyectos de inversión en esta materia, por parte del gobierno Departamental y Nacional.
- **Alto Costo de Implementación:** Los sistemas convencionales requieren una inversión inicial significativa en infraestructura, como líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. En áreas rurales con baja densidad poblacional, estos costos son prohibitivos, lo que hace que la electrificación convencional no sea rentable.

## 4.2 Complejidad de Instalación y Mantenimiento:

Los sistemas convencionales suelen ser complejos y requieren personal especializado para su instalación, operación y mantenimiento. En áreas rurales, donde el acceso a técnicos capacitados es limitado, esto representa un desafío significativo. Además, la falta de repuestos, equipos y herramientas en estas regiones puede dificultar el mantenimiento continuo de los sistemas.

- **Impacto Ambiental:** Los generadores diésel, comúnmente utilizados en áreas rurales, emiten gases contaminantes (CO, HC, NOx y partículas) y tienen un alto consumo de combustible, además del ruido generado durante su operación, lo que los hace insostenibles desde el punto de vista ambiental. Además, la dependencia de combustibles fósiles contribuye al cambio climático y a la degradación de los ecosistemas locales.
- **Ineficiencia en el Uso de Recursos:** Los sistemas convencionales no están diseñados para aprovechar los recursos locales, como el agua y la biomasa. En Murindó, por ejemplo, la abundancia de recursos hídricos no se utiliza de manera eficiente para la generación de energía, lo que representa una oportunidad perdida para implementar soluciones sostenibles.

### 4.3 Necesidad de Soluciones Innovadoras

Dadas las limitaciones de los sistemas convencionales, existe una necesidad urgente de desarrollar soluciones innovadoras que sean adecuadas para las condiciones específicas de las áreas rurales. Estas soluciones deben ser compactas, eficientes y adaptables a las necesidades locales.

- **Sistemas Compactos y de Baja Potencia:** Los sistemas de generación de vapor de baja potencia, acoplados a un sistema motriz, como el propuesto en este proyecto, ofrecen una alternativa viable para áreas rurales. Estos sistemas son más pequeños, más fáciles de instalar y requieren menos mantenimiento que los sistemas convencionales. Además, pueden ser alimentados por recursos locales, como biomasa o energía solar, lo que reduce su dependencia de combustibles fósiles.

- **Eficiencia Térmica y Sostenibilidad:** Una de las principales ventajas de los sistemas de generación de vapor es su alta eficiencia térmica. Al optimizar la transferencia de calor y reducir las pérdidas energéticas, estos sistemas pueden generar energía de manera más sostenible y con un menor impacto ambiental. Además, el uso de materiales avanzados, como el acero inoxidable, mejora la durabilidad y la resistencia a la corrosión, lo que es especialmente importante en entornos húmedos como Murindó.
- **Adaptabilidad a Condiciones Locales:** Las soluciones innovadoras deben ser diseñadas teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada región. En el caso de Murindó, el sistema propuesto está diseñado para operar a 105°C y 150 psi, lo que lo hace adecuado para las condiciones climáticas y los recursos disponibles en la región. Además, el sistema es fácil de mantener y puede ser operado por personal local con un entrenamiento mínimo.
- **Impacto Social y Económico:** La implementación de sistemas de generación de vapor en áreas rurales no solo mejora el acceso a energía eléctrica, sino que también tiene un impacto positivo en la economía local. Al proporcionar una fuente de energía confiable, estos sistemas pueden impulsar actividades económicas, como la agricultura y la pesca, y mejorar la calidad de vida de los habitantes. Además, la creación de empleos locales para la operación y mantenimiento del sistema contribuye al desarrollo económico de la región.
- **Conclusión de la Problemática:** En resumen, el contexto rural de Colombia, particularmente en regiones como Murindó, presenta desafíos significativos en términos de acceso a energía eléctrica y desarrollo económico. Los sistemas convencionales de generación de energía no son viables debido a su alto costo, su complejidad y su impacto ambiental cuando están basados en combustibles fósiles. Por lo tanto, existe una necesidad

urgente de desarrollar soluciones innovadoras, como sistemas de generación de vapor de baja potencia, que sean compactos, eficientes y adaptables a las condiciones locales. Estas soluciones no solo mejorarán el acceso a energía eléctrica, sino que también promoverán el desarrollo sostenible y la equidad en el acceso a recursos energéticos.

## 5 ESTADO DEL ARTE

### 5.1 Evolución de las Máquinas de Vapor

Las máquinas de vapor han sido un pilar fundamental en el desarrollo industrial desde el siglo XVIII. Su evolución ha marcado hitos importantes en la historia de la ingeniería y la tecnología, y su impacto se extiende hasta la actualidad.

### 5.2 Los Primeros Diseños:

El concepto de utilizar vapor para generar movimiento mecánico se remonta a la antigüedad, con dispositivos como “*La Eolípila*” de Herón de Alejandría en el siglo I d.C. Sin embargo, no fue hasta el siglo XVIII que se desarrollaron las primeras máquinas de vapor prácticas. Thomas Newcomen, en 1712, creó la primera máquina de vapor funcional, utilizada principalmente para bombear agua de las minas. Aunque era ineficiente, sentó las bases para futuros avances.

### 5.3 La Revolución Industrial y James Watt:

La verdadera revolución llegó con James Watt, quien en 1769 mejoró significativamente el diseño de Thomas Newcomen al añadir un condensador separado, lo que aumentó la eficiencia térmica de la máquina. Las mejoras de Watt permitieron la expansión de la Revolución Industrial, impulsando la mecanización de la industria textil, la minería y el transporte. Las máquinas de vapor se convirtieron en el motor de la industrialización, permitiendo el desarrollo de fábricas, ferrocarriles y barcos a vapor.

#### 5.4 La Era del Vapor en el Siglo XIX y XX:

Durante el siglo XIX, las máquinas de vapor evolucionaron hacia diseños más compactos y eficientes. Se introdujeron innovaciones como la locomotora de vapor de George Stephenson y los barcos de vapor transatlánticos. Sin embargo, a principios del siglo XX, la llegada de los motores de combustión interna y la electricidad comenzaron a desplazar a las máquinas de vapor en muchas aplicaciones. A pesar de esto, las máquinas de vapor siguieron siendo relevantes en sectores como la generación de energía eléctrica y la industria pesada.

#### 5.5 Declive y Resurgimiento:

A mediados del siglo XX, las máquinas de vapor tradicionales fueron reemplazadas en gran medida por turbinas de vapor y motores diésel. Sin embargo, en las últimas décadas, ha habido un resurgimiento del interés en los sistemas de generación de vapor, especialmente en aplicaciones que requieren alta eficiencia térmica y bajas emisiones. Este resurgimiento se debe en parte a la necesidad de soluciones energéticas sostenibles y al desarrollo de tecnologías avanzadas que mejoran la eficiencia y reducen el tamaño de los sistemas.

#### 5.6 Tecnologías Actuales en Generación de Vapor:

En la actualidad, los sistemas de generación de vapor han evolucionado significativamente, incorporando tecnologías avanzadas que mejoran su eficiencia, seguridad y adaptabilidad. Estas tecnologías son especialmente relevantes en aplicaciones industriales y en áreas rurales con limitaciones de recursos.

## 5.7 Calderas de Vapor Compactas:

Las calderas modernas son mucho más compactas y eficientes que sus predecesoras. Utilizan materiales avanzados, como acero inoxidable y aleaciones resistentes a la corrosión, que permiten operar a altas temperaturas y presiones con un menor riesgo de fallos. Además, las calderas compactas están equipadas con sistemas de control automatizados que optimizan la combustión y la transferencia de calor, reduciendo las pérdidas energéticas, las emisiones y minimizando la posibilidad de accidentes.

## 5.8 Sistemas de Recuperación de Calor:

Una de las innovaciones más importantes en la generación de vapor es la recuperación de calor residual. Estos sistemas capturan el calor generado en procesos industriales o de generación de energía y lo utilizan para producir vapor, lo que reduce el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta tecnología es especialmente útil en industrias como la petroquímica, la siderúrgica y la generación de energía eléctrica.

## 5.9 Generación de Vapor Solar:

La generación de vapor utilizando energía solar es una tecnología emergente con un gran potencial en áreas rurales y remotas. Los colectores solares concentran la radiación solar para calentar agua y producir vapor, que puede utilizarse para generar electricidad o en procesos industriales. Aunque aún enfrenta desafíos en términos de costos y eficiencia, esta tecnología es prometedora para aplicaciones en regiones con alta radiación solar.

### 5.10 Sistemas de Baja Potencia para Áreas Rurales:

En áreas rurales, los sistemas de generación de vapor de baja potencia están ganando popularidad debido a su adaptabilidad y bajo costo. Estos sistemas están diseñados para operar en condiciones adversas y pueden ser alimentados por recursos locales, como biomasa o energía solar. Además, su diseño compacto y modular facilita su instalación y mantenimiento en comunidades con recursos limitados.

### 5.11 Investigaciones Recientes:

En los últimos años, se han realizado numerosas investigaciones para mejorar la eficiencia, la seguridad y la viabilidad de los sistemas de generación de vapor. Estas investigaciones abordan desafíos técnicos, económicos y ambientales, y proponen soluciones innovadoras para aplicaciones en contextos rurales e industriales.

### 5.12 Optimización de la Transferencia de Calor:

Uno de los principales focos de investigación es la optimización de la transferencia de calor en sistemas de generación de vapor. Estudios recientes han explorado el uso de superficies nanoestructuradas y recubrimientos térmicos para mejorar la eficiencia térmica y reducir las pérdidas de calor. Estas innovaciones son especialmente relevantes en sistemas compactos, donde el espacio y los recursos son limitados, aunque puede que por el momento sea una solución costosa.

### 5.13 Uso de Materiales Avanzados:

El desarrollo de materiales avanzados, como aleaciones de alta resistencia y composites, ha permitido mejorar la durabilidad y la seguridad de los sistemas de generación

de vapor. Investigaciones como las de Wang et al. (2024) han demostrado que el uso de aceros inoxidables y aleaciones de aluminio puede reducir significativamente la corrosión y el desgaste en condiciones de alta temperatura y presión.

### 5.14 Integración con Energías Renovables:

La integración de sistemas de generación de vapor con fuentes de energía renovable, como la solar y la biomasa, es un área de investigación activa. Estudios como los de Singh y Yadav (2024) han demostrado que esta integración puede reducir la dependencia de combustibles fósiles y mejorar la sostenibilidad de los sistemas. Además, la combinación de tecnologías permite maximizar el uso de recursos locales, lo que es especialmente importante en áreas rurales.

### 5.15 Aplicaciones en Contextos Rurales:

Las investigaciones recientes también han explorado el potencial de los sistemas de generación de vapor en contextos rurales. Por ejemplo, en el municipio de Murindó, Antioquia, se han realizado estudios para evaluar la viabilidad de sistemas compactos que utilicen recursos hídricos locales para generar energía eléctrica. Estos estudios destacan la importancia de diseñar sistemas adaptables y fáciles de mantener, que puedan ser operados por comunidades con recursos técnicos y financieros limitados.

## 6 OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo General:

Diseñar una unidad de generación de vapor en base a criterios de diseño mecánico y térmico.

#### 6.1.1 Objetivos Específicos:

1. Realizar un análisis térmico y mecánico del sistema de generación de vapor.
2. Diseñar un prototipo compacto utilizando herramientas CAD.
3. Efectuar un análisis de conveniencia técnico y económica.

## 7 METODOLOGÍA

### 7.1 Cálculos de Recipiente a Presión según ASME Sección VIII

Para la realización del recipiente a presión que mantendrá el agua a la temperatura deseada, siendo esta de 105°C, se estiman los cálculos de esfuerzos axiales y tangenciales según lo establece la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) en la sección VIII. La cual se dedica a especificar los detalles de diseño, fabricación, inspección y certificación de recipientes a presión que superan presiones de 15 psi.

Los valores conocidos para el requerimiento desde la transferencia de calor y fabricación apropiados según la división 1 del código ASME mencionado son:

**Presión de vapor**  $P = 150 \text{ psi}$

**Diámetro interior**  $d_{in} = 5,81 \text{ in}$

**Diámetro exterior**  $d_{ex} = 6 \text{ in}$

**Espesor de pared**  $e = 6 \text{ in}$

Para la determinación del esfuerzo primero se debe de considerar si el cilindro es de paredes delgadas. Esto se hace según la siguiente fórmula:

Se considera que un cilindro es de pared delgada cuando la razón de radio-espesor es 10 o mas:

$$\frac{d_{in}}{2e} = 30,9043 \quad \frac{r}{t} \geq 10$$

cumple con el criterio  $\geq 10$ . Desde los requerimientos del código mencionado.

Una vez determinados este valor. Los esfuerzos axiales y tangenciales del cilindro, se pueden obtener mediante las ecuaciones:

$$\sigma_{tangencial} := \frac{P \cdot \frac{din}{2}}{e} = 4635,6383 \text{ psi} \quad \sigma_{axial} := \frac{P \cdot \frac{din}{2}}{2 \cdot e} = 2317,8191 \text{ psi}$$

La representación de estas ecuaciones está dada en la figura 1, que especifica los datos y cómo se toman las cargas para los esfuerzos mencionados matemáticamente.

$$\begin{aligned} \sigma_1 := \sigma_t &= 31,9616 \text{ MPa} & 120 \cdot 10^6 \text{ Pa} &< \frac{P \cdot \frac{din}{2}}{e} \\ \sigma_2 := \sigma_a &= 15,9808 \text{ MPa} & P_{interna} &:= \frac{120 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot e}{\frac{din}{2}} \\ \sigma_t &< 120 \cdot 10^6 \text{ Pa} & P_{interna} &= 3,883 \text{ MPa} \end{aligned}$$

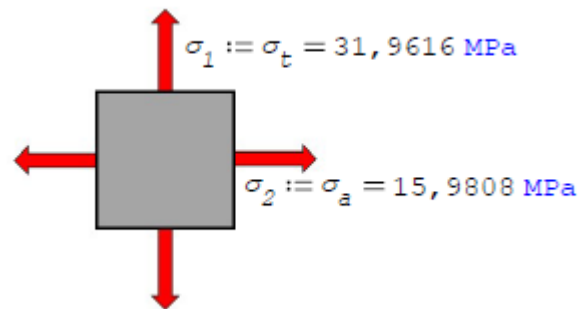
El recipiente no debe de superar 30 Mpa, ya que se fracturará debido a una sobrecarga de esfuerzo en el eje tangencial, y tendría una fractura paralela al eje axial de la aplicación de la carga.

Por análisis del círculo de Mohr, se deduce el esfuerzo de corte máximo. Esto se da debido a que ambos esfuerzos aplicados (Tangencial y Axial) son esfuerzos de tensión, el valor de esfuerzo máximo no se encuentra en el mismo plano, por ende:

$$\tau_{abs \text{ - max}} := \frac{\sigma_1}{2} \quad \tau_{abs} := \frac{\sigma_1}{2} = 15,9808 \text{ MPa}$$

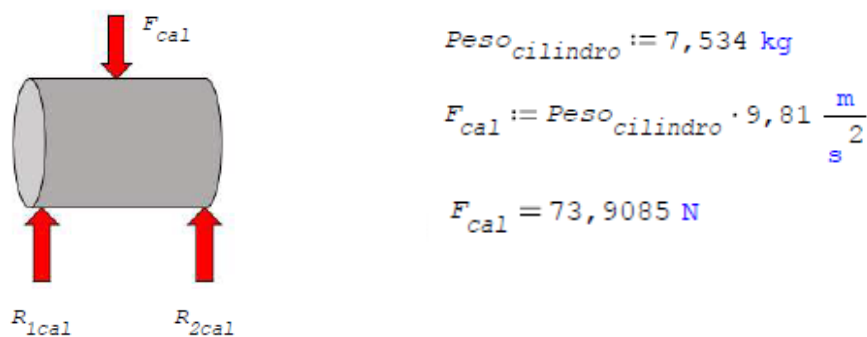
Es importante considerar que el peso del recipiente a presión también tendrá una afectación a la estructura, por lo que se realizará un estudio estático y de resistencia de materiales para estimar el comportamiento de estos.

Antes realizar el estudio estático se construirá el cubo que dé marcha los esfuerzos principales, esto se realiza a partir de los lineamientos del código de construcción anteriormente mencionado.



**Figura 1. Diagrama de cuerpo libre recipiente a presión (fuente propia)**

Para analizar el comportamiento estático del recipiente a presión se realiza el diagrama de cuerpo libre para ubicar más fácil las cargas, reacciones y contestar la sumatoria de cargas correspondiente. Será la multiplicación del peso del cilindro por la aceleración gravitacional terrestre la Carga  $F_{cal}$  y el peso del cilindro realizado.



**Figura 2. Diagrama de cuerpo libre con reacciones (fuente propia)**

$$\begin{aligned} \uparrow \Sigma F_y &:= 0 \\ R_{1cal} + R_{2cal} - F_{cal} &:= 0 \\ R_{1cal} &:= F_{cal} - R_{2cal} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \curvearrowright \Sigma M_{Caldera} &:= 0 \\ F_{cal} (200 \text{ mm}) - R_{2cal} \cdot (400 \text{ mm}) &:= 0 \\ R_{2cal} &:= \frac{F_{cal} \cdot (200 \text{ mm})}{400 \text{ mm}} \end{aligned}$$

Reemplazamos Para Hallar

$$\begin{aligned} R_{1cal} &:= F_{cal} - R_{2cal} \\ R_{1cal} &= 36,9543 \text{ N} \end{aligned}$$

$$R_{2cal} = 36,9543 \text{ N}$$

Recordemos

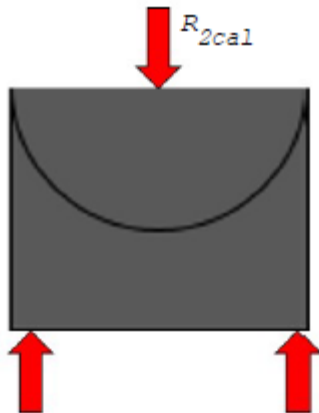
$$\begin{aligned} A_{caldera} &:= 2 \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2) + 2 \cdot \pi \cdot h \cdot (R + r) \\ D_{mayor} &:= 152,4 \text{ mm} \quad d_{menor} := 147,64 \text{ mm} \\ R &:= \frac{D_{mayor}}{2} = 0,0762 \text{ m} \quad r := \frac{d_{menor}}{2} = 0,0738 \text{ m} \end{aligned}$$

$$h := 400 \text{ mm} \longrightarrow h = 0,4 \text{ m}$$

$$A_{caldera} := 2 \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2) + 2 \cdot \pi \cdot h \cdot (R + r)$$

$$A_{caldera} = 0,3793 \text{ m}^2$$

## 7.2 Base central del cilindro



$$\begin{aligned} \uparrow \Sigma F_y &:= 0 \\ -R_{2cal} + R_{1BFC} + R_{2BFC} &:= 0 \\ R_{1BFC} &:= R_{2cal} - R_{2BFC} \end{aligned}$$

Figura 3. Diagrama base central cilindro (fuente propia)

$$\sum M_{BASEFRONCIL} := 0$$

$$-R_{2ca1} (82,5 \text{ mm}) + R_{2BFC} \cdot (165,1 \text{ mm}) := 0$$

$$R_{2BFC} := \frac{R_{2ca1} \cdot (82,5 \text{ mm})}{165,1 \text{ mm}}$$

$$R_{2BFC} = 18,4659 \text{ N}$$

Reemplazamos Para Hallar

$$R_{1BFC} := R_{2ca1} - R_{2BFC}$$

$$R_{1BFC} = 18,4883 \text{ N}$$

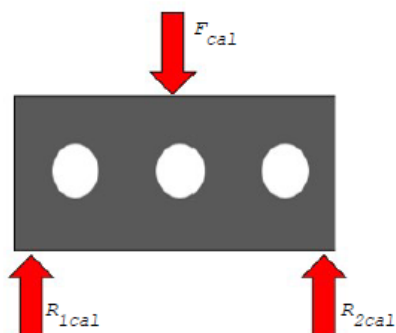
Reemplazamos Para Hallar

$$R_{1BFC} := R_{2ca1} - R_{2BFC}$$

$$R_{1BFC} = 18,4883 \text{ N}$$

### 7.3 Base lateral de cilindro

Se trabajará con las reacciones obtenidas en análisis estático del cilindro, considerando a  $F_{ca1}$  como nuestra carga de referencia, el valor de esfuerzo cambiará debido a la geometría de la pieza.



$$A_{baselatcil} := b \cdot h$$

$$b := 381 \text{ mm} \quad h := 152,4 \text{ mm}$$

$$A_{baselatcil} := b \cdot h$$

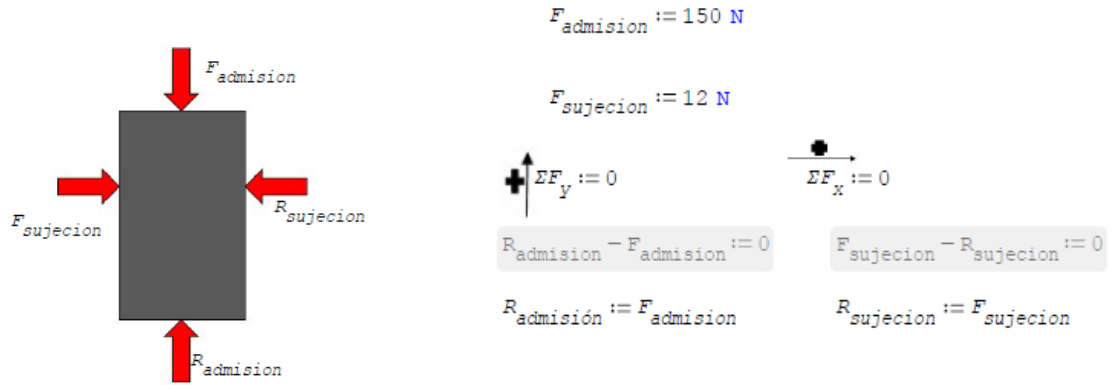
$$A_{baselatcil} = 0,0581 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{baselatcil} := \frac{F_{ca1}}{A_{baselatcil}}$$

$$\sigma_{baselatcil} = 1272,8718 \text{ Pa}$$

Figura 4. Base lateral de cilindro (fuente propia)

La fuerza de admisión se trabajará con la carga del recipiente a presión siendo de 150 N. La fuerza de sujeción se tomará como 12N, se analizarán las reacciones y se hallarán los esfuerzos a los que está sometido dicha placa.



**Figura 5. Esfuerzos y reacciones en la placa del cilindro (fuente propia)**

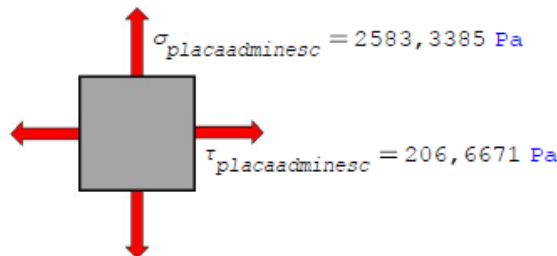
Recordemos

$$A_{\text{placaadminesc}} := b \cdot h$$

$$b := 50 \text{ mm} \quad h := 90 \text{ mm} \quad A_{\text{placaadminesc}} = 0,0581 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{\text{placaadminesc}} := \frac{F_{\text{admision}}}{A_{\text{placaadminesc}}} \longrightarrow \sigma_{\text{placaadminesc}} = 2583,3385 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{placaadminesc}} := \frac{F_{\text{sujecion}}}{A_{\text{placaadminesc}}} \longrightarrow \tau_{\text{placaadminesc}} = 206,6671 \text{ Pa}$$



**Figura 6. Esfuerzos en placa admisión-escape (fuente propia)**

Para este caso se consideran los esfuerzos calculados como los esfuerzos principales y serán complementados posteriormente con su simulación por elementos finitos en el software Inventor.

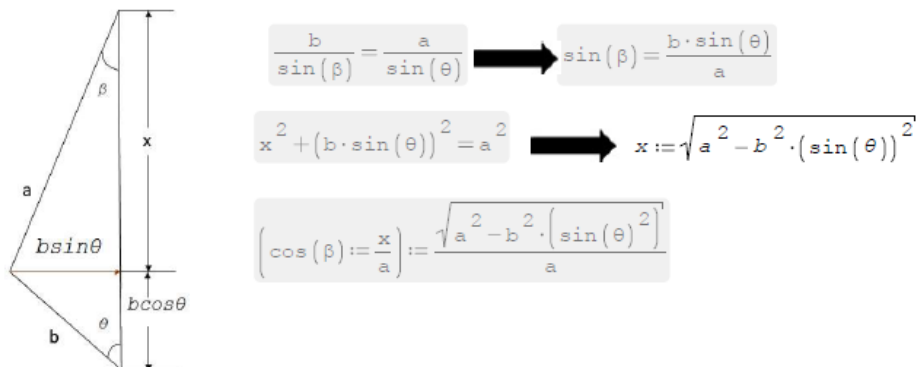
Para la sujeción de estos elementos a la placa que posteriormente será analizada se usará los lineamientos dados en la sección 7 del código de soldadura estructural dado por la sociedad americana de soldadura (AWS D1.1). esta sección considera la estimación de tamaños de filete y altura de garganta efectiva para los cordones realizados, por análisis dentro del mismo código, se trabajarán los elementos como una junta en filete tipo T en el cual se garantizará un cordón de soldadura con un tamaño de 3mm.

Se trabajará dichos lineamientos según la tabla 7.7 del código mencionado y se usará un material de aporte que garantice una resistencia última a la tracción de 70 Ksi, por denominaciones diferentes códigos estos elementos serán marcados los planes de fabricación taller y tendrán la nota soldado con electrodo E70XX según lo especifica este código de soldadura. Así mismo estos elementos serán soldados a conformidad según los criterios de aceptación dados en la sección 8 del mismo código.

**El desarrollo del proyecto sigue un enfoque estructurado etapas:**

## 7.4 Diagramas de cuerpo libre

### Pistón



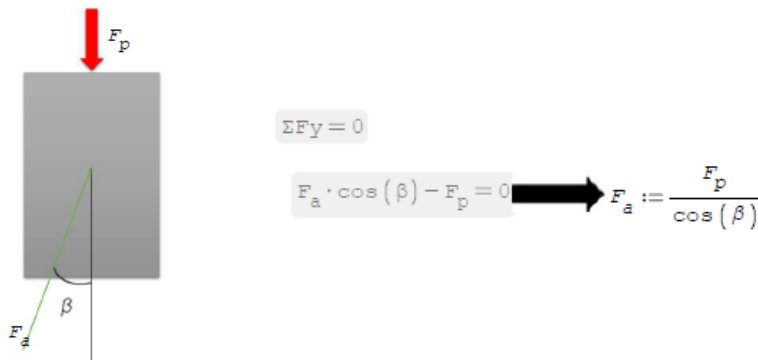
**Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del pistón (fuente propia)**

Para este caso a sería la longitud de la biela, b sería la longitud del cigüeñal (que en este caso sería una biela de simple efecto).

Se busca obtener el torque o par torsional T

$$T := -F \cdot b \cdot \sin(\theta) - \frac{F \cdot b^2 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta)}{\sqrt{a^2 - b^2 \cdot \sin^2(\theta)}}$$

### Diagrama de cuerpo libre



**Figura 8. Diagrama de cuerpo libre de la biela (fuente propia)**

Se reconoce que el Valor de F para este elemento es de F= 50 N Por lo que el par torsional del pistón será.

Se considera que con:

$$F_p := F = 50 \text{ N} \longrightarrow F_a := \frac{F_p}{\cos(\beta)} \longrightarrow F_a = -181,7103 \text{ N}$$

Se hallará el valor de esfuerzo para el elemento mencionado

$$A_{\text{pistón}} := \frac{\pi}{4} \cdot (a)^2 = 0,0005 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{\text{Pistón}} := \frac{F_a}{A_{\text{pistón}}} \longrightarrow \sigma_{\text{Pistón}} = -3,7018 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{piston}} := \frac{T}{A_{\text{pistón}}} \cdot \frac{1}{m} \longrightarrow \tau_{\text{piston}} = 2791,2527 \text{ Pa}$$

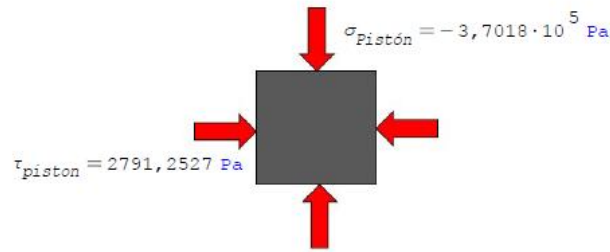
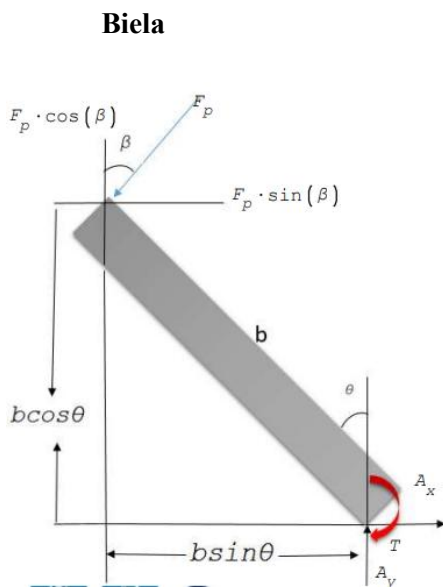


Figura 9. Esfuerzos en el pistón (fuente p.)



$$\Sigma M_A := 0$$

$$-T + F_p \cdot \cos(\beta) \cdot (b \cdot \sin(\theta)) + (F_a \cdot \sin(\beta)) \cdot (b \cdot \cos(\theta)) = 0$$

$$T := F_p \cdot b \cdot (\cos(\beta) \cdot \sin(\theta)) + (\sin(\beta) \cdot \cos(\theta))$$

Se reemplaza Fa en la expresión obtenida

$$T := \frac{F \cdot b}{\cos(\beta)} \cdot (\cos(\beta) \cdot \sin(\theta)) + (\sin(\beta) \cdot \cos(\theta))$$

Se sustituye los valores de cosβ y sinβ

$$T := F \cdot b \cdot \sin(\theta) + \frac{F \cdot b \cdot \left( \frac{b \cdot \sin(\theta)}{a} \right) \cdot \cos(\theta)}{\frac{\sqrt{a^2 - b^2} \cdot (\sin(\theta))}{a}}$$

figura 10. Cálculos de biela (fuente propia)

Al reducir la expresión, queda:

$$T := F \cdot b \cdot \sin(\theta) + \frac{F \cdot b^2 \cdot (\sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)}{\sqrt{a^2 - b^2} \cdot (\sin(\theta))^2}$$

Se consolidan valores adquiridos desde el diseño

$$\theta := 30 \quad F := 50 \text{ N}$$

$$a := 97,12 \text{ mm}$$

$$b := 32,37 \text{ mm}$$

$$T := F \cdot b \cdot \sin(\theta) + \frac{F \cdot b^2 \cdot (\sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)}{\sqrt{a^2 - b^2} \cdot (\sin(\theta))^2} \longrightarrow T = -1,6862 \text{ N m}$$

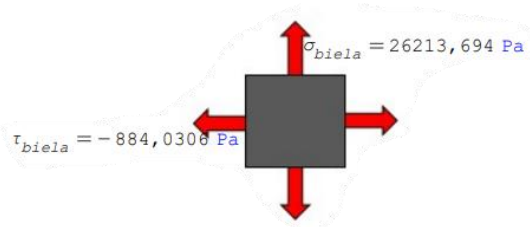


Figura 11. Esfuerzos en biela (fuente propia)

Se consideran los valores para realizar el análisis estático

$$F_p = 50 \text{ N}$$

$$T = -1,6862 \text{ N m} \longrightarrow F_{cortebielas} := T \cdot \frac{1}{m} \longrightarrow F_{cortebielas} = -1,6862 \text{ N}$$

$$\text{Area}_{bielas} := b \cdot h$$

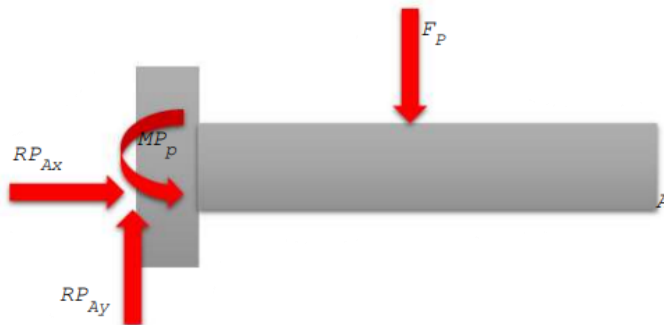
$$b := 12 \text{ mm} \quad h := 158,95 \text{ mm}$$

$$\text{Area}_{bielas} := b \cdot h \longrightarrow \text{Area}_{bielas} = 0,0029 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{bielas} := \frac{F_p}{\text{Area}_{bielas}} \longrightarrow \sigma_{bielas} = 26213,694 \text{ Pa}$$

$$\tau_{bielas} := \frac{F_{cortebielas}}{\text{Area}_{bielas}} \longrightarrow \tau_{bielas} = -884,0306 \text{ Pa}$$

## 7.5 PASADOR DEL PISTÓN



$$\Sigma F_y := 0$$

$$RP_{Ay} - F_p := 0$$

$$\Sigma F_x := 0$$

$$RP_{Ax} := 0$$

$$\Sigma MP_P := 0$$

Figura 12. Análisis estático en la biela (fuente propia)

$$F_p \cdot 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} - R_{P_{Ay}} \left( 35 \cdot 10^{-3} \text{ m} \right) + M_{P_p} = 0$$

Se consideran los valores para realizar el análisis estático

$$F_p = 50 \text{ N}$$

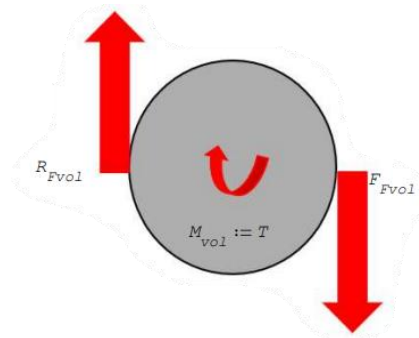
$$R_{P_{Ay}} - F_p := 0$$

$$R_{P_{Ax}} := F_p$$

$$D_{ppiston} := D_{ppiston} := 25 \text{ mm}$$

$$\sigma_{ppiston} := \frac{F_p}{\frac{\pi}{4} \cdot (D_{ppiston})^2} \longrightarrow \sigma_{ppiston} = 1,2992 \text{ MPa}$$

## 7.6 Volante (Polea de simple efecto)



$$\uparrow \Sigma F_y := 0$$

$$R_{vol} - F_{vol} := 0$$

$$R_{vol} := F_{vol}$$

Figura 13. Diagrama de polea de simple efecto (fuente propia)

$$F_{vol} := 50 \text{ N}$$

Por consideraciones de diseño a trabajar que

$$D_{volante} := 100 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor} := 30 \text{ mm}$$

$$d_{volante} := 12 \text{ mm}$$

$$A_{vol} = 0,0077 \text{ m}^2$$

$$A_{vol} := \frac{\pi}{4} \cdot \left( D_{volante}^2 - d_{volante}^2 \right)$$

$$M_{vol} := T = -1,6862 \text{ N m} \quad \sigma_{volante} := \frac{F_{vol}}{A_{vol}} = 6459,2104 \text{ Pa}$$

Para el análisis de torsión se suman los dos momentos obtenidos

$$M_1 := M_{vol} = -1,6862 \text{ N m} \quad M_2 := F_{vol} \cdot D_{volante} = 5 \text{ N m}$$

$$M_{vol} := M_{vol} + M_2 = 3,3138 \text{ N m}$$

Al conocer el valor real de momento del elemento analizado, se procede a aplicar la

fórmula de torsión, para eso recordamos que:  $\tau_{vol} := 1,6881 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

$$\tau_{vol} := \frac{16 \cdot M_{vol}}{\pi \cdot \left( D_{volante}^4 - d_{volante}^4 \right)}$$

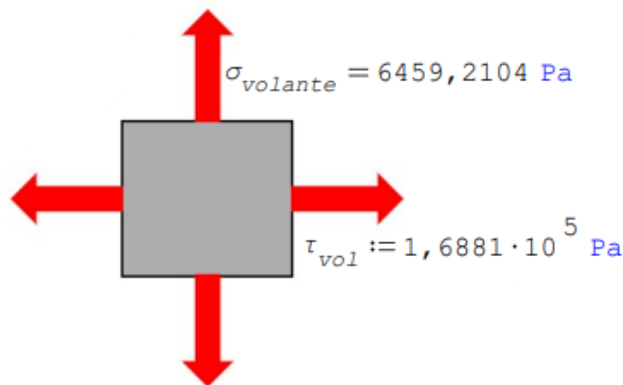


Figura 14. Diagrama de torsión en la volante (fuente propia)

Posterior a esto se realiza un análisis de fatiga para las condiciones de trabajo, las cuales son una máquina rotativa con una aplicación de carga axial. Se trabaja con una condición de torsión pura

$$S_f := C_{carga} \cdot C_{tamaño} \cdot C_{superficie} \cdot C_{temp} \cdot C_{confiabilidad} \cdot S_{f'}$$

Por la condición de trabajo de torsión pura  $C_{carga} := 1$

Debido tamaño a lo conocido desde la literatura, el  $C_{\text{tamaño}}$  Se Calculará:

$$C_{\text{tamaño}} := 1,189 \cdot d_{\text{equiv}}^{-0,097}$$

Para un eje sólido una condición de torsión pura  $A_{95} = 0,0008 \text{ m}^2$

$$A_{95} := 0,0766 \cdot D_{\text{volante}}^2$$

$$d_{\text{equiv}} := \sqrt{\frac{A_{95}}{0,0766}} = 0,1 \text{ m}$$

Al conocer esto se calcula el  $C_{\text{tamaño}} = 0,7606$

$$C_{\text{tamaño}} := 1,189 \cdot (100)^{-0,097} = 0,7606$$

Para conocer él  $C_{\text{superficie}}$  se reconoce que es un elemento maquinado en frío y así

mismo que el material a trabajar es un Aluminio **7075 - T6** que tiene un

$$S_{ut} := 228 \text{ MPa}$$

Acabado superficial	Para $S_{ut}$ en MPa se usa	
	A	b
Esmerilado	1.58	-0.085
<b>Maquinado o rolado en frío</b>	<b>4.51</b>	<b>-0.265</b>
Rolado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995

Figura 15. Tabla de acabados superficial

Por la tabla se reconoce que  $A := 4,51$   $b := -0,265$

$$C_{\text{superficie}} := A \cdot (S_{ut})^b = C_{\text{superficie}} := 1$$

Por las condiciones de trabajo, los cuales son a temperatura ambiente  $C_{\text{temp}} := 1$

• para  $T \leq 450 \text{ }^{\circ}\text{C} (840 \text{ }^{\circ}\text{F}) \rightarrow C_{temp} = 1$

se busca trabajar con una confiabilidad del 99% por esto  $C_{confiabilidad} := 0,814$

% de confiabilidad	$C_{conf}$
50	1.000
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

Figura 16. Tabla de confiabilidad

Para un eje solido una condición de torsión pura, trabajando en MPa y debido al material de fabricación del elemento, se trabajará según se condiciona por la siguiente gráfica:

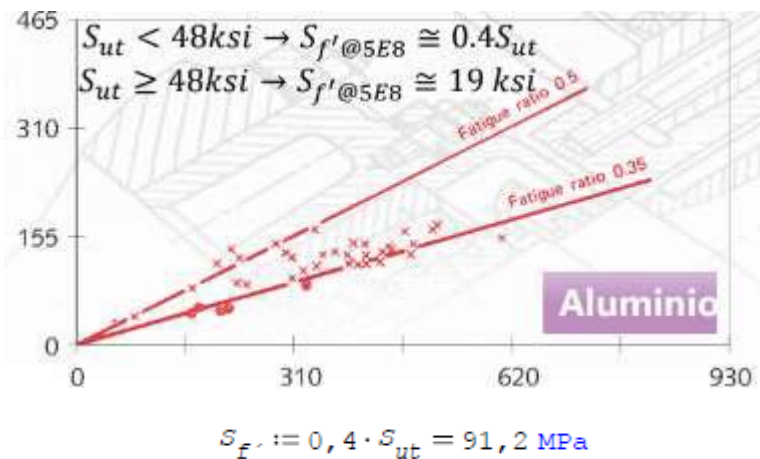


Figura 17. Factor de fatiga

Al conocer los valores, se procede a reemplazar en la fórmula para conocer el valor de fatiga corregida.

$$S_f := C_{\text{carga}} \cdot C_{\text{tamaño}} \cdot C_{\text{superficie}} \cdot C_{\text{temp}} \cdot C_{\text{confiabilidad}} \cdot S_f'$$

$$S_f = 56,4678 \text{ MPa}$$

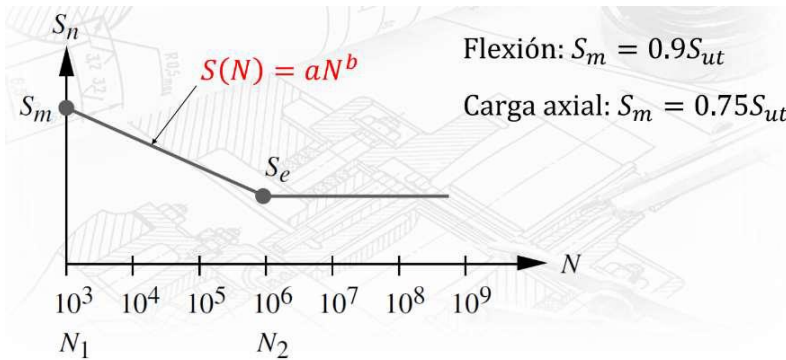


figura 18. Diagrama de fatiga corregida

$$S_m \quad S_m := 0,75 \cdot S_{ut} = 171 \text{ MPa} \quad \text{Por condición de carga axial}$$

Debido a que a el material no se le conocen los valores de resistencia límite a la fatiga, se procede a operar desde:

$$SN := a \cdot N^b$$

$$\log_{10}(SN) := \log_{10}(a) + b \cdot \log_{10}(N)$$

$$b := \frac{1}{z} \cdot \log_{10} \left( \frac{S_m}{S_f} \right)$$

$$z := \log_{10}(N_1) - \log_{10}(N_2)$$

$$S(N) = aN^b$$

$$\log S(N) = \log a + b \log N$$

Figura 19. Ecuación logarítmica

Por las condiciones de trabajo se selecciona Z a partir de la siguiente tabla

$$z := -5$$

$$b := \frac{1}{-5} \cdot \log \left( \frac{S_m}{S_f} \right) \longrightarrow b := -0,0961$$

$$\log(a) := \log_{10}(S_m) - 3 \cdot b$$

$$a := \left( \log_{10}(S_m) - 3 \cdot b \right)^{10}$$

$$a := 10380,9844$$

$N_2$	$z$
1.0E6	-3.000
5.0E6	-3.699
1.0E7	-4.000
5.0E7	-4.699
1.0E8	-5.000
5.0E8	-5.699
1.0E9	-6.000
5.0E9	-6.699

Figura 20. Tabla condiciones de trabajo

Se reemplaza los nuevos valores en la fórmula, suponiendo un esfuerzo alternativo de

10 Ksi

$$SN := a \cdot N^b$$

$$S(N) := 10380,9844 \cdot N^{-0,0961} \quad \text{Mpa}$$

$$10 := 10380,9844 \cdot N^{-0,0961}$$

$$\log(10) := \log(10380,9844) - 0,0961 \cdot \log(N)$$

$$1 := 4,016238538 - 0,0961 \cdot \log(N)$$

$$\log(N) := \frac{1 - 4,016238538}{-0,0961}$$

$$N := 10^{31,386457} \quad N := 1,5 \cdot 10^{32} = 1,5 \cdot E32 \text{ Ciclos}$$

## 7.7 CÁLCULO DE EJES

Para la selección de los ejes usados para el sistema, se procede a la estimación de los datos de salida obtenidos de la calculadora de engranajes, es por esto que se considera. para los datos reales del sistema se trabajará con la eficiencia dada por el tipo de mecanismo utilizado. Al ser engranajes rectos se trabajará con la eficiencia  $\eta := 92 \%$

Así mismo el sistema se estimó con los datos obtenidos del prototipo, para conservar con la primera ley de la termodinámica de la transformación de energía se escalaron los resultados con una escala de  $1=10$  es por esto que la potencia real de entrada para el sistema es de  $P_{realin} := 9123,9 \text{ kW}$  y la potencia real de salida será de  $P_{realout} := 7722,5 \text{ kW}$ .

Con estos datos se trabaja con el generador eléctrico seleccionado que tiene una potencia de  $P_{generador} := 5000 \text{ kW}$ .

### Datos

$$Z_{\text{piñon}} := 60 \quad Z_{\text{rueda}} := 12 \quad T_{\text{entrada}} := 3,31 \text{ N m} \quad D_{\text{centros}} := 36 \text{ mm}$$

$$M := 1 \quad T_{\text{trabajo}} := 22 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{Confiabilidad} := 92 \% \quad b := 10 \text{ mm} \quad R_t := 5$$

El eje se fabricó desde condiciones de mecanizado con AISI SAE 1045

## TORQUES

$$W_{in} := 80 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \cdot 2 \cdot \pi \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad W_{in} := 8,37758 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$T_{in} := \frac{912,39 \text{ N m}}{8,33758 \frac{\text{s}}{\text{rad}}} = 109,431 \text{ N m} \quad T_{in} = 109,431 \text{ N m}$$

$$T_{eje} := \eta \cdot T_{in} \cdot R_t \quad T_{eje} := 20,030 \text{ N m}$$

Este valor se selecciona desde los parámetros propuestos en el software de diseño.

## ANÁLISIS DE ENGRANAJES

Desde el análisis de engranajes según la calculadora dada, se obtienen los factores de seguridad  $K_f$  y  $K_n$ , así mismo se obtienen las cargas  $F_t$  y  $F_n$ .

Desde el estimado de diseño realizado, se seleccionan los cálculos para tres ejes de diferentes dimensiones, estos serán instalados en la carcasa previamente diseñada. Para el cálculo del primer eje se conoce que :

$$K_f := 1,201 \quad K_n := 3,463 \quad F_t := 1210,095 \text{ N} \quad F_n := 1287,756 \text{ N}$$

## DIMENSIONAMIENTO DEL EJE

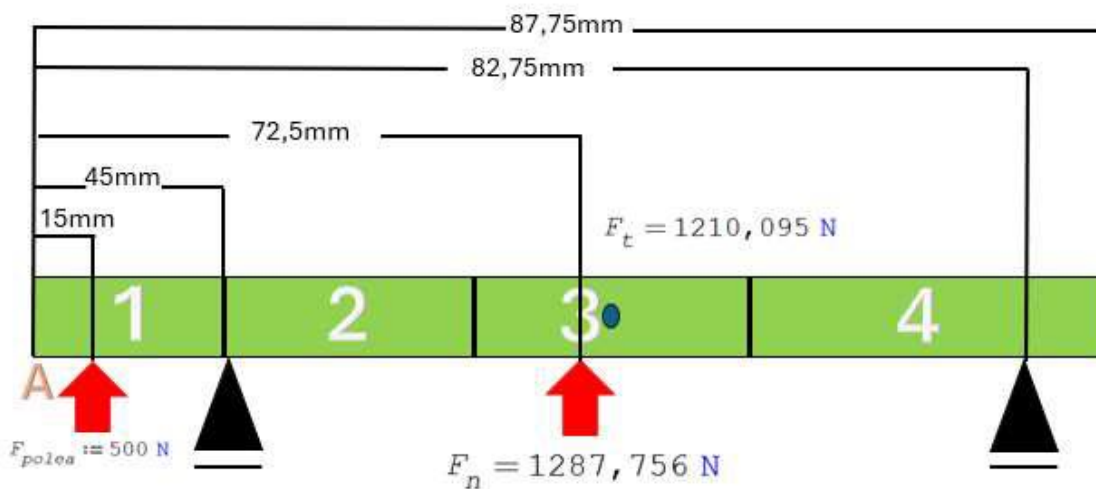
Por concepto de diseño propio se trabajará con un eje de  $L_1 := 87,5 \text{ mm}$ , este se dimensionará de la siguiente forma.



**Figura 21. Diagrama de enumeración de pasos en la construcción.**

En la parte 1 se ubica la salida de la volante del motor de vapor con un momento ya conocido, posterior a esto en la parte 2 se ubicará un rodamiento que estará en el interior de la carcasa, luego una anilla de retención. En la parte 3 se ubicará el engranaje previamente calculado, este se retendrá con un chavetero y una anilla de retención. Luego en la zona 4 el eje reposará sobre otro rodamiento que será anclado a la aleta de conexión dentro de la carcasa por medio de un mecanismo tipo cuna. Con base a esto se conocerán los factores para continuar con el análisis del eje.

### DIÁMETRO DEL EJE



**Figura 22. Diagrama de diámetros de ejes**

Para consolidar los valores faltantes se realiza simulación con Eje estimado en el software para conocer los momentos.

Recordemos la fórmula para calcular el diámetro del eje.

$$d := \left[ \left( (1,19 \cdot N) \cdot \left( \frac{K_f \cdot M_{max}}{2} \right)^2 + 0,694 \cdot \left( \frac{T}{S_y} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Se conoce que:

$$N = 3$$

### FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS EN EL EJE

$K_{fa}$  Es el factor de concentración dependerá de la cantidad de accesorios usados en el eje

Desde el análisis realizado tenemos que para este primer eje :

Tres anillos y un chavetero estos tienen factores de

$$K_{fAnillo} := 3 \quad K_{fchavetero} := 1,6 \quad \text{Por lo que } K_{fa} := 3 \cdot (3) + 1,6 = 10,6$$

### RESISTENCIA A LA FATIGA

$$S_n := C_b \cdot C_s \cdot C_r \cdot C_o \cdot S'_n \quad \text{Para aceros dúctiles } S'_n := 0,5 \cdot S_u$$

El material seleccionado es el AISI/SAE 1045, de la tabla proporcionada se conoce el valor de

$$S_u := 6749 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$S'_n := 0,5 \cdot S_u = 3374,5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Es por esto que

## FACTOR DE CORRECCIÓN POR TEMPERATURA

Recordemos que el sistema trabajara a una temperatura de  $T_{trabajo} := 22 \text{ } ^\circ\text{C}$  desde las condiciones dadas  $C_b := 1$

## FACTOR DE CORRECCIÓN DE SUPERFICIE

Ese valor se selecciona desde la gráfica de superficie que depende de la forma de fabricación del eje, al eje ser mecanizado se desarrolla la gráfica con el valor de  $C_s := 0,89$

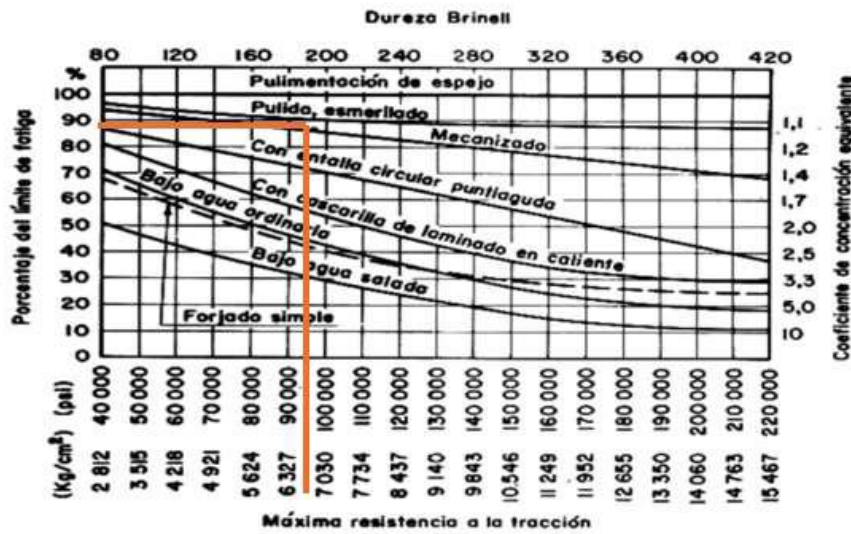


Figura 23. Diagrama de resistencia a la tracción

## CAJA MULTIPLICADORA

caja multiplicadora

Evaluated bearings

### 1. Results summary

 **K 15X19X10**  
Needle roller bearing

K 15X19X10		
SKF rating life, $L_{10mh}$	[h]	8400
Basic rating life, $L_{10h}$	[h]	74200 <span style="color: orange;">♦</span>
Relubrication interval, $t_r$	[h]	14800 <span style="color: orange;">♦</span>
Grease quantity		
- Side, $G_{p-side}$	[g]	0.9

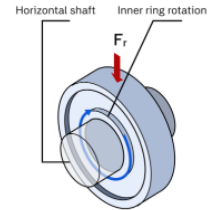
## 2. Input and settings

### 2.1 Bearing properties

		K 15X19X10
Bore diameter, d	[mm]	15
Outer diameter, D	[mm]	19
Width, B	[mm]	10
Basic load ratings		
- Dynamic, C	[kN]	7.21
- Static, C <sub>0</sub>	[kN]	9.3
- Fatigue load limit, P <sub>u</sub>	[kN]	1.08
Limiting speed, n <sub>lim</sub>	[r/min]	28000
Reference speed, n <sub>ref</sub>	[r/min]	24000

### 2.2 Operating conditions

		LC1
Forces		
- Radial, F <sub>r</sub>	[kN]	1.288
Speed		
- Rotational speed	[r/min]	70
Temperature		
- Expected at bearing	[°C]	50
Case weight	[-]	1



### 2.3 Lubrication settings

		K 15X19X10
Lubricant		
- Type	[-]	Grease
- Method	[-]	SKF grease
- Designation	[-]	LGMT2
Effective EP additives	[-]	False
Contamination		
- Contamination method	[-]	Detailed guidelines
- Bearing cleanliness	[-]	Normal cleanliness

### 3. Results

#### 3.1 Load level

K 15X19X10		
Equivalent dynamic load, P	[kN]	1.29
Load ratio, C/P	[-]	5.6
Minimum load met?	[-]	Yes
Minimum load radial, F <sub>rm</sub>	[kN]	0.144

#### 3.2 Bearing rating life

K 15X19X10		
SKF rating life, L <sub>10mh</sub>	[h]	8400
Basic rating life, L <sub>10h</sub>	[h]	74200 ♦
SKF life modification factor, a <sub>skf</sub>	[-]	0.11
Contamination factor, η <sub>c</sub>	[-]	0.04

#### 3.3 Bearing static safety

K 15X19X10		
Equivalent static load, P <sub>0</sub>	[kN]	1.29
Static safety factor, S <sub>0</sub>	[-]	7.22

#### 3.4 Lubrication

K 15X19X10		
Relubrication interval, t <sub>r</sub>	[h]	14800 ♦
Grease quantity		
- Side, G <sub>p-side</sub>	[g]	0.9
Viscosity ratio, κ	[-]	0.21
Operating viscosity		
- Actual, v	[mm <sup>2</sup> /s]	63.6
- Rated, v <sub>1</sub>	[mm <sup>2</sup> /s]	294
- Rated at 40 °C, v <sub>ref</sub>	[mm <sup>2</sup> /s]	539
Speed factor, nd <sub>m</sub>	[mm/min]	1190

#### 3.5 Speed level

K 15X19X10		
Adjusted reference speed, n <sub>ar</sub>	[r/min]	17400
Adjustment factors		
- Equivalent dynamic load, f <sub>p</sub>	[-]	0.73
- Oil viscosity, f <sub>v</sub>	[-]	1
Speed factor, nd <sub>m</sub>	[mm/min]	1190

3.6 Frequencies

K 15X19X10		
Rotational frequency		
- Inner ring, $f_i$	[Hz]	1.167
- Outer ring, $f_e$	[Hz]	0
- Rolling element set and cage, $f_c$	[Hz]	0.515
- Rolling element about its axis, $f_r$	[Hz]	4.89
Frequency of over-rolling		
- Point on inner ring, $f_{ip}$	[Hz]	9.779
- Point on outer ring, $f_{ep}$	[Hz]	7.721
- Rolling element, $f_{rp}$	[Hz]	9.779

**Figura 24. Tabla de selección de rodamientos fuente SKF-**  
<https://www.skf.com/co>

## 8 CÁLCULOS TÉRMICOS

Para el adecuado funcionamiento del prototipo de caldera acoplada a un motor tipo James Watt, se desarrolló un sistema de combustión diseñado para garantizar una transferencia de calor eficiente al fluido de trabajo. Este sistema contempla la selección del tipo de combustible más adecuado en función de sus propiedades termoquímicas, como la densidad, el poder calorífico y el costo, lo cual permite dimensionar correctamente los componentes críticos como el mezclador, el inyector y el cabezal de combustión. A partir de estos datos, se definieron las dimensiones del sistema, se realizaron modelos CAD detallados y se llevó a cabo un análisis de costos para evaluar la viabilidad técnica y económica del diseño.

### 8.1 Combustible

#### Volumen del recipiente

$$\text{Alturadeltubo} := 40 \text{ cm}$$

$$\text{Radiodeltubo} := 4,5 \text{ cm}$$

$$\text{Volumen} := \pi \cdot \text{Radiodeltubo}^2 \cdot \text{Alturadeltubo} = 0,0025 \text{ m}^3 \longrightarrow \text{Lo mismo que 2.5 litros}$$

Se conocen datos como:

$$SCH := 40$$

Se considera que P es la presión máxima de diseño

$$S := 35000 \text{ psi} \longrightarrow \text{Esfuerzo admisible del tubo}$$

Factor de seguridad

$$SCH := \frac{1000 \cdot P}{S}$$

Luego del despeje se tiene que

$$P := \frac{SCH \cdot S}{1000} \quad P := \frac{40 \cdot 35000}{1000} = 1400 \text{ psi}$$

Con estos datos obtenidos hallamos el factor de seguridad

**Presión de trabajo**       $\sigma_d := 150 \text{ psi}$

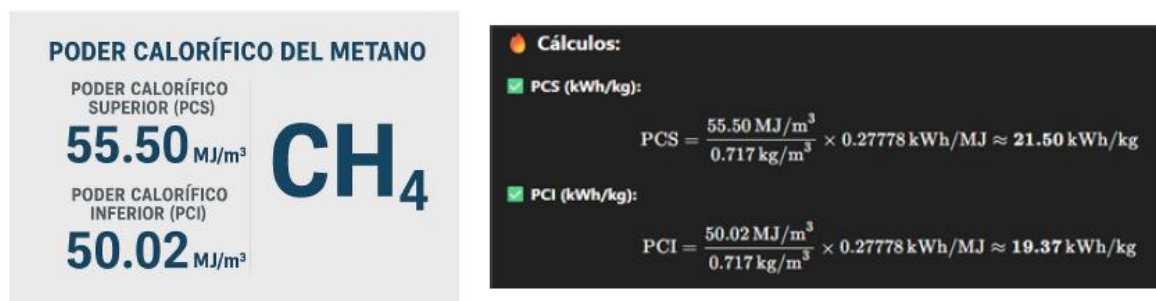
$$FS := \frac{P}{\sigma_d} \quad FS := \frac{1400}{150} = 9,3333$$

Con las condiciones de trabajo elegidas y los datos antes obtenidos, calculamos el comportamiento del fluido con el gas metano que será

nuestro combustible; con las presiones a tomar en cuenta y temperatura del fluido.

### Datos relevantes

#### Poder calorífico del metano



**Figura 25. Representación del poder calorífico del metano fuente**  
<https://chatgpt.com/>

Componentes	Altura sobre el nivel del mar (m)	Presión atmosférica	
		mmHg	inHg
Manizales	2160	585	23.01
Medellín[6]	1538	640	24.85
Mitú	200	742	29.22

Presion relativa-manometrica = 150 psi

Presion atmosferica de Medellin = 12,4 psi

Figura 26. Presiones atmosféricas en algunas ciudades en Colombia-  
<https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>

En el proceso tenemos que; el agua entrará a una temperatura de 20°C a una presión atmosférica de 12.4 psi

SISTEMA INTERNACIONAL	Temperatura (°C)	Volumen		Energía interna del Líquido		Energía interna de Evaporización		Energía interna del Vapor		Entalpía del Líquido		Entalpía de Evaporización		Entalpía del Vapor		Entropía del Líquido		Entropía de Evaporización		Entropía del Vapor	
		PSAT(kpa)	Vf(m3/kg)	Vg(m3/kg)	Uf (KJ/Kg)	Ufg (KJ/KG)	Ug (KJ/Kg)	hf (KJ/Kg)	hfg (KJ/Kg)	hg (KJ/Kg)	Sf (KJ/Kg K)	Sfg (KJ/Kg K)	Sg (KJ/Kg K)								
100	0,10135	0,001044	1,6729	418,94	2087,6	2506,5	419,04	2257,06	2676,1	1,3069	6,0480	7,3549									
105	0,12082	0,001048	1,4194	440,02	2072,38	2512,4	440,15	2243,65	2683,8	1,3630	5,9328	7,2958									
115	0,16906	0,001056	1,0366	482,30	2041,40	2523,7	482,48	2216,5	2699,00	1,4734	5,7099	7,1833									

Figura 27. Tabla propiedades del agua saturada fuente -  
<https://personales.unican.es/reduc/Trasporencias%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GRADOS/Tablas%20Termo.pdf>

Con las tablas termodinámicas calculamos la energía interna necesaria para llevar el agua de 20°C, con una presión atmosférica de 15 psi, a vapor de agua a 105°C y a 165 psi de presión absoluta

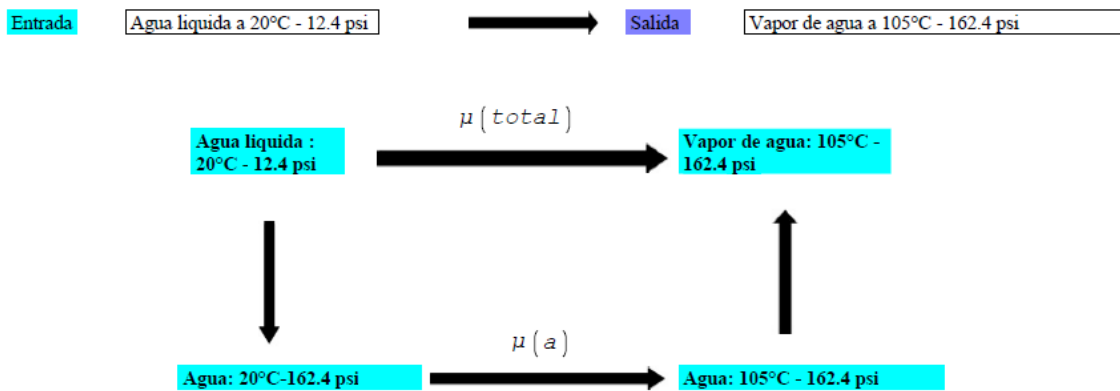


Figura 28. Esquema de energía total interna requerida fuente propia

$\Delta\mu$  = Energía interna total

Se suman la energía interna del agua líquida con la energía interna de evaporización [Figura 28] para hallar la energía total del sistema:

$$\Delta\mu := 440,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 2072,38 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2512,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Con la energía interna total calculada anteriormente y una cantidad de agua establecida en kg, se halla la energía del proceso. Se trabajó con el 50% de capacidad de la caldera será de 1.25 kg de agua.

$$\left( m_{\text{H}_2\text{O}} := 1,25 \text{ kg} \right) \cdot \left( \Delta\mu_{\text{total}} \right) \cdot \left( m_{\text{H}_2\text{O}} \right) \longrightarrow 2512,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,25 \text{ kg} = 3140,5 \text{ kJ}$$

Utilizando el poder calorífico del metano, y la energía total hallada, se calcula la masa necesaria del metano para el proceso.

$$\begin{aligned} & 3140,5 \text{ kJ} \frac{1 \text{ kgmetano}}{19,37 \text{ kW hr}} \longrightarrow 3140,5 \text{ kJ} \frac{1 \text{ kgmetano}}{19,37 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \text{ hr}} \longrightarrow 3140,5 \text{ kJ} \frac{1 \text{ kgmetano}}{19,37 \frac{\text{kJ hr}}{\text{s}} \frac{3600 \text{ s}}{\text{hr}}} \\ & \text{Masa}_{\text{metano}} := 3140,5 \text{ kJ} \cdot \left( \frac{1 \text{ kg}}{19,37 \frac{\text{kJ hr}}{\text{s}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{hr}}} \right) = 0,045 \text{ kg} \end{aligned} \quad \text{Energía}$$

Si se estima que el suministro de calor ocurre en un lapso de tiempo de aproximadamente 20 minutos (1200 s), entonces el flujo de masa de combustible necesario es de 0.0000375 kg/s.

El elemento de análisis se encuentra rodeado por aire ambiente, y se supone de la siguiente forma.

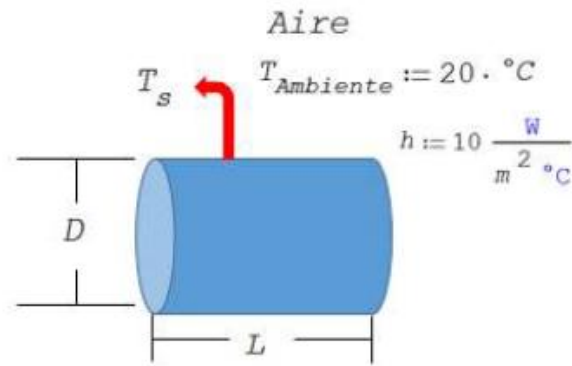


Figura 28. Esquema caldera fuente propia

Como datos para calcular el Calor perdido en el elemento se tienen

$T_{ambiente} := 20 \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$	Obtenido desde las tablas de vapor saturado, para las condiciones de trabajo dadas.	$L := 400 \text{ mm} \longrightarrow L = 0,4 \text{ m}$
$T_s := 105 \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K}$		$D := 152,40 \text{ mm} \longrightarrow D = 0,1524 \text{ m}$

$$A_s := 2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot L + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$A_s = 0,228 \text{ m}^2$$

Para calcular la pérdida de calor en el elemento, primero debemos determinar el coeficiente de convección del mismo.

**Datos** → Se trabajará suponiendo convección natural  
 $T_{ambiente} := 20 \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K} = 293,15$

$T_s := 105 \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K} = 378,15$

$L := 400 \text{ mm} \rightarrow L = 0,4 \text{ m}$

$D_{ext} := 152,40 \text{ mm} \rightarrow D_{ext} := 0,15240 \text{ mm}$

**Propiedades del aire a 20°C**

$\rho_{aire} := 1,212 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \rightarrow$  Densidad del aire

**Calculo del Numero de Nu para cilindro horizontal**

$$Nu := \frac{0,6 + \left( 0,39 \cdot \left( \frac{Ra}{6} \right)^{1/4} \right)^2}{\left( 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{1/4} \right)^{4/3}} = 97,532$$

$k := 0,0251 \frac{\text{watt}}{\text{m } ^\circ\text{C}} \rightarrow$  Conductividad termica

$\gamma := 1,522 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \rightarrow$  Viscosidad cinematica

$\alpha := 2,090 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \rightarrow$  Difusividad termica

$\beta := 0,00341 \cdot \frac{1}{\text{K}} \rightarrow$  Coeficiente de dilatacion volumetrica

$Pr := 0,7294 \rightarrow$  Numero de Prandtl

**Numero de Rayleigh**

$$Ra := \frac{g_e \cdot \beta \cdot (T_s - T_{ambiente}) \cdot L^3}{\gamma \cdot \alpha} = 5,7189 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{\text{K}}$$

**De la ecuacion del numero de Nu para cilindro horizontal despejamos el h**

$$Nu := \frac{hL}{k} \rightarrow h := \frac{Nu \cdot k}{L}$$

$$h := \frac{97,532 \cdot (\text{K})}{L} = 6,1201 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$h := 6,1201 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Para el cálculo del calor por Radiación se conocen los siguientes datos:

$$\sigma := 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^4}$$

$\xi := 0,8 \rightarrow$  Este valor de emisividad se conoce a partir de las tablas de transferencia de calor compartidas al inicio del curso.

Recordemos las fórmulas a emplear

$$Q_{totalPer} := Q_{conv} + Q_{rad}$$

$$Q_{conv} := h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{ambiente}) = 118,6046 \text{ W}$$

$$Q_{rad} := \xi \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_s^4 - T_{ambiente}^4) \cdot \text{°C}^4 = 135,0964 \text{ W}$$

Por esto el  $Q_{totalper}$

$$Q_{totalPer} := Q_{conv} + Q_{rad}$$

$$Q_{totalPer} := 118,6046 \text{ W} + 135,0964 \text{ W} = 253,701 \text{ W}$$

$$Q_{totalPer} = 0,2537 \text{ kW}$$

Al conocer estos valores se calcula el valor estimado de la eficiencia del sistema

$$Eficiencia := \frac{Q_{aprovechado}}{Q_{suministrado}} \cdot 100$$

$$Q_{aprovechado} := Q_{suministrado} - Q_{totalPer}$$

$$Q_{suministrado} := Masa_{metano} \cdot PCI_{metano}$$

$$PCI_{metano} := 19,37 \frac{\text{kW h}}{\text{kg}}$$

Luego de reemplazar y recordando que el flujo másico de combustible es de 0.0000375 kg7s, se llega a que el calor suministrado es de 2.6 kW aproximadamente.

Conociendo estos valores, se realiza el cálculo de la eficiencia, calculando primero el calor aprovechado, como la diferencia entre el suministrado y el total perdido. Con lo valores previamente calculados se llega a que  $Q_{aprovechado} = 2.35 \text{ kW}$ .

Por su parte la eficiencia se calcula como la razón entre el calor aprovechado y el calor suministrado, dando un resultado de 90%, lo cual simplemente significa que del calor total que aporta el sistema de combustión, solo el 10% se pierde en forma de convección y radiación térmica. Sin embargo, el propio sistema de combustión tiene su propia eficiencia de transformación de energía.

## 9 Cálculo quemador para recipiente a presión operado a 150psi

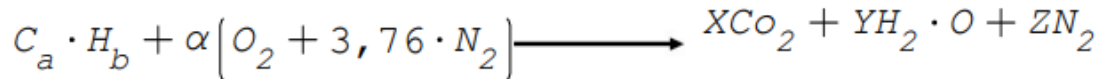
Desde estimaciones anteriores el combustible con el que se alimentará el quemador es el Metano



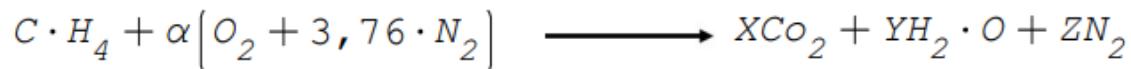
De cálculos posteriores conocemos que el calor aprovechado por el sistema es de

$$P_{Tgas} := 647,7686 \text{ W}$$

### 9.1 Ecuación de Combustión Ideal



Para el Metano sería:



#### Carbono

$$X := 1$$

#### Hidrogeno

$$4 := 2 \cdot Y \longrightarrow Y := 2$$

#### Oxigeno

$$2 \cdot \alpha := 2 \cdot X + Y \longrightarrow 2 \cdot \alpha := 2 \cdot 1 + 2 \longrightarrow \alpha := \frac{4}{2} \longrightarrow \alpha = 2$$

#### Nitrógeno

$$2 \cdot 3,76 \cdot \alpha := 2 \cdot Z \longrightarrow 2 \cdot 3,76 \cdot 2 := 2 \cdot Z \longrightarrow Z := \frac{15,04}{2} \longrightarrow Z = 7,52$$

### Composición de los productos con base Húmeda del Metano

$$Y_{CO_2} := \frac{1}{10,52} \cdot 100 = 9,5057 \quad \%CO_2$$

$$Y_{H_2O} := \frac{2}{10,52} \cdot 100 = 19,0114 \quad \%H_2O$$

$$Y_{N_2} := \frac{7,52}{10,52} \cdot 100 = 71,4829 \quad \%N_2$$

### Composición de los productos con base Seca del Metano

$$Y_{CO_2} := \frac{1}{8,52} \cdot 100 = 11,7371 \quad \%CO_2$$

$$Y_{N_2} := \frac{7,52}{8,52} \cdot 100 = 88,2629 \quad \%CO_2$$

### Masa Molar

$$M := \frac{\text{masa}}{\text{moles}} \longrightarrow \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \longrightarrow M_{CH_4} := 16,42 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$M_{C_3H_8} \longrightarrow N_{C_3H_8} \cdot M_{C_3H_8} \longrightarrow 1 \text{ kmol} \cdot 16,042 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \longrightarrow 16,042 \text{ kg} \cdot CH_4$$

$$M_{CO_2} \longrightarrow N_{CO_2} \cdot M_{CO_2} \longrightarrow 1 \text{ kmol} \cdot 44,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \longrightarrow 44,0 \text{ kg} \cdot CO_2$$

$$M_{H_2O} \longrightarrow N_{H_2O} \cdot M_{H_2O} \longrightarrow 2 \text{ kmol} \cdot 18,015 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \longrightarrow 36,03 \text{ kg} \cdot H_2O$$

$$M_{N_2} \longrightarrow N_{N_2} \cdot M_{N_2} \longrightarrow 7,52 \text{ kmol} \cdot 28,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \longrightarrow 210,69 \text{ kg} \cdot N_2$$

### Relación Aire Combustible Ideal del Butano

$$\frac{A}{F} := \frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{combustible}}} \longrightarrow \frac{N_{\text{aire}} \cdot M_{\text{aire}}}{N_{\text{combustible}} \cdot M_{\text{combustible}}} \longrightarrow \frac{\alpha \cdot (1 + 3,76) \cdot M_{\text{aire}}}{N_{\text{combustible}} \cdot M_{\text{combustible}}}$$

$$\frac{2 \cdot (1 + 3,76) \cdot 28,97 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kmol}_{\text{aire}}}}{1 \text{ kmol}_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot 16,042 \frac{\text{kg}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}{\text{kmol}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}} \longrightarrow 17,20 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{C}_4\text{H}_{10}}}$$

Este es el valor de la relación aire combustible en condición ideal del Metano

**Punto de Rocío**

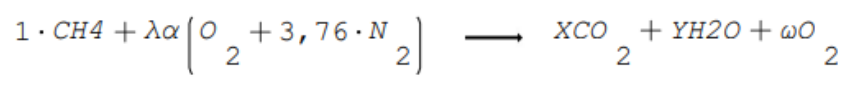
$$Y_{\text{H}_2\text{O}} := 0,1495 \longrightarrow \rho_{\text{H}_2\text{O}} = Y_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{Producto}} \longrightarrow 0,1495 \cdot 101,3 \cdot \text{KPa}$$

**Punto de rocío**  $\longrightarrow$  **17,20 kPa**

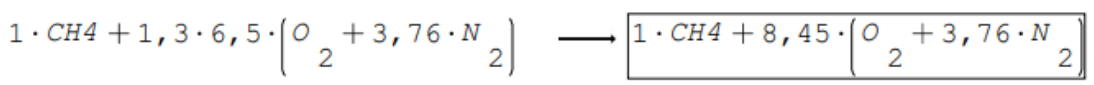
De la tabla A-5 de Cengel se calcula la temperatura de saturación, siendo:

$$T_{\text{dpmetano}} = 73,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Combustión real del Metano**



Se estima  $\lambda := 1,3$



Se realiza balance atómico para conocer los componentes de la combustión:

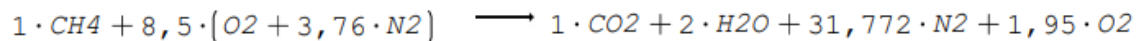
**Carbono**  $X = 1$

**Hidrogeno**  $4 = 2 \cdot Y \longrightarrow Y = 2$

**Oxigeno**  $(2 \cdot 8,45 = 2 \cdot X + Y + 2 \cdot \omega) \longrightarrow (16,9 = 2 \cdot 1 + 2 + 2 \cdot \omega)$   
 $\longrightarrow (16,9 - 13 = 2 \cdot \omega)$   
 $\omega = 1,95$

**Nitrogeno**  $2 \cdot (3,76) \cdot (8,45) = 2 \cdot Z \longrightarrow \frac{2 \cdot (3,76) \cdot (8,45)}{2} = Z$   
 $Z = 31,772$

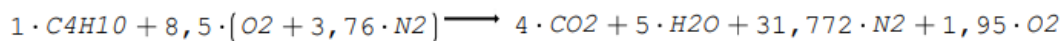
La reacción real de combustión es cuando el sistema trabaja con metano es:



Se realizan las mismas consideraciones mencionadas en el apartado del metano

$P_{Medellin} := 85 \text{ kPa}$   $T_{ambiente} := 22 \text{ }^\circ\text{C}$

$P_{Medellin} := 85 \text{ kPa}$   $T_{producB} := 105 \text{ }^\circ\text{C} + 273,15 \text{ K} \longrightarrow T_{producB} := 378,15 \text{ K}$



$P_{Medellin} := 85 \text{ kPa}$   $T_{ambiente} := 295,2 \text{ K}$   $P_{Medellin} := 85 \text{ kPa}$   $T_{producB} = 378,15 \text{ K}$

Para conocer la temperatura alcanzada en los productos de la combustión se realiza lo siguiente:

### Relación Aire-Combustible Real del Metano

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{Real} = \frac{M_{aire - real}}{M_{Combustible - real}} \longrightarrow \frac{N_{aire} \cdot M_{aire}}{N_{combustible} \cdot M_{Combustible}}$$

$$\longrightarrow \frac{\lambda \cdot \alpha (1 + 3,76) \cdot M_{aire}}{N_{combustible} \cdot M_{Combustible}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{Real} = \lambda \cdot \left(\frac{A}{F}\right)_{ideal} \longrightarrow \frac{1,476 \cdot (28,97)}{16,04} \longrightarrow 8,597 \cdot \frac{Kg_{aire}}{Kg_{CH_4}}$$

### Calor generado en la combustión real del Metano

$$Q_{real} < Q_{ideal} \longrightarrow \eta := \frac{Q_{real}}{Q_{ideal}} \longrightarrow Q_{real} = \eta \cdot PCI$$

Para obtener el  $Q_{real}$  Usamos la calculadora de combustión proporcionada en el curso de diseño de sistemas térmicos realizada por nuestro asesor Álvaro Delgado. Para esto se realiza los valores obtenidos y supuestos en las anteriores partes del documento. se comienza estimando el calor generado por el Metano.

átomos de C	1	
átomos de H	4	
T reactivos	22	°C
T combustión	1800	K
T productos	105	°C
p combustió	0,85	atm
Exceso de aire	30	%

Recordemos que el Metano satisface a la fórmula química CH<sub>4</sub>

Desde la calculadora los valores obtenidos fueron:

PARÁMETROS DE SALIDA DE LA COMBUSTIÓN					
Aire teórico	2,0	kmol aire	A/C real	22,41	kg a/kg comb
PCS	48100,0	kJ/kg	T llama adiab.		K
PCI	44600,0	kJ/kg	Q liberado real	41078,6	kJ/kg comb
Cp prod	1,16	kJ/kg°C	Eficiencia	92,10	%
T rocío	47,02	°C	M productos	28,13	kg/kmol
A/C teórica	17,24	kg a / kg comb			

Por lo tanto:

$$Q_{real} := 41078 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{CH}_4}}$$

$$\eta := 88,50 \%$$

Continuando con el proceso se estimará el diseño del sistema de quemado para este sistema:

$$P_{Tgas} := m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \cdot Q_{real} \longrightarrow m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} := \frac{P_{Tgas}}{Q_{real}}$$

$$m_{\text{CH}_4} := \frac{P_{Tgas}}{Q_{real}} \longrightarrow m_{\text{CH}_4} = 1,5769 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}_{\text{CH}_4}}{\text{s}}$$

Se procederá a realizar el cálculo de caudal de Butano por tablas estimamos los valores faltantes:

$$\rho_{relativa} := 2,522 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m := \rho_{relativa} \cdot \text{caudal} \longrightarrow \text{caudal}_{\text{CH}_4} := \frac{m_{\text{CH}_4}}{\rho_{relativa}}$$

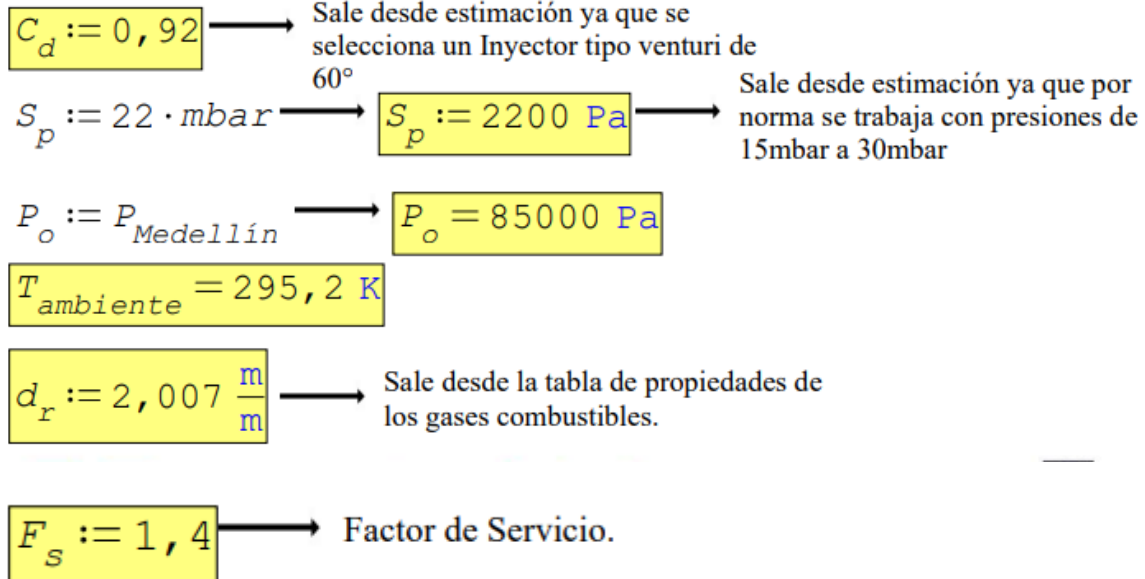
$$\text{caudal}_{\text{CH}_4} := 5,7988 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

## 9.2 Cálculo del inyector

Se procede con el cálculo del inyector partiendo del método analítico:

$$A_{iny} := \frac{\text{caudal}_{\text{CH}_4} \cdot F_s}{C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_p}{1,293 \cdot d_r} \cdot \frac{P_o}{101325} \cdot \frac{273}{T_{ambiente}}}}$$

Desde las tablas conocidas, se seleccionan los valores para el cálculo:



Se procede a reemplazar en la fórmula dada:

$$A_{iny} := \frac{\text{caudal}_{CH_4} \cdot F_s}{C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_p}{1,293 \cdot d_r} \cdot \frac{P_o}{101325} \cdot \frac{273 \text{ K}}{T_{\text{ambiente}}}}}$$

$$A_{iny} := 1,744 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$A_{iny} := \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \rightarrow d_i := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{iny}}{\pi}} \rightarrow d_i := 0,556578 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$d_i = 5,5658 \text{ mm} \rightarrow \text{Se normaliza el diametro para realizar la perforación con herramientas comerciales. Esta estimación será de } D_{drill} := 6 \text{ mm}$$

### 9.3 Cálculo del mezclador (Venturi)

$$D_c := \frac{d_i \left( \frac{Q_a}{Q_g} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_g}}}{\beta} \longrightarrow \frac{Q_a}{Q_g} := \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{gas}}} \longrightarrow \frac{\alpha \cdot \lambda \cdot 4,76}{n_{\text{gas}}}$$

$$\frac{Q_a}{Q_g} := \frac{\alpha \cdot \lambda \cdot 4,76}{1} \longrightarrow \frac{6,5 \cdot 1,3 \cdot 4,76}{1} = 40,222$$

$$\frac{Q_a}{Q_g} := 40,222$$

Se reemplaza con los valores conocidos:

$$d_i = 5,5658 \text{ mm} \longrightarrow \frac{Q_a}{Q_g} := 40,222 \longrightarrow \rho_a := 1 \longrightarrow \rho_g := 2,007$$

Por las condiciones discutidas en los encuentros de clase, se estimará el valor de beta como:

$$\beta := 0,92$$

Se reemplaza con los valores conocidos:

$$D_c := \frac{d_i \left( \frac{Q_a}{Q_g} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_g}}}{\beta} \longrightarrow \frac{5,5658 \cdot (40,222) \cdot \sqrt{\frac{1}{2,007}}}{0,92} = 171,7631$$

$$D_c := 171,7631 \text{ mm}$$

A partir del diámetro del cuello se determinan las demás dimensiones del mezclador:

$$L_c := 2,2 \cdot D_c = 377,8788 \text{ mm}$$

$$L_d := 9 \cdot D_c = 1545,8679 \text{ mm}$$

$$L_i := (22 \cdot D_c + 15) \text{ mm} \rightarrow L_i := (22 \cdot 171,7631) + 15$$

$$\rightarrow L_i := 3793,7882 \text{ mm}$$

$$D_e := 2 \cdot D_c = 343,5262 \text{ mm}$$

#### 9.4 Cálculo del cabezal

$$A_{totalpuertos} := \frac{P_{Tgas} \cdot F_s}{P_e}$$

##### Potencias específicas recomendadas

Gas	Rango de $P_e$ (kW/cm <sup>2</sup> )
Gas natural	1.3 a 1.6
Otros gases	0.7 a 1.3

Desde tabla se estima el valor de  $P_e := 1 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2}$

$$A_{totalpuertos} := \frac{P_{Tgas} \cdot F_s}{P_e} = 0,9069 \text{ cm}^2$$

Se calcula el número de puertos:

$$N_p := \frac{A_{totalpuertos}}{A_{ipuerto}} \rightarrow \frac{0,9069 \text{ cm}^2}{\frac{\pi}{4} \cdot d_e^2}$$

Dimensiones  
 (volumen,  
 nominal y útil,  
 diámetro,  
 altura)

$V = 213/181 \text{ m}^3$   
 $\varnothing = 3,5 \text{ m}$   
 $L = 23,96 \text{ m}$

Desde tabla se estima el valor de  $d_e := 3,5 \text{ mm}$

$$d_e = 0,35 \text{ cm}$$

$$w := \frac{\pi}{4} \cdot (0,35)^2 \quad w := 0,096 \text{ cm}$$

$$N_p := \frac{0,9069 \text{ cm}^2}{\frac{\pi}{4} \cdot d_e^2} \longrightarrow N_p := 9,42 \longrightarrow \text{El cabezal deberá tener un total de 10 puertos.}$$

## 10 Costos

En el contexto del desarrollo de prototipos industriales, la estimación precisa de costos asociados a **materiales** y **mano de obra** constituye un elemento crítico para garantizar la viabilidad económica del proyecto. Este análisis financiero proporciona una base sólida para la toma de decisiones, permitiendo optimizar recursos, identificar oportunidades de eficiencia y asegurar la calidad del producto final.

### Materiales

Elemento	Cantidad	Costo Unitario (COP\$)	Subtotal (COP\$)
Base	1	\$ 50.000,00	\$ 50.000,00
Cilindro	1	\$ 55.000,00	\$ 55.000,00
Biela	1	\$ 108.000,00	\$ 108.000,00
Eje de Transmisión + Caja Multiplicadora	1	\$ 350.000,00	\$ 350.000,00
Acople Araña (entre ejes)	1	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
Eje de Entrada a la caja	1	\$ 35.000,00	\$ 35.000,00
Pistón de Entrada	1	\$ 62.400,00	\$ 62.400,00
Pistón de Recepción	1	\$ 62.400,00	\$ 62.400,00
Eje de Salida	1	\$ 45.000,00	\$ 45.000,00
Rodamientos (Transmisión de Potencia)	6	\$ 109.000,00	\$ 654.000,00
Generador Eléctrico	1	\$ 300.000,00	\$ 300.000,00
Manómetro	1	\$ 30.200,00	\$ 30.200,00
Válvula de Paso	1	\$ 21.550,00	\$ 21.550,00
Termómetro	1	\$ 120.000,00	\$ 120.000,00
Manómetro (segunda referencia)	1	\$ 27.000,00	\$ 27.000,00
Accesorios de Labor	2	\$ 150.000,00	\$ 300.000,00
Válvulas de Seguridad	2	\$ 193.000,00	\$ 386.000,00
		<b>Subtotal Materiales</b>	<b>2,706,000.81</b>

### 10.1.1 Tabla de costos de materiales

#### Mano de obra

Actividad	Tiempo	Costo (COP\$)
Fabricación de la caja	12 horas	\$ 600.000,00
Soldadura	6 horas	\$ 1.000.000,00
	Total	\$ 1.600.000,00

### 10.1.2 Tabla 2. Mano de obra

## 11. CONCLUSIONES

El proyecto de diseño mecánico y térmico de una unidad de generación de vapor de baja potencia ha demostrado ser una solución viable y eficiente para áreas rurales con limitaciones de espacio y recursos, como el municipio de Murindó en Antioquia, Colombia. A lo largo de este trabajo, se lograron cumplir los objetivos planteados, validando el diseño mediante simulaciones, análisis. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes:

### 1. Cumplimiento de Objetivos

El diseño del sistema compacto de generación de vapor cumplió con los criterios de eficiencia térmica, seguridad y adaptabilidad establecidos al inicio del proyecto. Los resultados obtenidos confirman que el sistema es capaz de operar a 105°C y 150 psi, generando 4.3 kW de energía eléctrica, lo que es suficiente para abastecer una pequeña comunidad rural. Además, el sistema demostró ser fácil de mantener y operar, lo que lo hace ideal para áreas con recursos técnicos y financieros limitados.

### 2. Contribuciones Técnicas

El proyecto aportó varias innovaciones técnicas que mejoran la eficiencia y la viabilidad de los sistemas de generación de vapor en contextos rurales:

- **Diseño compacto:** El sistema ocupa un espacio reducido, lo que facilita su instalación en áreas con limitaciones de espacio.
- **Eficiencia térmica:** Con una eficiencia del 72%, el sistema minimiza las pérdidas de calor y optimiza el uso de recursos.
- **Seguridad:** El diseño cumple con las normativas internacionales, como ASME Sección VIII, garantizando la seguridad en condiciones de alta presión y temperatura.

- **Adaptabilidad:** El sistema puede ser alimentado por recursos locales, como el metano el cual puede ser extraído por los desechos generados por la comunidad, lo que reduce su dependencia de combustibles fósiles.

### 3. Impacto Social y Ambiental

La implementación de este sistema en áreas rurales como Murindó tiene un impacto significativo en la calidad de vida de los habitantes y en el desarrollo económico de la región:

- **Acceso a energía eléctrica:** El sistema proporciona una fuente de energía confiable para iluminación, comunicaciones y otros usos básicos.
- **Desarrollo económico:** Al facilitar el acceso a energía, el sistema impulsa actividades económicas como la agricultura y la pesca, mejorando los ingresos de las familias.
- **Sostenibilidad ambiental:** Al utilizar recursos locales y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el sistema contribuye a la conservación del medio ambiente.

### 4. Limitaciones y Desafíos

A pesar de los logros alcanzados, el proyecto enfrentó algunas limitaciones que deben ser consideradas en futuras investigaciones:

- **Costos iniciales:** Aunque el sistema es más económico que las soluciones convencionales, los costos iniciales pueden ser un desafío para comunidades con recursos limitados.
- **Mantenimiento:** Aunque el sistema es fácil de mantener, es necesario capacitar a los operadores locales para garantizar su correcto funcionamiento.
- **Condiciones ambientales:** El sistema debe ser probado en condiciones más adversas, como altas humedades o temperaturas extremas, para garantizar su durabilidad.

### 5. Recomendaciones para Futuras Investigaciones

Para mejorar el diseño y la viabilidad del sistema, se recomienda:

- **Reducción de costos:** Investigar el uso de materiales más económicos sin comprometer la seguridad y la eficiencia.
- **Integración con energías renovables:** Explorar la combinación del sistema con fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, para maximizar su sostenibilidad.
- **Escalabilidad:** Desarrollar versiones más grandes del sistema para abastecer comunidades más grandes o aplicaciones industriales.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

1. Arango, R. M. (2015). Trámites retrasan la reubicación de Murindó. *El Colombiano*.
2. ASME. (2023). *BPVC Section VIII - Rules for Construction of Pressure Vessels: Division 1 and Division 2*.
3. Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones (4a. ed.--). México D.F.: McGraw Hill.
4. Çengel, Y. A., & Boles, M. (2016). *Termodinámica* (7a. ed.--). México D.F.: McGraw Hill.
5. Singh, R., & Yadav, A. (2024). Advances in the design of renewable energy power supply for rural health clinics: Case studies and future directions. *Renewable Energy Journal*.
6. Wang, H., Liu, B., & Wu, W. (2024). Optimizing the integration of building materials, energy consumption, and economic factors in rural houses of cold regions: A pathway. *Buildings*.