

**Diseño Y Construcción De Una Turbina Eólica Savonius De Etapas Múltiples Con  
Deflectores Para El Soporte De Consumo Eléctrico En Residencias De Tipo Familiar  
Urbanas**

Juan Diego Cortes Ulloa y Brayan José Chacón Agudelo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Manuel Del Jesús Martínez

Doctor en Filosofía

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

A Dios, por ser mi guía constante, por brindarme fortaleza, sabiduría y serenidad en cada etapa de este proceso académico, y por permitirme culminar con éxito este importante logro personal y profesional.

A mis padres, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo permanente, por inculcarme valores, disciplina y perseverancia, y por creer en mí incluso en los momentos de mayor dificultad. Este logro es también fruto de su esfuerzo y confianza.

A mis abuelos, por su amor incondicional, su ejemplo de vida y su apoyo constante, por las enseñanzas y valores que con paciencia y cariño me han transmitido, y por ser una fuente permanente de motivación, fortaleza e inspiración a lo largo de mi vida.

A mis hermanos, quienes con su alegría, espontaneidad y cariño hicieron más liviano este camino. Gracias por recordarme, incluso sin saberlo, la importancia de la paciencia, la constancia y la sencillez. Su presencia fue una motivación para seguir adelante y dar lo mejor de mí.

A mi pareja, por su comprensión, amor, paciencia y apoyo incondicional, por acompañarme en los momentos de cansancio, por motivarme a seguir adelante cuando los desafíos parecían mayores y por creer en mí incluso en los momentos de mayor exigencia.

Finalmente, a mis amigos de la universidad, quienes compartieron conmigo este camino académico, brindando compañerismo, apoyo y experiencias que hicieron este proceso más llevadero y enriquecedor, tanto en lo académico como en lo personal.

*Juan Diego Cortes Ulloa*

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi papá José Chacón y a mi madrastra Alicia Godoy, por su apoyo constante durante toda esta etapa de formación académica. Sus Consejos y su respaldo, me han ayudado a avanzar con determinación y compromiso en cada etapa de mi desarrollo personal y profesional.

De igual manera, dedico este trabajo a mis hermanos, quienes han sido fuente de apoyo y motivación. Su compañía y palabras de motivación han hecho más llevadero el tiempo en que he estado distanciado de mi familia. Su presencia ha sido muy importante para no perder mi motivación y seguir avanzando en este proceso de mi vida.

Por otro lado, dedico este trabajo a mis profesores, por su compromiso, apoyo y orientación durante toda mi formación académica. Su exigencia, acompañamiento y disposición para enseñar fueron fundamentales en este proceso académico, aportando tanto en mi crecimiento académico, profesional y personal.

Finalmente, dedico este trabajo a mis amigos con los cuales he compartido muchos momentos agradables a lo largo de la vida universitaria. Su compañía y colaboración me han permitido avanzar como persona y conocer nuevas costumbres de regiones diferentes. Además, su apoyo ha contribuido a que este proceso universitario haya sido una experiencia enriquecedora, tanto a nivel personal como formativo

*Brayan José Chacón Agudelo*

### **Agradecimientos**

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la oportunidad de formar parte de esta comunidad académica y por proporcionar los espacios, recursos e infraestructura necesarios para el desarrollo de nuestra formación académica, profesional y personal. La calidad de la enseñanza, el acompañamiento docente y el acceso a sus instalaciones y equipos fueron fundamentales para nuestro crecimiento como futuros ingenieros.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica y a su cuerpo docente, agradecemos por las herramientas, conocimientos y fundamentos técnicos impartidos a lo largo de nuestra formación, los cuales fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto y para nuestra preparación como ingenieros mecánicos.

Nuestro especial agradecimiento a nuestro director de proyecto, PhD. Manuel Del Jesús Martínez, por su orientación, acompañamiento y valiosos aportes durante la ejecución de este trabajo. Su experiencia, criterio profesional y compromiso académico fueron determinantes para el adecuado desarrollo del proyecto, reflejando no solo su excelencia como ingeniero, sino también sus cualidades humanas.

Finalmente, agradecemos a nuestros amigos, en especial a Juan Pablo Morales, por su apoyo, colaboración y disposición durante el desarrollo del proyecto, así como por facilitarnos un espacio adecuado para la etapa de construcción para la ejecución de este proyecto.

*Juan Diego Cortes Ulloa*

*Brayan José Chacón Agudelo*

**Tabla De Contenido**

Introducción .....	16
1.Planteamiento del Problema .....	17
1.1 Justificación .....	18
1.2 Alcance .....	19
2.Objetivos.....	20
2.1 Objetivo General.....	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3.Antecedentes .....	21
4.Referentes Teóricos .....	23
4.1 Turbinas Eólicas.....	23
4.2 Energía eólica.....	24
4.2.1 <i>Comportamiento de la Dirección y Velocidad del Viento en Bucaramanga</i> .....	25
4.3 Turbina Eólica Savonius .....	27
4.3.1 <i>Subsistemas</i> .....	28
4.4 Alabes .....	28
4.4.1 <i>Tipos de Alabes</i> .....	29
4.4.2 <i>Diseño de Alabes</i> .....	29
4.4.3 <i>Condiciones Óptimas de Desempeño</i> .....	31

4.5 Deflectores .....	31
4.5.1 Tipos de Deflectores Usados en Turbinas Savonius.....	32
4.5.2 Distancia Entre Deflectores y Rotor.....	32
4.6 Diseño Mecánico .....	32
4.6.1 Peso Del Rotor.....	33
4.6.2 Torque .....	33
4.6.3 Fuerza Aerodinámica por Arrastre y Fuerza Peso del Rotor.....	33
4.6.4 Esfuerzo Cortante Por Torsión.....	34
4.6.5 Momento Polar De Inercia .....	34
4.6.6 Momento Flector.....	35
4.6.7 Esfuerzo de Flexión.....	35
4.6.8 Esfuerzo de Von Mises.....	35
4.6.9 Esfuerzo Admisible.....	35
4.6.10 Resistencia a la Fatiga.....	36
4.7 Conducto Venturi.....	36
4.7.1 Requerimientos de Diseño para un Conducto Venturi. ....	37
4.8 Fluidos.....	38
4.8.1 Numero de Reynolds. ....	39
4.9 Relación de Transmisión por Cadena .....	40
4.9.1 Relación de Transmisión.....	40

4.10 ANSYS Fluent .....	41
4.10.1 <i>Dinámica de Fluidos Computacional</i> .....	41
4.10.2 <i>Modelo de Turbulencia RANS</i> .....	41
4.10.3 <i>Modelo Estándar K-Épsilon</i> .....	42
4.11 Generador de Imanes Permanentes.....	43
4.12 Controlador de Turbinas WT060.....	44
5. Metodología.....	45
5.1 Evaluación del Recurso Eólico .....	45
5.1.1 <i>Régimen de Flujo del Viento en Entornos Urbanos</i> .....	46
5.1.2 <i>Síntesis del Recurso Eólico Urbano</i> .....	48
5.1.3 <i>Viabilidad Técnica</i> .....	49
5.1.4 <i>Viabilidad Económica</i> .....	49
5.2 Definición de Parámetros de Diseño y Requerimientos del Sistema.....	50
5.2.1 <i>Requerimientos Mecánicos</i> .....	50
5.2.2 <i>Requerimientos Geométricos</i> .....	51
5.2.3 <i>Requerimientos de Material</i> .....	51
5.3 Diseño, Modelado y Simulación del Rotor.....	51
5.3.1 <i>Selección configuración del rotor y tipo de perfil</i> .....	51
5.3.2 <i>Dimensionamiento y Parámetros Geométricos del Rotor</i> .....	52
5.3.3 <i>Relación de Aspecto del Rotor (RAR)</i> .....	53

5.3.4 Definición Perfil Tipo Bach Modificado.....	53
5.3.5 Solapamiento Entre Alabes.....	54
5.3.6 Selección Material del Rotor .....	54
5.3.7 Simulaciones CAD Perfil Bach Modificado .....	55
5.3.8 Simulaciones CFD Prototipo Turbina.....	57
5.3.9 Comparación de Geometrías .....	60
5.4 Diseño, Modelado y Simulación del Eje .....	60
5.4.1 Selección de Material del Eje .....	61
5.4.2 Factores de Fatiga.....	61
5.4.3 Geometría del eje.....	62
5.4.4 Cargas Aplicadas al Eje .....	63
5.4.5 Análisis Estático del Eje .....	63
5.4.6 Cálculo de Esfuerzos Nominales .....	64
5.4.7 Concentración de Esfuerzos .....	65
5.4.8 Análisis a Fatiga .....	66
5.4.9 Verificación Estática.....	67
5.4.10 Simulaciones CAD del Eje del Rotor .....	68
5.5 Diseño, Modelado y Simulación Estructura de Soporte .....	71
5.6 Diseño, Modelado y Simulación Conductos Venturi .....	72
5.6.1 Geometría y Dimensionamiento del Conducto .....	73

5.6.2 Longitudes de Estrangulamiento .....	74
5.6.3 Caída de Presión ( $\Delta P$ ) Ecuación de Bernoulli .....	74
5.6.4 Simulación CFD Conducto Venturi .....	75
5.7 Diseño y Funcionamiento de los Deflectores .....	76
5.8 Diseño y Montaje del Sistema de Toma de Datos .....	77
6.Resultados .....	78
6.1 Resultados Teóricos de Potencia de la Turbina Eólica .....	78
6.2 Resultados Experimentales Turbina Eólica .....	80
6.3 Discusión de Resultados Experimentales .....	83
7.Criticidad y Mantenimiento Turbina Savonius .....	85
7.1 Matriz de criticidad .....	88
7.2 Modelo de mantenimiento .....	89
8.Evaluación Económica.....	91
8.1 Análisis Crítico de la Viabilidad Económico-Financiera. ....	94
8.2 Presupuesto General Del Proyecto.....	94
9.Conclusiones .....	96
10.Limitaciones.....	98
11.Recomendaciones Para Trabajos Futuros .....	99
Referencias Bibliográficas .....	100
Apéndice .....	103

### Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de aerogeneradores verticales.....	24
Figura 2. Velocidad promedio del viento a 100 metros de altura (m/s). ....	24
Figura 3. Velocidad promedio mensual, año 2020. ....	26
Figura 4. Rosa de vientos año 2020.....	26
Figura 5. Aerogenerador Savonius simple.....	27
Figura 6. Configuración de diferentes configuraciones de alabes o palas. ....	29
Figura 7. Condiciones óptimas de desempeño para las diferentes geometrías. ....	31
Figura 8. Representación gráfica partes de un conducto o tubo Venturi. ....	37
Figura 9. Formula número de Reynolds y representación de flujos. ....	39
Figura 10. Modelos RANS, ordenados de menor a mayor gasto computacional. ....	42
Figura 11. Dimensiones generador MarsRock G100.....	43
Figura 12. Especificaciones generador MarsRock G100.....	44
Figura 13. Controlador WT060.....	44
Figura 14. Velocidad media del viento en Bucaramanga. ....	45
Figura 15. Reynolds vs Velocidad.....	47
Figura 16. Diagrama perfil álabes Bach modificados.....	54
Figura 17. Simulación análisis de tensiones. ....	55
Figura 18. Simulación análisis de desplazamiento y deformaciones unitarias. ....	56
Figura 19. Simulación CFD Turbina Eólica Savonius de Etapas Múltiples.....	57
Figura 20. Simulación CFD Turbina Eólica Savonius de Una Etapa. ....	59
Figura 21. Diagramas análisis estático.....	64

Figura 22. Simulación análisis tensiones equivalentes y análisis de desplazamientos.....	68
Figura 23. Simulación análisis deformaciones unitarias y análisis factor de seguridad. ....	69
Figura 24. Simulación análisis de daño acumulado y vida total. ....	69
Figura 25. Simulación análisis de fatiga. ....	70
Figura 26. Simulación análisis tensiones y análisis de desplazamiento. ....	71
Figura 27. Simulación análisis tensión y factor de seguridad.....	72
Figura 28. Dimensiones y diseño CAD del conducto.....	74
Figura 29. Simulación CFD del conducto Venturi. ....	75
Figura 30. Circuito electrónico para la toma de datos. ....	77
Figura 31. Grafica Potencia [W] vs RPM del rotor. ....	78
Figura 32. Grafica Potencia [W] vs Torque [Nm]. ....	79
Figura 33. Grafica Potencia [W] vs Velocidad del viento [m/s].....	80
Figura 34. Grafica RPM del rotor vs Velocidad del viento. ....	81
Figura 35. Graficas de RPM del generador vs RPM del rotor.....	82
Figura 36. Grafica de Voltaje VS RPM del generador. ....	83

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Subsistemas del aerogenerador eólico Savonius. ....	28
Tabla 2. Velocidad promedio mensual y anual del aire en Bucaramanga. ....	46
Tabla 3. Datos del análisis del recurso eólico. ....	48
Tabla 4. Dimensiones del rotor de la turbina. ....	52
Tabla 5. Propiedades del material AISI 316. ....	61
Tabla 6. Factores usados para el criterio de fatiga. ....	62
Tabla 7. Geometría del eje de la turbina. ....	63
Tabla 8. Cargas aplicadas al eje de la turbina. ....	63
Tabla 9. Factores Corregidos para $d/D = 5/15,875$ mm. ....	65
Tabla 10. Dimensionamiento geométrico del conducto. ....	73
Tabla 11. Ponderados para el análisis de criticidad. ....	85
Tabla 12. Análisis de componentes críticos. ....	86
Tabla 13. Valores de consecuencia de falla (C) y criticidad. ....	87
Tabla 14. Clasificación de criticidad. ....	88
Tabla 15. Matriz de criticidad. ....	88
Tabla 16. Resultado matriz de criticidad. ....	88
Tabla 17. Modelo de mantenimiento planteado. ....	90
Tabla 18. Presupuesto de fabricación y Margen de ganancia de la turbina. ....	91
Tabla 19. Datos necesarios para la evaluación económica del proyecto. ....	92
Tabla 20. Resultados del análisis económico del proyecto. ....	93
Tabla 21. Presupuesto general del proyecto. ....	95

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Evidencias construcción del prototipo..... 103

Apéndice B. Planos CAD turbina Savonius. .... 104

## Resumen

**Título:** Diseño Y Construcción De Una Turbina Eólica Savonius De Etapas Múltiples Con Deflectores Para El Soporte De Consumo Eléctrico En Residencias De Tipo Familiar Urbanas<sup>1\*</sup>

**Autores:** Juan Diego Cortes Ulloa, Brayan José Chacón Agudelo\*\*

**Palabras clave:** Diseño mecánico, Turbina Savonius, Energía eólica, Sostenibilidad

### Descripción:

Este proyecto de grado tiene como objetivo general el diseño y la construcción de una turbina eólica Savonius de etapas múltiples con adaptación de deflectores direccionales, optimizada para operar en condiciones de viento urbano turbulento y de baja velocidad, con el fin de apoyar el suministro energético en hogares familiares. La propuesta surge ante el incremento de las tarifas eléctricas en Colombia el cual corresponde a 15.3% anual y las limitaciones que presentan las turbinas convencionales en estas condiciones. Se analizó el potencial eólico de la ciudad de Bucaramanga, se desarrolló el diseño mecánico considerando aspectos teóricos como el efecto Venturi, el número de Reynolds y el comportamiento de fluidos y se construyó un prototipo de 1m x 1.50 m, donde el sistema incluye rotor, transmisión, generador, almacenamiento y control. Además, incorpora simulaciones CAD y CFD para obtener un rendimiento óptimo, plan de mantenimiento necesario para la turbina y un análisis técnico-económico para evaluar su viabilidad.

---

\* Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Manuel Del Jesús Martínez

## Abstract

**Title:** Design and Construction of a Multi-Stage Savonius Wind Turbine with Deflectors for Electrical Consumption Support in Urban Family-Type Residences\*

**Authors:** Juan Diego Cortes Ulloa, Brayan José Chacón Agudelo\*\*

**Key words:** Mechanical design, Savonius turbine, Wind energy, Sustainability.

### Description:

The main objective of this undergraduate project is the design and construction of a multi-stage Savonius wind turbine with directional deflectors, optimized to operate under turbulent, low-speed urban wind conditions, in order to support household energy supply. This proposal arises in response to the increase in electricity tariffs in Colombia, averaging 15.3% annually, and the limitations of conventional turbines under such conditions. The wind potential of the city of Bucaramanga was analyzed, the mechanical design was developed considering theoretical aspects such as the Venturi effect, Reynolds number, and fluid behavior, and a 1 m × 1.50 m prototype was built. The system includes rotor, transmission, generator, storage, and control, and incorporates CAD and CFD simulations to achieve optimal performance, as well as a maintenance plan and a techno-economic analysis to assess its feasibility.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Manuel Del Jesús Martínez

## Introducción

El consumo de energía eléctrica en las ciudades, impulsado por el aumento poblacional, la expansión de las ciudades, la mayor adquisición de productos electrónicos y uso continuo de estos, además del desabastecimiento de productoras de energía como los embalses de las hidroeléctricas, han generado incremento en los costos de la electricidad. Estas situaciones representan un problema o desafío para muchas familias, las cuales se ven afectadas debido a los altos costos del servicio. De acuerdo con esto, el aprovechamiento de fuentes de energías renovables se plantea como una alternativa viable y sostenible como apoyo para mitigar dicha problemática.

Dicho esto, la implementación de tecnologías de generación de energía renovable en entornos urbanos se ve limitada por ciertos obstáculos como la disponibilidad de espacio y las condiciones de viento inestables generadas por las construcciones. La turbina Savonius se presenta como una opción viable debido a su diseño de eje vertical y su capacidad para operar en condiciones de viento de baja velocidad y turbulento, con bajos niveles de vibración y ruido, lo que la convierte en una solución adecuada para ser aplicada en zonas residenciales.

El presente proyecto de grado tiene como objetivo el diseño y construcción de una turbina eólica tipo Savonius de etapas múltiples con deflectores, optimizada para el uso en zonas urbanas. Este desarrollo no solo busca generar un apoyo energético a los hogares, sino también fomentar el uso de energías renovables y limpias mediante el uso de un dispositivo de fácil uso e instalación.

## 1. Planteamiento del Problema

El consumo energético en zonas urbanas ha experimentado un crecimiento significativo durante las últimas décadas. Este aumento conlleva que los precios de la energía incrementen y se vea afectada la economía familiar. Este fenómeno ocurre debido a la expansión poblacional urbana, crecimiento de las ciudades y el incremento del uso de electrodomésticos y dispositivos electrónicos de los hogares, según lo informa la Agencia internacional de Energía (IEA) <sup>2</sup>

“Entre 2021 y 2024, las tarifas eléctricas residenciales en Colombia aumentaron a un promedio anual del 15,3%, el mayor incremento en 23 años. Esta alza se debió a la indexación de precios, el impacto del Fenómeno de El Niño y otros factores que afectaron el sector energético” según un estudio realizado por Corficolombiana (2024). Este aumento representa una mayor carga para las familias, incrementado el costo de vida y resaltando la necesidad de adoptar nuevas alternativas más económicas y sostenibles para el suministro eléctrico.

La implementación de energías renovables para mitigar una parte del consumo energético de los hogares es una opción prometedora, especialmente en zonas urbanas. Sin embargo, la implementación de este tipo de energía presenta varios desafíos, como las restricciones de espacio para la instalación de sistemas de generación y la interferencia de grandes edificaciones en estas áreas, limitando considerablemente el aprovechamiento de los recursos renovables como la energía eólica y solar.

---

<sup>2</sup> IEA (2023), World Energy Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?language=es>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)

Debido a la complejidad de la implementación de sistemas de generación de energía en zonas urbanas se plantea utilizar sistemas que se adapten a las condiciones en estas zonas. En este contexto, la energía eólica es una alternativa viable, ya que aprovecha un recurso abundante y renovable. Sin embargo, las turbinas eólicas tradicionales son poco viables ya que están diseñadas para funcionar en áreas abiertas y flujos de viento constante, condiciones que no se encuentran en zonas urbanas. En contraste con las turbinas tradicionales, la turbina Savonius se presenta como una opción ideal para entornos urbanos, dado que su diseño permite su operación en condiciones de viento turbulento y baja velocidad, ofreciendo niveles bajos de ruido y vibraciones.

Teniendo en cuenta las limitaciones de operación de las turbinas tradicionales en zonas urbanas y las ventajas de las turbinas Savonius, surge la siguiente pregunta: ¿Cómo implementar un sistema de generación eólica eficiente en zonas urbanas, utilizando una turbina Savonius, que se adapte a las condiciones de viento turbulento y baja velocidad, para mitigar el impacto económico del incremento en tarifas eléctricas y contribuir a un suministro energético más sostenible? Esta pregunta es la base y la guía para el desarrollo del proyecto, cuyo objetivo es brindar un apoyo al sector energético y a los usuarios de las empresas que prestan este servicio. Con este diseño, también se busca promover el uso de energías renovables y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

## **1.1 Justificación**

La implementación de una turbina de tipo Savonius para generación de energía eléctrica en zonas urbanas presenta una alternativa innovadora y necesaria para aliviar los gastos energéticos actuales y futuros. Teniendo en cuenta el aumento en el costo de electricidad, este proyecto ofrece una solución rentable para las personas, reduciendo los costos de energía y

disminuyendo la dependencia de energía de recursos no renovables. Además, Al ser una alternativa con un diseño eficiente y requerimientos mínimos de mantenimiento, reduce los costos operativos y prologa la vida útil del sistema, lo que mejora la calidad de vida de las personas al disminuir los gastos relacionados a reparaciones.

Como parte de un proyecto enfocado al uso de las energías renovables ayuda a fomentar el cuidado del medio ambiente y funciona como guía para la transición a un sistema más sustentable en la obtención de energía eléctrica. A diferencia de los sistemas de generación que utilizan energías no renovables, la turbina Savonius es menos invasiva gracias a su diseño compacto y capacidad para operar en espacios reducidos, lo que la hace ideal para zonas urbanas. Además, su funcionamiento no requiere de cambios físicos o químicos de los recursos para el aprovechamiento de la energía, lo que elimina la generación de residuos contaminantes y contribuye al cuidado del medio ambiente.

Para las comunidades, estos proyectos contribuyen directamente a mejorar la calidad de vida, dado que la energía eléctrica es esencial para el funcionamiento de electrodomésticos, dispositivos de comunicación, sistemas de entretenimiento, fundamentales para el desarrollo de la mayoría de actividades cotidianas. Además, el desarrollo de sistemas de generación de energía renovable impulsa el crecimiento económico al generar nuevas oportunidades de empleo y promueve la innovación tecnológica, contribuyendo a un futuro más sostenible.

## **1.2 Alcance**

El presente proyecto contempla el diseño, construcción y evaluación de una turbina eólica Savonius de etapas múltiples, optimizada para operar en condiciones de viento urbano de baja velocidad en Bucaramanga, Santander, con el fin de apoyar al suministro energético de la vivienda para lograr una reducción en el consumo eléctrico.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Desarrollar una turbina eólica Savonius de etapas múltiples con incorporación de deflectores para el apoyo energético en residencias familiares urbanas, optimizando su eficiencia energética y capacidad de aprovechamiento del recurso eólico, promoviendo soluciones sostenibles y de bajo impacto ambiental.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Evaluar el potencial eólico de la ciudad de Bucaramanga mediante la recopilación y análisis de datos, con el fin de determinar la viabilidad técnica y económica para la instalación de un sistema de generación de energía eólica.

Diseñar un sistema generador de energía eléctrica a partir de una turbina eólica Savonius de etapas con deflectores en un rango de dimensiones aproximadas de 1m – 1.50 m de altura x 1m de diámetro, orientado a residencias de tipo familiar.

Construir el sistema de generación de energía eólica (turbina Savonius) para evaluar el diseño y correcto funcionamiento de la turbina en diferentes condiciones de operación.

Evaluar la viabilidad económico-financiera del proyecto mediante el análisis de indicadores clave como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación de inversión (PayBack), considerando los costos de desarrollo, operación, mantenimiento y posibles retornos de inversión.

### 3 Antecedentes

“Effects of endplate designs on the performance of Savonius vertical axis wind turbine. Energy” (Wang, et al., 2024) analizan los efectos de diferentes diseños de placas de extremo (endplates) en el rendimiento de una turbina eólica de eje vertical Savonius. Proporciona la mejor configuración de los endplates donde se obtienen los mejores rendimientos, además también a partir de las simulaciones CFD realizadas en este estudio se evidencian las características del flujo sobre los endplates, incluyendo las líneas de corriente y campos de presión. La información suministrada funciona como base para la elección de endplates para la turbina Savonius y ya que proporciona información sobre el arrastre parasito aerodinámico permite conocer los puntos donde es recomendable colocar difusores para reducir esta resistencia y mejorar el rendimiento de la turbina.

“Effect of the Phase-Shift Angle on the vertical axis Savonius wind turbine performance as a renewable-energy harvesting instrument. Energy Reports” (Prabowoputra y Prabowo.2022) investiga cómo el ángulo de desfase (Phase-Shift Angle o PSA) entre las etapas de un rotor Savonius de dos etapas afecta su capacidad para convertir la energía del viento en energía mecánica, utilizando simulaciones CFD y análisis estadístico para identificar la configuración geométrica que ofrece el mejor rendimiento. Aunque el artículo se enfoca en una turbina Savonius de dos etapas, los principios y conclusiones sobre la importancia del ángulo de desfase (PSA) y su interacción con la relación de velocidad de punta (TSR) son aplicables para la construcción de una turbina Savonius de más etapas.

“Advances in urban wind resource development and wind energy harvesters. Renewable and Sustainable Energy Reviews” (Liu, et al., 2025) presentan los avances en el desarrollo de los

recursos eólicos urbanos, analizando el comportamiento turbulento del viento en zonas urbanas y como la configuración de los edificios genera diferentes efectos que afectan la dirección y comportamiento del viento. La información presentada es útil para comprender las condiciones de operación para una turbina en zonas urbanas, destacando las características del flujo en tres escenarios: a) cuando el viento fluye por el lateral del edificio, b) cuando el edificio es alto y la dirección del viento está directamente frente a él y c) cuando el edificio es bajo y el viento incide de frente. Esta información permite optimizar la ubicación de la turbina, mejorar y diseñarla de manera que aproveche mejor las condiciones del entorno.

## 4 Referentes Teóricos

El aprovechamiento de la energía eólica se ha posicionado como una alternativa sostenible en la generación de energía eléctrica gracias a su bajo impacto ambiental y su aporte a la reducción de emisiones contaminantes. Dentro de los diversos tipos de dispositivos y tecnologías de captación de energía proveniente del viento, las turbinas de eje vertical han sobresalido debido a sus aplicaciones en zonas urbanas por su diseño estructural, facilidad de mantenimiento y buen desempeño en condiciones de viento bajos y turbulentos.

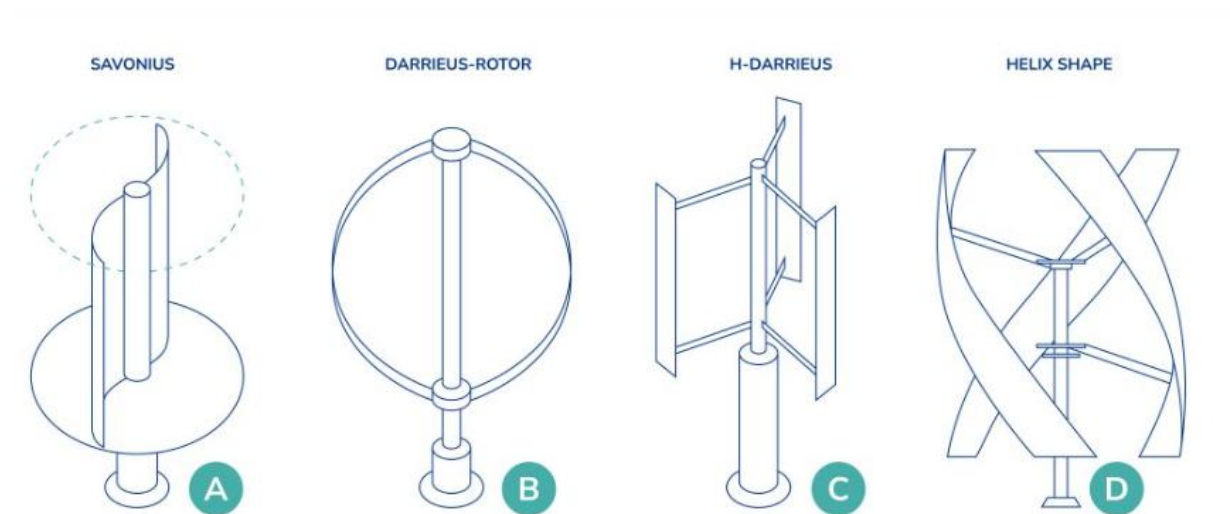
El presente marco teórico aborda los fundamentos de la energía eólica y su disponibilidad, características generales de las turbinas de eje vertical y aspectos relacionados con el diseño, operación y eficiencia de una turbina tipo Savonius como alternativa viable para el apoyo energético en entornos residenciales.

### 4.1 Turbinas Eólicas

Las turbinas eólicas se han desarrollado en una amplia variedad de configuraciones, pueden clasificarse en diferentes tipos, principalmente según el principio aerodinámico de funcionamiento y la orientación de su eje de rotación, en dos tipos: Las turbinas de eje horizontal (HAWT), caracterizadas por su alto rendimiento y capacidad de generación, y de eje vertical (VAWT) destacan en aplicaciones urbanas y residenciales debido a su simplicidad estructural, fácil mantenibilidad y capacidad de operación en entornos turbulentos y de baja velocidad. Dentro de este grupo se encuentran los modelos Savonius, que aprovechan el principio de arrastre y se caracterizan por su diseño robusto y económico, y los modelos Darrieus, basados en el principio de sustentación, que alcanzan mayores velocidades de rotación y una mayor eficiencia.

**Figura 1**

*Tipos de aerogeneradores verticales.*



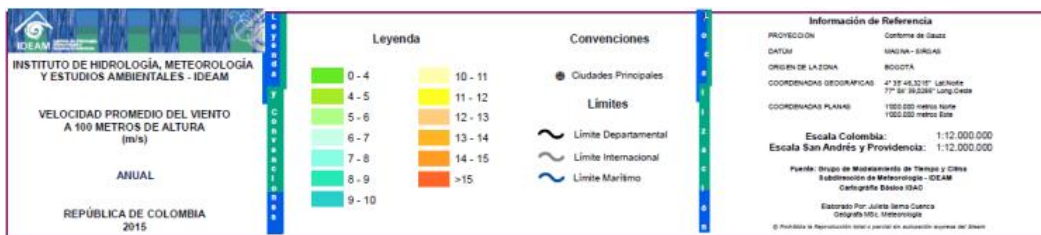
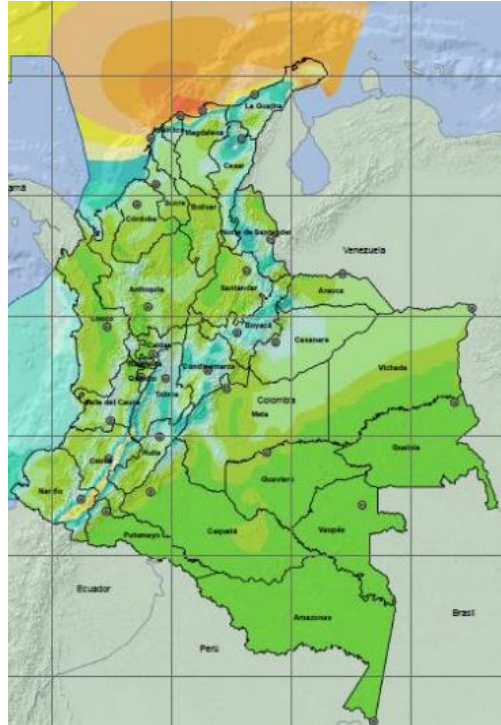
*Nota.* Imagen tomada de Lumify Energy (2024). Diferentes tipos de aerogeneradores que debes conocer. <https://lumifyenergy.com/blog/different-types-of-wind-turbines/>.

**4.2 Energía eólica**

La energía eólica es aquella que se genera aprovechando la potencia del viento mediante turbinas eólicas, las cuales convierten el movimiento de rotación producto del flujo de aire en energía eléctrica. Este proceso se realiza gracias al rotor, generador y demás componentes del sistema necesarios para la el aprovechamiento de este recurso renovable, eficiente y confiable, esencial para el progreso de la transición energética y la reducción de las emisiones de carbono.

**Figura 2**

*Velocidad promedio del viento a 100 metros de altura (m/s).*



*Nota.* Imagen tomada de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

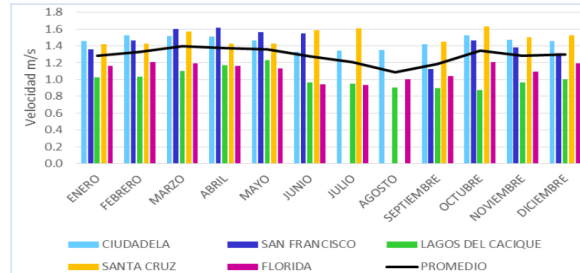
#### 4.2.1 Comportamiento de la Dirección y Velocidad del Viento en Bucaramanga

- *Comportamiento de la Velocidad del Viento*

En 2020, La velocidad media del viento mensual en la ciudad se registró en un rango de 0.9 y 1.6 m/s. A partir de la gráfica, se puede determinar la velocidad promedio no presenta variaciones considerables a lo largo del año, con picos máximos en marzo, abril y mayo con velocidades de hasta 1.4 m/s.

**Figura 3**

*Velocidad promedio mensual, año 2020.*



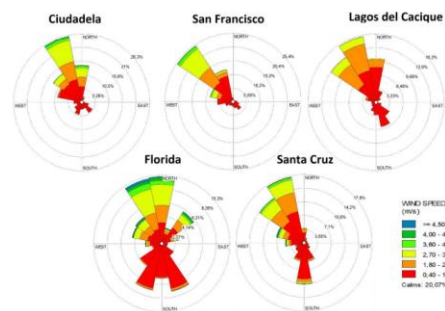
*Nota.* Imagen tomada de Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB).

- **Comportamiento de la Dirección del Viento**

La rosa de los vientos muestra la procedencia de flujo de viento, pero no su destino. A partir de la representación gráfica se analiza la frecuencia de direcciones de origen junto con su intensidad y magnitud, es decir la velocidad.

**Figura 4**

*Rosa de vientos año 2020.*



*Nota.* Imagen tomada de Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB).

Según la gráfica, se puede observar que predominan las direcciones de viento de baja intensidad, particularmente entre 0.4 y 1.8 m/s representadas en la gráfica en color rojo, los cuales llegan desde todos los cuadrantes y constituyen cerca del 50% de los registros. Los vientos más intensos, superiores a 1.8 m/s, se originan principalmente del norte y noroeste abarcando aproximadamente el 30% del total de los registros.

### 4.3 Turbina Eólica Savonius

La turbina Savonius es una turbina de eje vertical que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica. La turbina está compuesta por dos o más palas semicirculares, donde el lado cóncavo entra en contacto con el viento, generando una fuerza de empuje que permite el movimiento rotacional ((Dewan et al., 2023). La energía mecánica producida se transmite a un generador eléctrico mediante el eje de la turbina, donde se convierte en energía eléctrica mediante el principio de inducción electromagnética.

#### Figura 5

*Aerogenerador Savonius simple.*



*Nota.* Imagen tomada de brotolero. (2022, August 7). test de aerogenerador vertical Savonius tripala en vientos de hasta 20k/h. [Video]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=r938XAA4xto>

### 4.3.1 Subsistemas

**Tabla 1**

*Subsistemas del aerogenerador eólico Savonius.*

Subsistema	Definición	Componentes Clave	Parametros a controlar
<i>Captación de energía (rotor)</i>	Encargado de aprovechar la energía proveniente del viento mediante dos o más palas y convertirla en energía mecánica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Palas de la turbina.</li> <li>• Eje de transmisión.</li> <li>• Deflectores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia aerodinámica de las palas.</li> <li>• Dirección del impacto del viento en las palas de la turbina</li> </ul>
<i>Transmisión de potencia</i>	Encargado de transmitir la energía mecánica generada por la turbina al generador eléctrico, a veces puede ser directamente del eje de la turbina al generador o mediante transmisiones de potencia mecánica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eje de transmisión.</li> <li>• Engranajes con multiplicadores.</li> <li>• Rodamientos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación de transmisión.</li> <li>• Perdidas por fricción.</li> <li>• Alineación del sistema y lubricación de los componentes.</li> </ul>
<i>Conversión de energía (Generador eléctrico)</i>	Se encarga de convertir la energía mecánica proveniente de la turbina en energía eléctrica mediante un generador eléctrico, utilizando el principio inducción electromagnética.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generador eléctrico.</li> <li>• Rectificador.</li> <li>• Regulador de voltaje.</li> <li>• Baterías.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad máxima de energía eléctrica almacenada.</li> <li>• Capacidad de energía eléctrica producida.</li> </ul>
<i>Control y regulación</i>	Este sistema permite supervisar y optimizar el funcionamiento de la turbina, lo que permite mantener la integridad del sistema y maximizar la eficiencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controlador de carga.</li> <li>• Sensores de velocidad del viento.</li> <li>• Sistema de protección.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveles de carga del sistema.</li> <li>• Funcionamiento del sistema en caso de viento excesivo o daño del sistema.</li> </ul>
<i>Soporte y anclaje</i>	Este sistema asegura la estabilidad estructural y protege al sistema de fuerzas externas, además de permitir el anclaje en la superficie donde se instale la turbina.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Base de soporte.</li> <li>• Sistema de anclaje.</li> <li>• Compartimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibraciones del equipo</li> <li>• Ubicación de instalación del equipo.</li> </ul>

*Nota.* Elaborada en el software Excel a partir de información recopilada sobre turbinas eólicas.

## 4.4 Alabes

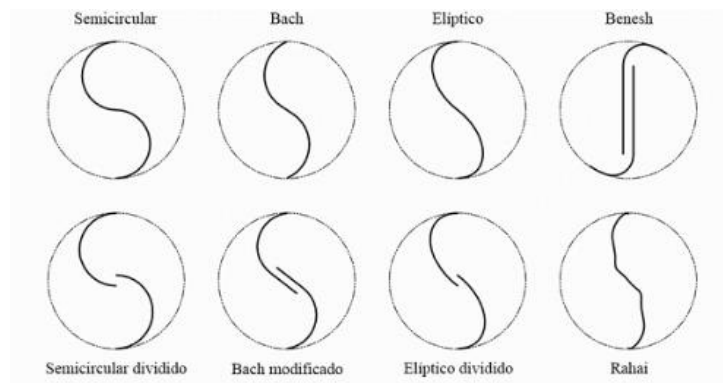
Los álabes o palas de una turbina eólica son superficies aerodinámicas curvas que capturan la energía cinética del viento, convirtiéndola en energía mecánica de rotación, similar al ala de un avión, al generar fuerzas de sustentación y resistencia que hacen girar el rotor conectado a un generador para producir electricidad. Son el componente clave para transformar el viento en movimiento rotatorio y se diseñan con perfiles específicos para optimizar la captura de energía y su eficiencia.

#### 4.4.1 Tipos de Alabes

En el diseño de turbinas eólicas de tipo Savonius, se pueden encontrar variaciones en los álabes según el tipo de aplicación, velocidad característica del viento y operación. De acuerdo con cada configuración la forma de los álabes es variable al igual que el número o cantidad de estos, además de variar su principio aerodinámico de funcionamiento permitiendo así el aprovechamiento energético en diferentes situaciones.

#### Figura 6

*Configuración de diferentes configuraciones de alabes o palas.*



*Nota.* Imagen tomada de Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabes de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad por (Gallo et al., 2022).

#### 4.4.2 Diseño de Alabes

- *Coefficiente de torque (CT)*

Se entiende como la relación entre el torque generado por el rotor y el torque posible de generación en condiciones de operación.

Ecuación correspondiente al coeficiente de torque.

$$C_T = \frac{\text{Torque}}{0.25 * \rho * V^2 * D * A_P * N_{\text{Etapas}}} \quad (1)$$

- ***Coficiente de Potencia (CP)***

Se entiende como a relación entre la potencia generada y el flujo energético trasladado por el fluido

Ecuación correspondiente al coeficiente de torque.

$$C_P = \frac{\text{Pot}_{\text{Turbina}}}{0.5 * \rho * V^3 * A_P * N_{\text{Etapas}}} \quad C_P = C_T * TSR \quad (2)$$

- ***Límite de Betz***

El límite de Betz establece un límite superior teórico para la producción de energía por turbinas, expresado como un coeficiente de potencia máximo de 16/27. Este límite surge debido a que el aerogenerador requiere un flujo de viento continuo para la operación; si se intercepta completamente el fluido para la extracción de energía, el rotor no recibe un flujo de masa considerable, lo que paraliza el rotor y detiene la producción eléctrica.

$$C_{P_{\text{max}}} = \frac{16}{27} \approx 0.5926$$

- ***Top Speed Ratio (TSR)***

La relación de velocidad de punta (TSR) de una turbina eólica es la velocidad lineal de la punta de la pala, normalizada por la velocidad del viento entrante. Para un perfil de pala determinado, existe una TSR que maximiza la eficiencia de la turbina.

$$TSR = \frac{wD}{2v} \quad (3)$$

- ***Eficiencia de una Turbina Eólica***

La eficiencia de una turbina eólica se define como la relación entre el CP y el valor teórico máximo establecido por dicho límite.

$$\eta = \frac{27}{16} * C_P * 100\% \quad (4)$$

#### 4.4.3 Condiciones Óptimas de Desempeño.

##### Figura 7

*Condiciones óptimas de desempeño para las diferentes geometrías.*

Geometría	$TSR$	$C_T$	$C_P$	$\eta$
Semicircular	0,789	0,363	0,287	48,4 %
Semicircular dividido	1,057	0,308	0,326	54,9 %
Bach	0,841	0,359	0,302	51,0 %
Bach modificado	1,198	0,330	0,395	66,6 %
Elíptico	0,858	0,391	0,335	56,6 %
Elíptico dividido	1,200	0,291	0,349	58,9 %
Benesh	0,840	0,377	0,316	53,4 %
Rahai	0,737	0,335	0,247	41,7 %

*Nota.* Imagen tomada de Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad por Gallo et al. (2022).

Los parámetros recopilados facilitan una evaluación objetiva del rendimiento entre distintas geometrías. Las configuraciones con perfil segmentado logran un mayor desempeño a altas velocidades, esto pone en evidencia un  $C_p$  máximo elevado. Los diseños Bach y elíptico dividido destacan por tener una eficiencia mayor, alcanzada en regímenes con TSR superior a 1.

#### 4.5 Deflectores

En las turbinas eólicas los deflectores son dispositivos externos que se ubican alrededor de los alabes con la función de redirigir o guiar el flujo de aire hacia las palas de trabajo

reduciendo así el viento que incide sobre las palas de retorno, lo que mejora el desempeño aerodinámico, reduce las pérdidas por resistencia e incrementa el par de arranque de la turbina en condiciones de viento turbulento y de baja velocidad.

#### ***4.5.1 Tipos de Deflectores Usados en Turbinas Savonius***

Los deflectores presentes en las turbinas Savonius se pueden identificar mediante el diseño de sus geometrías. Los deflectores planos cumplen la función de bloquear el viento en la pala de retorno dirigiéndolo a la pala principal de forma simple y fácil. Los de tipo curvo se encargan de guiar el flujo con menor pérdida debido a la separación de flujo evitando turbulencias mayores y mejorando la eficiencia. Los canalizados con centran el viento en la zona activa elevando el coeficiente de potencia, aumentando la complejidad y el costo.

#### ***4.5.2 Distancia Entre Deflectores y Rotor***

La distancia óptima entre los deflectores y el rotor de la turbina sirve para canalizar de manera correcta el aire que se direcciona hacia la pala motriz evitando turbulencias en la pala de retorno. Una distancia no adecuada puede ocasionar bloqueos en el flujo y pérdidas de par.

$$D_{Deflector} = D + (0.0255 * D) \quad (5)$$

### **4.6 Diseño Mecánico**

El diseño mecánico constituye la etapa de creación previa a la fabricación de un componente o equipo, considerando factores clave como la selección de materiales, especificaciones dimensionales y cumplimiento de su función. En el caso de este proyecto, el diseño mecánico es fundamental para el diseño de estructuras, soportes, rotor y eje de la turbina Savonius. Realizar un diseño correcto garantiza la transmisión eficiente del movimiento y seguridad en el sistema de funcionamiento de la turbina.

#### 4.6.1 *Peso Del Rotor*

El peso del rotor en una turbina Savonius es un factor importante tanto para la resistencia estructural del sistema como para el diseño aerodinámico de esta. Si este excede el peso establecido, se incrementa el momento de inercia, lo que causa dificultades en el arranque en condiciones de viento reducido y genera mayores esfuerzos sobre el eje, acoples, rodamientos y soportes. Por el contrario, si el rotor es bastante ligero puede presentar problemas de vibraciones, deformaciones y rigidez, lo que afecta el diseño y operación.

$$Peso_{alabe} = gramaje * Tela_{Total} \quad (6)$$

$$Peso_{Base} = Vol_{Base} * \rho_{Base} \quad (7)$$

$$Peso_{Rotor} = Peso_{Alabes} + Peso_{Bases} \quad (8)$$

#### 4.6.2 *Torque*

El torque o momento de fuerza, representa la magnitud física que mide la capacidad de una fuerza para producir rotación en un objeto respecto a su eje o punto de soporte. Este parámetro es relevante para las turbinas Savonius, ya que debido a sus características en comparación con otros rotores de eje vertical la generación de un par de arranque es mayor.

$$T = \frac{Potencia}{\omega} \quad (9)$$

#### 4.6.3 *Fuerza Aerodinámica por Arrastre y Fuerza Peso del Rotor*

La fuerza de arrastre es una fuerza resistiva que experimenta un objeto al moverse a través de un fluido, como el aire o el agua. Esta fuerza siempre se dirige en sentido opuesto al movimiento del objeto, similar a la fricción, pero se produce entre un fluido y un sólido, en lugar de entre dos superficies sólidas.

$$F_r = \frac{1}{2} * C_d * \rho * A * V^2 * 3 \quad (10)$$

La fuerza correspondiente al peso del rotor es la carga generada por la acción de la gravedad sobre la masa total de rotor, influyendo directamente sobre los elementos de soporte y el eje del motor.

$$F_a = \frac{Peso_{Rotor}}{1000} * g \quad (11)$$

#### ***4.6.4 Esfuerzo Cortante Por Torsión***

La torsión, también denominada par de torsión o momento torsor, describe la acción excéntrica sobre un elemento estructural que busca deformarlo por giro o rotación. Al aplicar este par, se introduce un esfuerzo cortante el cual provoca una deflexión torsional, generando un ángulo de giro relativo entre los extremos del elemento.

$$\tau = \frac{T*r}{J} \quad \tau = \frac{16*T}{\pi*d^3} \quad (12)$$

#### ***4.6.5 Momento Polar De Inercia***

El momento polar de inercia de un objeto es su capacidad para resistir la deflexión debida a un par aplicado. Se basa principalmente en la sección transversal del objeto a lo largo del eje al que se aplica el par. Cabe destacar que el par es una fuerza de torsión, y la torsión es la torsión que surge del par aplicado. El momento polar de inercia depende completamente del área de la sección transversal del objeto que se tuerce y no del tipo de material.

$$J = \frac{\pi*d^4}{32} \quad (13)$$

#### 4.6.6 Momento Flector

Un momento flector se entiende como el producto de una fuerza por su longitud de aplicación. Este efecto surge cuando una carga actúa a una distancia específica desde un punto de soporte o referencia, provocando así la deformación por flexión.

$$M = F * L \quad (14)$$

#### 4.6.7 Esfuerzo de Flexión

El esfuerzo de flexión se genera al aplicar pares de fuerzas perpendiculares al eje longitudinal de un elemento, de modo que se genere la rotación de las secciones transversales contiguas.

$$\sigma = \frac{32 * M}{\pi * d^3} \quad (15)$$

#### 4.6.8 Esfuerzo de Von Mises

La tensión de Von Mises sirve para predecir si un material experimentará deformación plástica o ruptura bajo la influencia de cargas combinadas. Este criterio resulta especialmente útil en materiales dúctiles como los metales, donde se considera que la falla ocurre cuando la tensión supera el límite elástico determinado.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma^2 + 3 * \tau^2} \quad (16)$$

#### 4.6.9 Esfuerzo Admisible

El esfuerzo admisible representa el nivel máximo de carga que un componente o elemento puede soportar de manera segura.

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{Fluencia}}{Factor\ de\ seguridad} \quad (17)$$

El factor de seguridad FS se define como la relación entre la carga máxima teórica que puede soportar un componente hasta su falla y la carga admisible determinada experimentalmente.

$$FS = \frac{P_{falla}}{P_{permisible}} \quad (18)$$

#### **4.6.10 Resistencia a la Fatiga**

La resistencia a la fatiga de un material mide la capacidad para soportar cargas cíclicas repetidas. Se entiende como el nivel de esfuerzo que el material puede resistir durante un número determinado de ciclos.

$$Se' = 0.5 * \sigma_{Ultima} \quad (19)$$

$$Se = Se' * K * Kb * Kc * Kd * Ke * Kf \quad (20)$$

#### **4.7 Conducto Venturi**

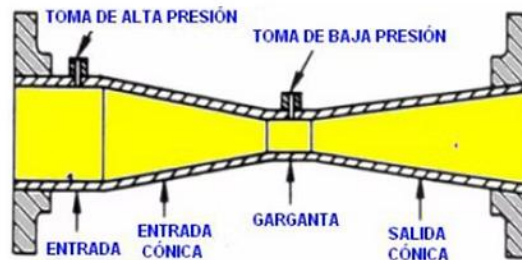
Un tubo Venturi es una tubería corta con una superficie interior estrecha y restringida. Se utiliza habitualmente para calcular caudales de fluidos y como bomba funcional. Este principio establece que, dentro de un campo de flujo específico, se produce una disminución de la presión al aumentar la velocidad. La diferencia de presión descrita por el efecto Venturi se utiliza en numerosos dispositivos.

El efecto Venturi se produce cuando un fluido, como un gas o un líquido, fluye a través de una sección estrecha de una tubería o tubo. Al pasar por una sección estrecha, su velocidad aumenta, mientras que la presión disminuye. Esto se debe a que las moléculas del fluido deben pasar a través de un espacio más pequeño, lo que aumenta su velocidad. Según el principio de conservación de la energía, la energía total del fluido debe permanecer constante. Por lo tanto, a

medida que aumenta la velocidad del fluido, su presión disminuye para compensar el cambio de energía.

### Figura 8

*Representación gráfica partes de un conducto o tubo Venturi.*



*Nota.* Imagen tomada de *Tubo Venturi facultad-ingeniería*. (2016).

<https://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-flujo-2>

#### 4.7.1 Requerimientos de Diseño para un Conducto Venturi.

- **Presión Dinámica Disponible**

La presión dinámica disponible constituye un principio fundamental de la mecánica de fluidos, la cual describe la presión generada por un fluido en movimiento asociada a su velocidad. Esta presión considera el efecto de desplazamiento del fluido, es decir que si el fluido posee velocidad la energía cinética de este se manifiesta como presión adicional.

#### **Ecuación presión dinámica disponible:**

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho * V^2 \quad (21)$$

A medida que aumenta la velocidad del fluido, la presión dinámica se incrementa de forma proporcional al cuadrado de dicha velocidad. Esta se puede expresar mediante la ecuación de Bernoulli, que vincula las presiones en el flujo de un fluido

**Relación entre la Presión dinámica y la Velocidad:**

$$Pd = \frac{1}{2} * \rho * (V_2^2 - V_1^2) \quad (22)$$

- ***Teorema de Bernoulli***

El principio de Bernoulli describe la conservación de energía en fluidos ideales durante el flujo estacionario o aerodinámico, este sirve como base de múltiples aplicaciones ingenieriles. Según Daniel Bernoulli, establece que la energía mecánica total del fluido en movimiento, la suma de su presión, la energía potencia gravitatoria y cinética, se mantiene constante.

Este teorema implica que, si el fluido fluye horizontalmente sin ningún cambio o variación de altura, un incremento en la velocidad provoca la disminución de presión, Dicho esto, en tuberías de sección variable, las zonas más estrechas aceleran el flujo y reducen la presión.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (23)$$

## **4.8 Fluidos**

Los fluidos pueden ser líquidos o gases y se caracterizan por sus propiedades físicas, como densidad, peso específico, gravedad específica, tensión superficial y viscosidad. (Mott & Untener, 2015)

Los fluidos son cuerpos deformables que no cuentan con elasticidad ni rigidez y que fluyen bajo cualquier tensión aplicada, por lo que son capaces de adoptar la forma del contenedor

que los alberga. Pueden presentarse en fase líquida o gaseosa según el grado de cohesión molecular de las partículas.

#### 4.8.1 Número de Reynolds.

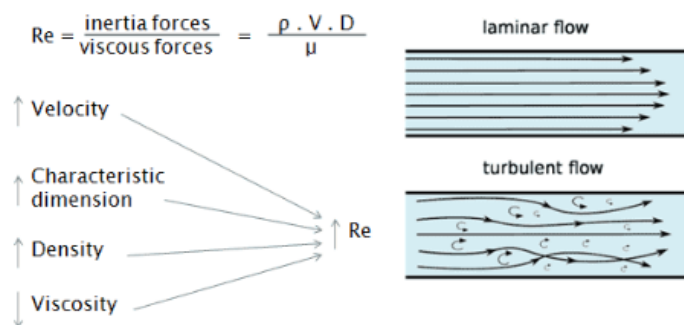
En ingeniería el estudio de los fluidos y su forma de fluir es fundamental para entender el comportamiento de estos en distintas situaciones.

El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas dentro de un fluido. Es una cantidad adimensional que ayuda a determinar si un flujo será laminar o turbulento para una configuración dada. El número crítico de Reynolds no tiene un valor fijo, sino que depende de factores como la suavidad de las superficies límite y la geometría del flujo.

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (24)$$

### Figura 9

Formula número de Reynolds y representación de flujos.



*Nota.* Imagen tomada de ¿Qué es el flujo laminar? flujo viscoso: definición, thermal engineering, Connor. N, (2020).

- Flujo laminar.

Hace referencia a los flujos en los que no hay mezcla entre las diferentes capas de fluido (láminas). Los flujos laminares se producen cuando las fuerzas viscosas son mayores que las fuerzas inerciales. Sin embargo, la mayoría de los flujos naturales de interés para la ingeniería experimentan una transición a turbulencia.

- Flujo turbulento.

Las capas de fluido se mezclan, lo que genera tensiones que forman elementos giratorios (recirculación y remolinos). El flujo turbulento se observa cuando las fuerzas de inercia son mayores que las fuerzas viscosas.

#### **4.9 Relación de Transmisión por Cadena**

La transmisión por cadena es un sistema que transfiere energía mecánica de un componente a otro mediante una cadena de eslabones. Es muy común en máquinas y vehículos y su funcionamiento se basa en la interacción entre una cadena y 2 o más engranajes dentados. De la misma manera una transmisión por cadena consta de una o varias cadenas también llamadas etapas, las cuales operan de acuerdo a lo requerido como aumento de torque y aumento o disminución de la velocidad de giro de entrada respecto al de salida. En este proyecto, la transmisión por cadena permite adaptar la velocidad de giro del rotor a las necesidades de funcionamiento del generador.

##### ***4.9.1 Relación de Transmisión***

La relación de transmisión en este sistema indica el factor de incremento o reducción de la velocidad de giro entre el elemento motriz o de conducción y el elemento conducido. En una

turbina eólica Savonius, la relación de transmisión cumple la función de adaptar la baja velocidad del rotor a una mayor requerida por el generador eléctrico.

$$i = \frac{n_{Salida}}{n_{Entrada}} = \frac{Z_{Conductor}}{Z_{Conducido}} \quad (25)$$

#### **4.10 ANSYS Fluent**

La herramienta ANSYS Fluent en la dinámica de fluidos computacional (CFD) es ampliamente utilizada para la simulación de fenómenos relacionados directamente con el flujo de fluidos y la transferencia de calor en geometrías de baja y alta complejidad. Esta herramienta se destaca por integrar en un solo entorno las etapas del análisis CFD, que incluyen el preprocesamiento, simulación y post-procesamiento. Fluent permite generar modelos, mallados, ejecución de simulaciones y análisis sin requerir del uso de aplicaciones adicionales.

##### ***4.10.1 Dinámica de Fluidos Computacional***

La dinámica de fluidos computacional, o CFD por sus siglas en inglés (Computational Fluid Dynamics), es la rama de la física que trata sobre la simulación numérica de todo lo que tiene que ver con flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados, como la combustión utilizando algoritmos y métodos numéricos aplicados a los tres principios de los fluidos: ley de conservación de masa, ley fundamental de la dinámica, y ley de la conservación de la energía (Blog ESSS, s.f.)

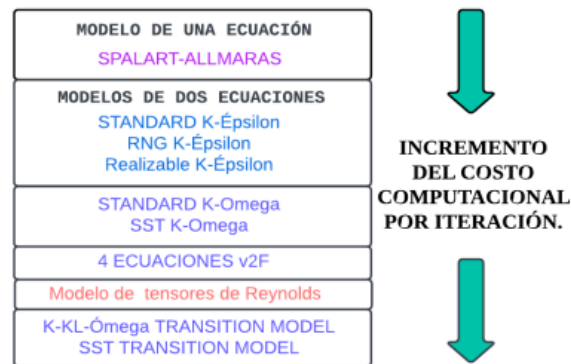
##### ***4.10.2 Modelo de Turbulencia RANS***

El enfoque RANS o (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) se basa en el promediado de las ecuaciones de Navier-Stokes, lo que permite representar el comportamiento medio del flujo sin resolver de manera directa las variaciones o fluctuaciones de turbulencia. Este modelo es el de menor exigencia computacional o de gasto de recursos, dicha razón lo hace ampliamente

empleado en aplicaciones industriales. Las variables de flujo se expresan en términos de valores medios ya que las propiedades dependen principalmente de las condiciones de frontera. Debido al promediado, las ecuaciones obtenidas requieren del uso de otros modelos de turbulencias para obtener la solución.

### Figura 10

*Modelos RANS, ordenados de menor a mayor gasto computacional.*



*Nota:* Tomado de *SIMULACIÓN DE UNA TURBINA SAVONIUS EN AGUA*. (n.d.). Retrieved January 13, 2026, from <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/0d868cb5-dc6a-47cf-8d24-c098ee5d5d27/content>

#### 4.10.3 Modelo Estándar K-Épsilon

El modelo K-épsilon destaca como uno de los modelos más utilizados para la simulación de turbulencias, pese a las limitaciones en escenarios con grandes gradientes de presión. Este modelo maneja dos ecuaciones de transporte complementarias que modelan las características turbulentas del flujo. Esto permite tener en cuenta efectos históricos como la convección y la difusión de la energía turbulenta.

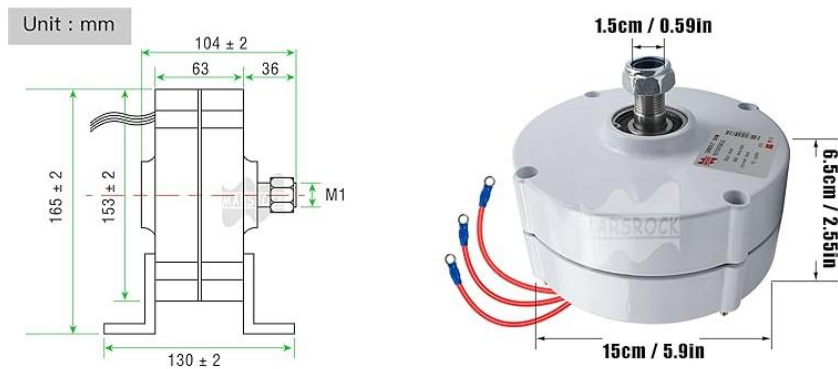
#### 4.11 Generador de Imanes Permanentes

Un generador de imanes permanentes es un dispositivo encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica todo esto mediante un campo magnético generado por imanes, sin necesidad de corriente externa. Estos dispositivos se caracterizan por su alta eficiencia, diseño compacto y buen desempeño a bajas velocidades.

El MarsRock G100W12V es un generador alternador de CA de imán permanente de 100 W, diseñado para diversas aplicaciones, incluyendo turbinas eólicas verticales u horizontales. Presenta un diseño robusto con bobinado de cobre puro de alta calidad e imanes permanentes de NdFeB para una generación de energía estable y eficiente.

#### Figura 11

*Dimensiones generador MarsRock G100.*



*Nota:* Imagen tomada de MarsRock de <https://es.marsrock.com.cn>

**Figura 12**

*Especificaciones generador MarsRock G100.*

Potencia nominal	100 W
Voltaje nominal	12 V/24 V (CA)
Velocidad rotada nominal	750 RPM
Par de arranque	0.12N*M
Clase de aislamiento	F
Vida de diseño	20 años
Impermeable	IP54
Lubricación	Grasa
Operación	-40.0 °F--176.0 °F
Rodamiento	Resistencia al calor, las heladas y la abrasión Marca HRB
Generador con peso base	3.5KGS/1 eje, 3.6KGS/2 ejes
Material	Eje de acero inoxidable, aleación de aluminio de cáscara
Tamaño del paquete	8.3 in x 8.3 in x 5.9 in

*Nota:* Imagen tomada de MarsRock de <https://es.marsrock.com.cn/>

**4.12 Controlador de Turbinas WT060**

Dispositivo encargado de gestionar y optimizar el funcionamiento de la turbina eólica y su sistema de generación. Entre sus funciones la principal es regular la energía producida por el generador, brindando protección a la batería y componentes eléctricos de sobrecargas, controlando el voltaje de salida y maximizando la eficiencia de generación.

**Figura 13**

*Controlador WT060.*



*Nota:* Imagen tomada de MarsRock de [https://es.marsrock.com.cn](https://es.marsrock.com.cn/)

## 5 Metodología

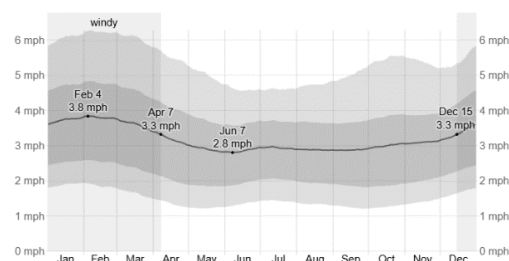
La presente metodología describe de manera estructurada el procedimiento para el desarrollo del proyecto, desde la evaluación del recurso de la ciudad hasta la validación técnica y económica del sistema. Este proyecto corresponde a una investigación de tipo aplicada, orientada al diseño, construcción y evaluación de un prototipo funcional de la turbina eólica Savonius propuesta. Para ello, se estableció un enfoque cuantitativo y diseño metodológico de carácter experimental y desarrollo tecnológico.

### 5.1 Evaluación del Recurso Eólico

Para evaluar el potencial eólico de la ciudad de Bucaramanga y la viabilidad técnica de instalar un sistema de generación eólica, se recopilaron y analizaron datos meteorológicos relacionados con la velocidad del viento disponibles de fuentes públicas y estudios regionales previos realizados por organizaciones como la CDMB. Este análisis se enfoca en determinar si las condiciones locales admiten la implementación de un sistema de generación eólica de menor tamaño, en comparación con los otros sistemas del mercado

#### Figura 14

*Velocidad media del viento en Bucaramanga.*



*Nota:* Imagen tomada de WeatherSpark.com

**Tabla 2**

*Velocidad promedio mensual y anual del aire en Bucaramanga.*

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic	
Vel. viento [mph]	3,7	3,8	3,6	3,3	3,5	2,8	3,7	3,6	3,8	3,0	3,2	3,5	
Vel. viento [m/s]	1,7	1,7	1,6	1,5	1,6	1,3	1,7	1,6	1,7	1,7	1,4	1,6	1,6

De acuerdo con los datos recopilados de registros climáticos se identifica que la velocidad media del viento en Bucaramanga se encuentra en el rango de 1.3 m/s y 1.7 m/s y se selecciona el valor promedio de 1.6 m/s para el desarrollo del prototipo de turbina Savonius. Además, se logra observar valores de velocidad ligeramente superiores durante los primeros meses del año.

Con el fin de verificar la consistencia de la información obtenida sobre la velocidad media y el potencial eólico de la ciudad de Bucaramanga, se contrastan los resultados seleccionados con los reportados en el estudio realizado por Vergara-Barrios et al. (2014), el cual presenta una caracterización del recurso eólico en el campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga. La comparación permitió evidenciar que los valores de velocidad media presentados en dicho estudio, muestran tendencias coherentes con las obtenidas para este proyecto, esto corrobora la veracidad de la información utilizada para el diseño y funcionamiento de la turbina.

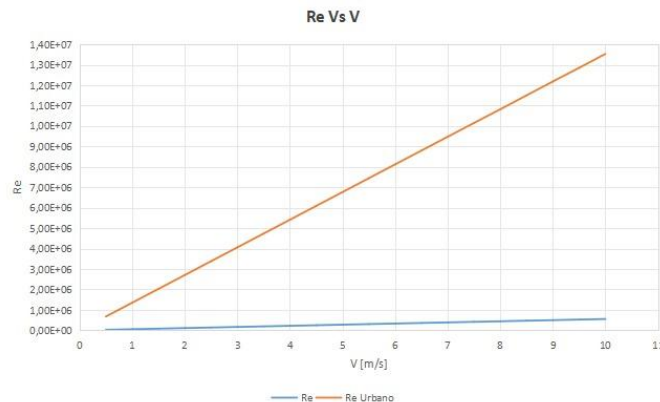
### ***5.1.1 Régimen de Flujo del Viento en Entornos Urbanos***

Con el fin de caracterizar el régimen de flujo asociado al recurso eólico urbano y su interacción con el sistema de generación desarrollado, se analizó el comportamiento del número de Reynolds en función de la velocidad del fluido, este se determinó a partir del enfoque

propuesto para la caracterización del flujo en vientos en zonas urbanas reportado por Liu et al. (2025), donde se describe que el flujo en ciudades se asocia a la geometría dominante del entorno, es decir la altura típica de las edificaciones, debido a la influencia directa en el comportamiento del fluido. Con base en lo anterior, la longitud característica empleada se definió a partir de la altura promedio de las edificaciones para el área urbana de Bucaramanga, la cual se obtuvo del (POT), donde se considera un rango representativo de 20 a 26 m. A partir de los datos obtenidos, se calcula el valor de Reynolds, el cual permite estimar un régimen de flujo coherente con las condiciones de operación propias de la ciudad.

### Figura 15

*Reynolds vs Velocidad.*



La figura 15 muestra la variación del número de Reynolds en función de la velocidad del viento para el prototipo propuesto y el entorno urbano de la ciudad, el número Reynolds urbano alcanza un valor de  $2.03 \times 10^6$ , mientras que el valor característico de la turbina es de  $8.3 \times 10^4$ , lo que evidencia una diferencia significativa entre ambas escalas.

En el caso de la turbina, estos valores corresponden a un régimen laminar – transitorio, característico de sistemas de microgeneración eólica con turbinas Savonius, donde predominan

los efectos de arrastre. Del mismo modo, el flujo atmosférico urbano se considera turbulento debido a la rugosidad superficial, la capa límite atmosférica urbana y los fenómenos de separación e inestabilidad del flujo. Esta diferencia en los regímenes justifica la selección de una turbina Savonius de eje vertical con etapas, capaz de operar de forma estable en condiciones de viento urbano de baja velocidad y alta turbulencia, asociados con el contexto eólico de Bucaramanga.

### 5.1.2 Síntesis del Recurso Eólico Urbano

Con el fin de integrar los resultados del análisis del recurso eólico urbano, la tabla 3 presenta una síntesis de los parámetros eólicos característicos del entorno urbano de la ciudad y la relación con la selección de la turbina seleccionada, integrando análisis de velocidad, número de Reynolds y potencia esperada.

**Tabla 3**

*Datos del análisis del recurso eólico.*

Parámetro	Valor característico	Interpretación técnica	Observación
Velocidad del viento	1,6 m/s	Velocidad baja, típica de entorno urbano y turbinas de arranque a bajas velocidades.	Limita la potencia disponible y descarta turbinas de sustentación convencional.
Reynolds	$8,3 \cdot 10^4$	Régimen laminar–transitorio	Predominio de efectos viscosos y arrastre; condición adecuada para turbinas Savonius.
Reynolds Urbano	$2,03 \cdot 10^6$	Régimen turbulento plenamente desarrollado	Influenciado por rugosidad urbana, capa límite atmosférica e inestabilidad térmica.
Tipo de turbina	Savonius de Etapas	Turbina de eje vertical basada en arrastre	Capaz de operar en flujos turbulentos y a bajas velocidades.
Potencia esperada	0,78 W	Microgeneración de muy baja potencia	Sistema de apoyo energético, no destinado al reemplazo total de la red.

La síntesis realizada evidencia la coherencia entre las condiciones reales del recurso eólico urbano de la ciudad de Bucaramanga y la selección de la turbina Savonius de múltiples

etapas como solución de microgeneración y autoconsumo para el apoyo energético en aplicaciones residenciales.

### ***5.1.3 Viabilidad Técnica***

La implementación de una turbina eólica Savonius de etapas múltiples debido a sus características de operación resulta adecuada para las condiciones presentes en la ciudad de Bucaramanga las cuales se caracterizan por tener velocidades bajas de viento y alta turbulencia propias de entornos urbanos y construcciones elevadas. Los sistemas de generación de este tipo se caracterizan por la capacidad de autoarranque a bajas velocidades de viento lo que permite la operación en dicho entorno.

La implementación de sistemas de direccionamiento mejora la confiabilidad operativa ya que redireccionan el flujo en un solo sentido y mejoran su desempeño frente a flujos turbulentos. De acuerdo con lo anterior, estas características hacen que el sistema de generación propuesto sea técnicamente viable para aplicaciones de pequeña escala.

### ***5.1.4 Viabilidad Económica***

Desde el punto de vista económico, aunque la energía generada por este sistema eólico es limitada debido a las condiciones del recurso disponible, su implementación puede considerarse viable bajo un enfoque de micro generación.

La rentabilidad de este sistema propuesto no se centra en la maximización de la potencia generada, sino esta se sustenta en el aprovechamiento del recurso renovable, bajo costo de mantenimiento y componentes y la funcionalidad del sistema. La integración de esta turbina como sistema complementario a otras fuentes de energía permite justificar su inversión inicial para aplicaciones en entornos de autoconsumo.

## **5.2 Definición de Parámetros de Diseño y Requerimientos del Sistema**

Los requerimientos del rotor fueron establecidos con el propósito de garantizar un funcionamiento eficiente y confiable de la turbina eólica bajo condiciones de tamaño y operación establecidas en el proyecto. Los parámetros establecidos sirven como base para la toma de decisiones acerca del diseño mecánico, teniendo en cuenta una correcta selección de materiales, configuración geométrica de los alabes y el rotor, además de la determinación de las dimensiones principales de todo el conjunto de generación. Del mismo modo, estos parámetros permiten realizar el proceso de validación mediante simulaciones de esfuerzo deformación y simulaciones CFD, con el fin de evaluar la resistencia a cargas, la integridad estructural del rotor y su desempeño en condiciones de trabajo reales.

### ***5.2.1 Requerimientos Mecánicos***

- Resistir cargas dinámicas variables generadas por el viento sin presentar deformaciones, además de minimizar vibraciones y concentraciones de esfuerzo durante la operación.
- Soportar el peso propio del rotor y cargas transmitidas al eje.
- Capacidad de operación estable y segura bajo condiciones de viento turbulento, característico de entornos urbanos y zonas montañosas.
- El diseño de la turbina debe considerar la velocidad de viento registrada en la ciudad de Bucaramanga, para garantizar un desempeño eficiente en los rangos habituales de velocidad observados en la región.
- Inclusión de deflectores aerodinámicos o de direccionamiento para la optimización del rendimiento y mejoramiento de la captura de energía del viento.

### ***5.2.2 Requerimientos Geométricos***

- Altura máxima del sistema de generación: 1.50 m
- Diámetro máximo del rotor: 1.0 m
- Configuración del rotor a etapas múltiples.

### ***5.2.3 Requerimientos de Material***

- Uso de materiales livianos y resistentes de alta calidad y eficiencia para el desarrollo del diseño y operación de distintos entornos.
- Resistencia a la corrosión y exposición al ambiente.
- Facilidad de fabricación y acabado superficial bueno.
- Materiales de fácil obtención y bajo costo.

## **5.3 Diseño, Modelado y Simulación del Rotor**

Esta fase presenta el desarrollo del sistema de generación, a partir de los parámetros definidos y las condiciones reales de operación. Se realizaron los cálculos teóricos necesarios para el dimensionamiento del rotor, eje, estructura y conductos Venturi, considerando los requerimientos establecidos anteriormente, junto con la selección adecuada de un material resistente como la fibra de vidrio y resina. Adicionalmente, se elaboraron modelos CAD, los cuales sirven como base para la ejecución de simulaciones CFD orientadas a analizar el comportamiento del sistema y la respuesta estructural de los componentes.

### ***5.3.1 Selección configuración del rotor y tipo de perfil***

La configuración general del rotor de la turbina Savonius diseñada se estableció a tres etapas con disposición axial con el propósito de incrementar el torque generado y mejorar la

estabilidad del sistema frente a las variaciones de velocidad del viento. La incorporación de álabes de perfil tipo Bach modificados se adoptó debido a que presenta mejor desempeño global entre los perfiles evaluados por Gallo et al. (2022) en la figura 7, donde se evalúa el desempeño aerodinámico de distintas geometrías del rotor. Este perfil alcanza el mayor coeficiente de potencia y la mayor eficiencia, lo cual evidencia una mayor capacidad de conversión de energía y mejor capacidad de captación de flujo sobre la pala motriz, lo que genera una reducción en pérdidas por arrastre en la pala de retorno.

Esta configuración multinivel de etapas, en conjunto con el perfil Bach modificado, permite una mejor captación del flujo y reduce las pérdidas por arrastre, favoreciendo una distribución más uniforme de cargas a lo largo del eje, lo que se traduce en una mayor continuidad en la generación de par, un incremento en el par de arranque y una mejor operación y desempeño a bajas velocidades de viento.

### ***5.3.2 Dimensionamiento y Parámetros Geométricos del Rotor***

Las dimensiones del rotor fueron definidas a partir de los requerimientos mecánicos y geométricos establecidos, considerando las condiciones reales de operación con el fin de garantizar un adecuado diseño entre la estabilidad estructural, par de arranque y capacidad de generación.

**Tabla 4**

*Dimensiones del rotor de la turbina.*

Dimensiones álabe - rotor [m]	
Altura Rotor	0,93 m
Diámetro Rotor	0,82 m
Altura Álabes	0,31 m
Área Frontal del Rotor	0,7626 m <sup>2</sup>

### 5.3.3 Relación de Aspecto del Rotor (RAR)

La relación de aspecto del rotor (RAR) es un parámetro adimensional que se define como el cociente entre la altura total del rotor Savonius [H] y el diámetro [D]. Esta relación permite caracterizar el comportamiento aerodinámico y estructural del rotor.

Para cada etapa del rotor, la relación de aspecto se define como:

$$RAR = \frac{H}{D} = 0.38 \quad (26)$$

Debido a que el rotor fue diseñado en tres etapas, la relación de aspecto total del sistema se calcula como:

$$RAR_T = \frac{3*H}{D} = 1.13 \quad (27)$$

La relación de aspecto del rotor garantiza una interacción óptima entre el flujo y la superficie de barrida del rotor, lo que favorece la generación de par sin afectar la estabilidad estructural.

### 5.3.4 Definición Perfil Tipo Bach Modificado

El perfil del álabe tipo Bach modificado se diseña a partir de la combinación de una sección plana y un arco circular, las dimensiones calculadas se definen como proporción del diámetro del rotor con el propósito de mantener una geometría consistente con el diseño.

Longitud sección plana del álabe está determinado por:

$$L = 0.2145 * D = 0.176 \text{ m} \quad (28)$$

Radio del arco del álabe está determinado por:

$$R_{Arco} = 0.2515 * D = 0.206 \text{ m} \quad (29)$$

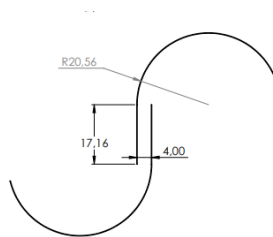
Desfase del centro del arco respecto al eje de referencia está determinado por:

$$Desf_{C\_arco} = 0.0552 * D = 0.045 \quad (30)$$

Los valores geométricos calculados para el rotor y alabes permiten confirmar que el diseño se ajusta a los rangos ya establecidos para turbinas de este tipo. La longitud de la sección plana  $L=0.176$  m junto con  $R\_arco= 0.206$  m, establecen un perfil que brinda una facilidad de fabricación mayor y buen desempeño aerodinámico sin el uso de herramientas o moldes de mayor complejidad.

### Figura 16

*Diagrama perfil álabes Bach modificados.*



#### 5.3.5 Solapamiento Entre Alabes

El solapamiento entre álabes por etapa es un parámetro relevante ya que influye directamente en el par de arranque de la turbina y en la reducción de pérdidas. Este valor se define como una fracción del diámetro del rotor:

$$S = 0.0469 * D = 0.038 \text{ m} \approx 0.04 \text{ m} \quad (31)$$

#### 5.3.6 Selección Material del Rotor

Para la fabricación del rotor de la turbina se selecciona la fibra de vidrio reforzada con resina debido a su relación resistencia-peso, buena resistencia a la corrosión y facilidad de

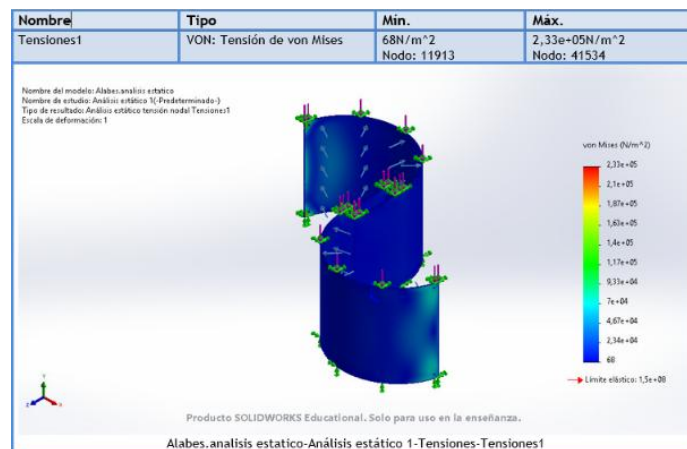
fabricación. El uso de este material en la construcción del rotor permite la reducción de peso total del rotor, lo que disminuye el momento de inercia y favorece el arranque en zonas de bajo potencial eólico como lo es Bucaramanga.

### 5.3.7 Simulaciones CAD Perfil Bach Modificado

Con base en los requerimientos mecánicos establecidos, se realizaron simulaciones estructurales mediante herramientas CAD como SolidWorks con el fin de realizar un análisis de esfuerzos, necesario para obtener información acerca de la validez del diseño y corroborar las cargas que se aplican en los alabes del rotor no generan ningún problema o daño al sistema.

**Figura 17**

*Simulación análisis de tensiones.*

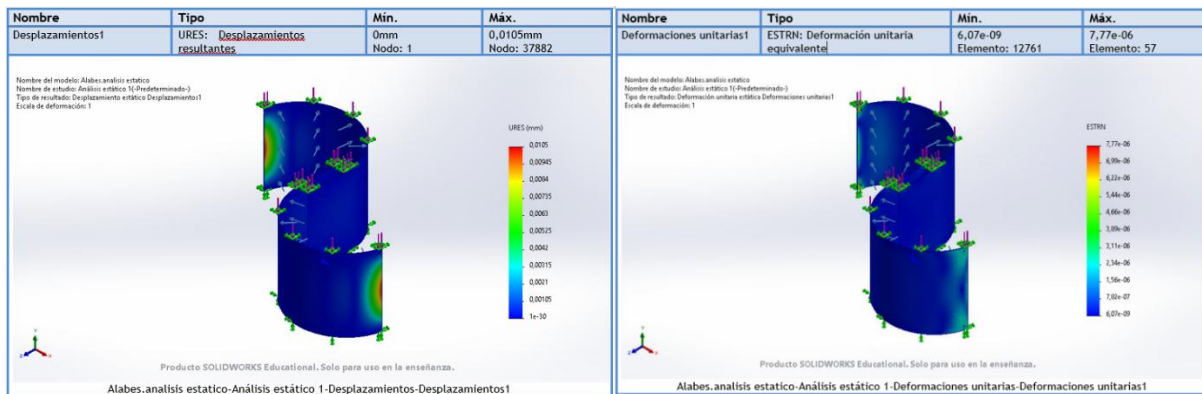


De acuerdo con la simulación de análisis del criterio de Von Mises se puede observar que se tiene un valor máximo de tensión de  $2,33 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Los valores de tensión más significativos se concentran principalmente en las zonas de fijación y bordes de los alabes. Este valor es considerablemente inferior al límite elástico del material estimado en  $1,5 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup>. Esto indica que el rotor opera ampliamente dentro del régimen elástico. De acuerdo con esto, se

puede confirmar que el material seleccionado es adecuado para soportar las cargas mecánicas y las producidas por el flujo del viento, esto sin presentar riesgos para el funcionamiento y la estructura durante la operación del sistema.

### Figura 18

*Simulación análisis de desplazamiento y deformaciones unitarias.*



El análisis de desplazamientos permite observar que el desplazamiento máximo obtenido en la simulación del perfil Bach es de aproximadamente 0.0105 mm, el cual se localiza principalmente en las zonas más alejadas de los puntos de restricción. Dicho valor, es considerablemente reducido en comparación con las dimensiones totales del rotor, lo que evidencia una alta rigidez estructural del sistema.

Desplazamientos de tal magnitud como los evidenciados en la simulación no representan un problema para el desempeño de la turbina, lo que garantiza un funcionamiento estable y seguro durante los momentos de operación.

El análisis de las deformaciones unitarias equivalentes permite evidenciar un valor máximo de  $7,77 \times 10^{-6}$ , lo que indica deformaciones muy pequeñas, relacionados con los bajos niveles de tensión obtenidos en las otras simulaciones realizadas. La distribución de las

deformaciones muestra una transmisión de cargas correcta a lo largo de la geometría estructural del perfil Bach. De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que el rotor no experimenta concentraciones críticas de deformación que afecten la integridad del sistema o provoquen fallas por fatiga en condiciones de operación normal.

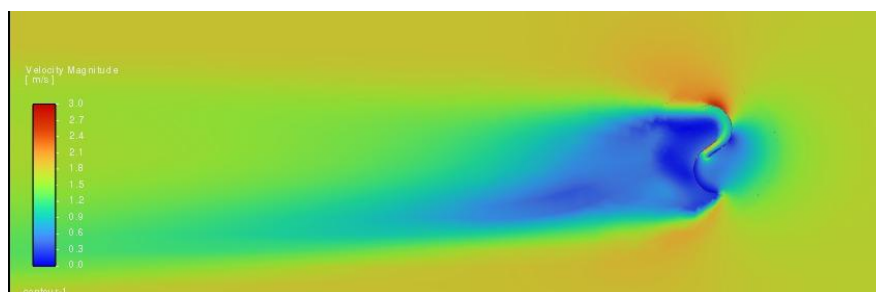
### 5.3.8 Simulaciones CFD Prototipo Turbina

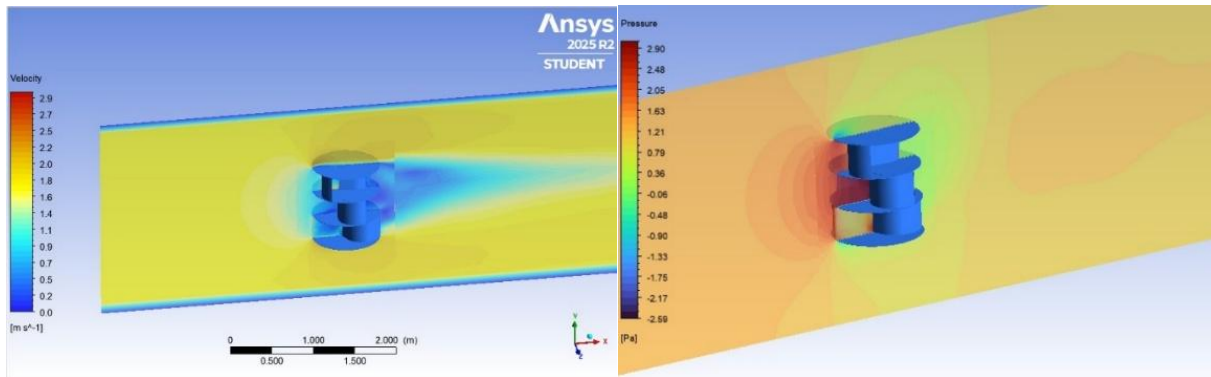
Con el fin de analizar el comportamiento aerodinámico del rotor y verificar la conveniencia de la configuración seleccionada, se realizaron simulaciones CFD para dos configuraciones de turbina Savonius, bajo las mismas condiciones de operación y criterios de simulación, lo que permite observar la distribución de velocidades de flujo al rededor del rotor, así como también identificar las zonas de aceleración, desaceleración y estela, factores que influyen directamente en el desempeño de sistema de generación.

Para el modelado de turbulencia se emplea el enfoque RANS con el modelo estándar  $k - \epsilon$ , debido a sus amplias aplicaciones en ingeniería y sus características de alta precisión y bajo consumo de recursos computacionales. La simulación de la turbina de una etapa se realiza con el fin de comparar su comportamiento con la seleccionada en este proyecto y validar su selección.

### Figura 19

*Simulación CFD Turbina Eólica Savonius de Etapas Múltiples*



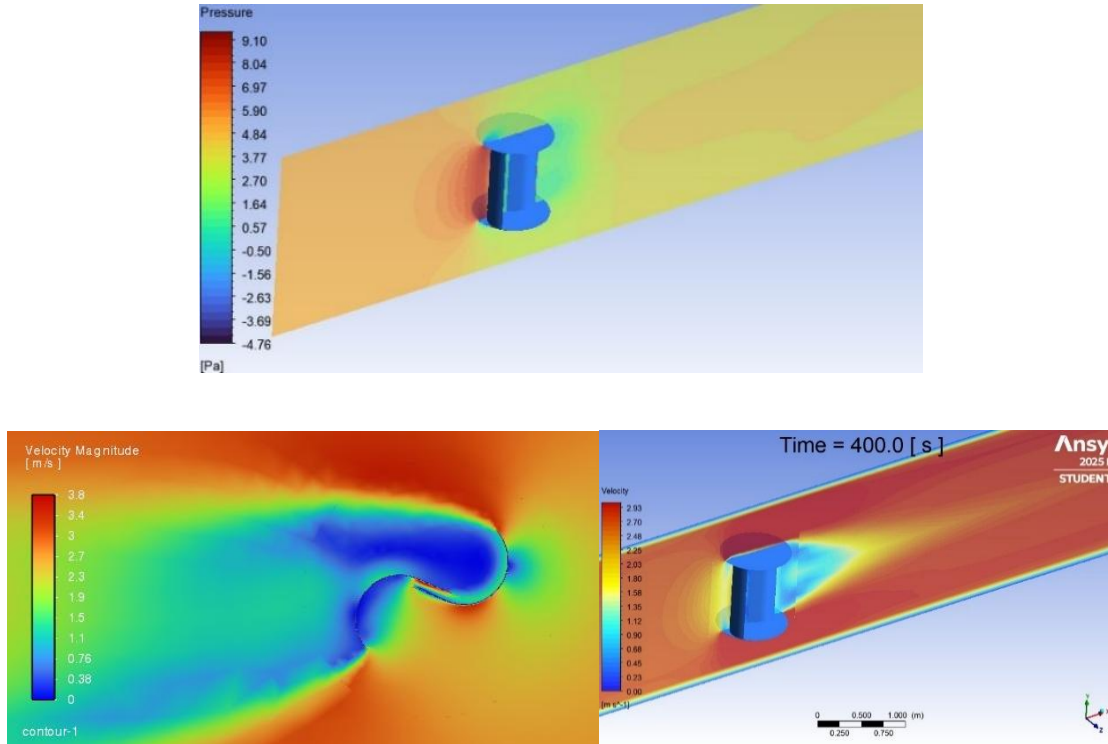


La figura 34 presenta la simulación CFD de la turbina Savonius de múltiples etapas, esta se realizó con el fin de analizar el comportamiento aerodinámico bajo condiciones de viento bajo, representativas de entornos urbanos. El modelo numérico permite evaluar la distribución del campo de velocidades y los principales fenómenos asociados a la interacción entre el flujo y el rotor.

El campo de velocidades muestra una disminución significativa de la velocidad del flujo en la región de la turbina, así como aceleraciones locales en las caras convexas de las palas. Este comportamiento es característico de las turbinas de arrastre, en las cuales la diferencia de presión entre las caras del perfil es el principal mecanismo de generación de par. Aguas abajo del rotor se observa la formación de una estela alargada, relacionada con las pérdidas aerodinámicas de la turbina. La configuración seleccionada para el rotor de la turbina permite una interacción progresiva del flujo, ya que distribuye de manera más uniforme las cargas aerodinámicas y mayor estabilidad del par generado. Aunque se presentan zonas de recirculación y pérdidas energéticas, el comportamiento observado se relaciona con la teoría de las turbinas Savonius.

**Figura 20**

*Simulación CFD Turbina Eólica Savonius de Una Etapa.*



La simulación CFD correspondiente a una turbina de una sola etapa permite analizar el comportamiento aerodinámico bajo condiciones de viento uniforme, el campo de velocidades evidencia una interacción directa del flujo con el perfil, lo que genera una diferencia entre las caras, lo que confirma el mecanismo de generación por arrastre.

Adicionalmente, se observa una reducción significativa de velocidad en la región del rotor y la formación de zonas de recirculación en la pala de retorno, las cuales originan pérdidas y una estela marcada aguas abajo. El campo de presión permite observar una diferencia clara entre las palas, aunque con una distribución no uniforme lo que puede producir variaciones en el torque.

### ***5.3.9 Comparación de Geometrías***

De acuerdo con lo obtenido anteriormente, la turbina Savonius de múltiples etapas muestra un mejor comportamiento aerodinámico en comparación con la turbina de una sola etapa. Las simulaciones permiten evidenciar que la configuración por etapas reduce la intensidad de la estela y distribuye de manera más homogénea las cargas, lo que genera una mayor estabilidad del par generado.

Sin embargo, esta configuración incrementa la interacción entre capas de flujo y superficies, llevando a un aumento de las pérdidas por fricción. En contraste, la turbina de una sola etapa presenta una interacción más directa con el viento, lo que simplifica el flujo, pero genera mayores zonas de recirculación y pérdidas concentradas aguas abajo.

Dicho esto, la turbina de múltiples etapas no máxima la extracción instantánea de energía, si no que prioriza una transferencia progresiva y estable, lo que resulta en mayor favorabilidad para aplicaciones urbanas como las presentes en la ciudad de Bucaramanga.

### ***5.4 Diseño, Modelado y Simulación del Eje***

Esta fase describe el diseño y análisis mecánico del eje del prototipo desarrollado. Este constituye uno de los elementos estructurales de mayor importancia, que cumple la función de transmitir el torque y movimiento generado por el rotor hacia el sistema de transmisión, de igual manera, soporta las cargas mecánicas relacionadas al peso del rotor y las fuerzas actuantes.

El diseño del eje de la turbina se realizó considerando criterios de resistencia, seguridad y rigidez, teniendo en cuenta las condiciones reales de operación. El dimensionamiento del eje se llevó a cabo mediante la consideración de un análisis mecánico basado en criterios de resistencia

estática y fatiga, debido a cargas combinadas de flexión, torsión y carga axial. Se realizó la selección de material y la verificación estructural a través de simulaciones CAD.

#### **5.4.1 Selección de Material del Eje**

Para el diseño y fabricación del eje se seleccionó una barra de acero inoxidable AISI 316 en condición recocida debido a sus propiedades tales como buena ductilidad y alta resistencia a la corrosión. La selección de este material es viable debido a la exposición de la turbina a condiciones ambientales variables. Además, presenta un límite un límite elástico y resistencia mecánica adecuadas para soportar las cargas de operación.

Las propiedades mecánicas del material seleccionado se emplearon como base para los cálculos de resistencia del eje. Estas propiedades incluyen módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, resistencia última a la tracción y límite elástico, estas permiten tanto la evaluación de los criterios de falla y fatiga como el comportamiento elástico.

#### **Tabla 5**

*Propiedades del material AISI 316.*

Propiedades AISI 316	
E	192999.9974 [Mpa]
$\nu$	0,3
Su	550 [Mpa]
Sy	137,9 [Mpa]

#### **5.4.2 Factores de Fatiga**

Dado que el eje de la turbina eólica experimenta cargas cíclicas durante su operación, se realizó la verificación por fatiga mediante el criterio de Marin para la corrección del límite de resistencia a la fatiga del material. Para esto se consideraron factores relacionados con el acabado

superficial, factor de tamaño, tipo de carga, temperatura de operación, entre otros (fórmula 20), los cuales permiten ajustar el límite de fatiga a condiciones reales de operación.

**Tabla 6**

*Factores usados para el criterio de fatiga.*

Factores de Fatiga		
Diámetro del eje	D	15,875 mm
Factor acabado superficial	$K_a$	0,85
Factor de tamaño	$K_b$	0,87
Factor tipo de carga	$K_c$	1
Factor de temperatura	$K_d$	1
Factor de confiabilidad	$K_e$	1
Factor efectos misceláneos	$K_f$	1
Factor Global	k	0.74

La tabla 5 presenta los factores de corrección adoptados para la realización del análisis de fatiga del eje. El factor resultante  $K=0.74$ , reduce el límite de fatiga de laboratorio del acero AISI 316 el cual corresponde a  $S_e'=275$  Mpa. Al aplicar los factores de corrección se obtiene:

$$S_e = k * S_e' = 203.5 \text{ Mpa} \quad (32)$$

### 5.4.3 Geometría del eje

La geometría del eje se define a partir de las dimensiones del rotor y las condiciones de apoyo. Se adoptó una sección circular maciza según criterios de rigidez y resistencia a la fatiga. También se incluye un orificio transversal como parte sistema de fijación, cuya presencia genera concentraciones de esfuerzo que fueron consideradas en el análisis.

**Tabla 7**

*Geometría del eje de la turbina.*

Geometría del Eje	
dh	5 [mm]
D	15,875 [mm]
L	1050 [mm]
A	197,9 [mm <sup>2</sup> ]

#### **5.4.4 Cargas Aplicadas al Eje**

El eje de la turbina durante su operación experimenta una combinación de cargas las cuales generan esfuerzos combinados de flexión, torsión y tracción, las cuales incluyen una fuerza transversal asociada al peso del rotor y componentes acoplados; una carga axial asociada al sistema de fijación y el torque generado por el rotor de la turbina.

**Tabla 8**

*Cargas aplicadas al eje de la turbina.*

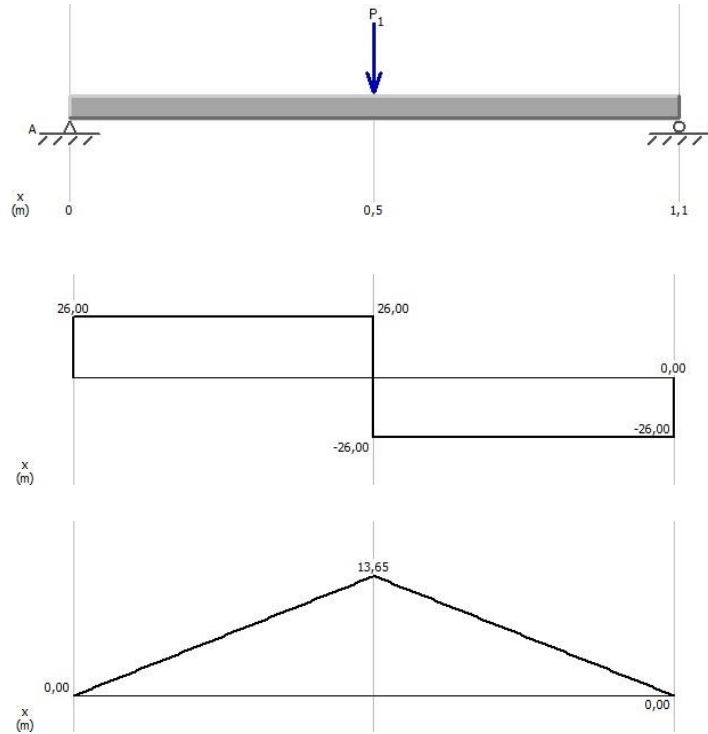
Cargas Aplicadas	
F	52 [N]
Fa	206 [N]
T	23 [N*m]

#### **5.4.5 Análisis Estático del Eje**

A partir del diagrama de cuerpo libre del eje y las condiciones de apoyo definidos se determinan los diagramas de cortante y momento, los cuales permiten analizar el comportamiento mecánico del eje sometido a condiciones operativas reales.

**Figura 21**

*Diagramas análisis estático.*



El eje se encuentra sometido a una carga distribuida, para efectos del análisis estático se adoptó una carga puntual equivalente aplicada en el centro de este. La aproximación realizada conserva la magnitud total de la carga y permite la simplificación del modelo sin afectar los valores del momento flector máximo.

#### **5.4.6 Cálculo de Esfuerzos Nominales**

A partir de las cargas determinadas y la geometría el eje, se calculan los esfuerzos nominales de flexión, torsión y carga axial. El momento flector máximo se obtiene considerando el modelo de viga simplemente apoyada con carga puntual en el centro y está representada por:

$$M_{Max} = F * \frac{L}{4} = 13650 [N * mm] \quad (33)$$

Los esfuerzos se determinaron mediante el uso de expresiones clásicas de la teoría de elasticidad par ejes circulares macizos de diámetro uniforme.

$$W = \pi * \frac{d^3}{32} = 392.8 [mm^3] \quad (34)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = 34.75 [Mpa] \quad (35)$$

$$\tau = 16 * \frac{T}{\pi * d^3} = 29.28 [Mpa] \quad (36)$$

$$\sigma_c = \frac{fa}{A} = 1.041 [Mpa] \quad (37)$$

Los esfuerzos nominales calculados se comparan favorablemente con las propiedades del material seleccionado, ya que todos los valores individuales se encuentran por debajo del límite elástico, lo que confirma la capacidad del diseño.

#### **5.4.7 Concentración de Esfuerzos**

Al tener la presencia de un orificio transversal pasante en el eje, se incorporan factores de concentración de esfuerzos (Kt) par flexión, torsión y carga axial, obtenidos a partir de relaciones geométricas normalizadas. De igual manera, se tiene en cuenta el factor de sensibilidad de entalla (q), el cual considera la capacidad de plastificación del material frente a concentradores geométricos.

#### **Tabla 9**

*Factores Corregidos para  $d/D = 5/15,875$  mm.*

Factores Corregidos	
$Kt_{Flex}$	1.92
$Kt_{Axial}$	2.05
$Kt_{Tors}$	1.42
q	0.85

$$Kt_{Flex} = 1 + q * (Kt_{Flex} - 1) = 1.782 \quad (38)$$

$$Kt_{Axial} = 1 + q * (Kt_{Axial} - 1) = 1.893 \quad (39)$$

$$Kt_{Tors} = 1 + q * (Kt_{Tors} - 1) = 1.357 \quad (40)$$

Los resultados obtenidos mediante el análisis realizado se pueden considerar típicamente bajos para orificios pasantes en acero inoxidable, lo que refleja la buena capacidad de plastificación del material seleccionado.

#### 5.4.8 Análisis a Fatiga

La verificación por fatiga del eje se empleó el criterio de Goodman modificado, se consideraron esfuerzos variantes debido a la flexión y esfuerzos medios relacionados con la torsión y carga axial. El límite de resistencia se corrigió previamente mediante los factores de Marin, lo que permite determinar un factor de seguridad adecuado.

El esfuerzo alternante de flexión corresponde al ciclo completo inducido por flexión debido al momento flector.

$$\sigma_a = Kf_{flex} * \sigma_b = 61.93 [Mpa] \quad (41)$$

Del mismo modo, se calcularon los esfuerzos medios constantes por torque transmisor y carga axial del sistema.

$$\sigma_{m,axial} = Kf_{Axial} * c = 1.97, \quad \tau_{m.tors} = Kf_{Tors} * \tau = 39.73 \quad (42)$$

Una vez realizado los cálculos de esfuerzos medios, se realiza el cálculo de esfuerzo medio equivalente Von Mises el cual combina los efectos de tracción media y cizalladura para la verificación.

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{m,axial}^2 + 3 * Kf_{Tors*}^2} = 68.85 \text{ [Mpa]} \quad (43)$$

Con los esfuerzos y medios equivalentes de Von Mises, se procede a determinar el factor de seguridad mediante el criterio de Goodman.

$$nf = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Su}} = 2.4 \quad (44)$$

#### 5.4.9 Verificación Estática

Se realizó una verificación estática del eje considerando el esfuerzo equivalente de Von Mises, esto con el fin de corroborar que las tensiones máximas están por debajo del límite elástico del material. La realización de la verificación permite confirmar que no se presenta riesgo de falla por deformación en el eje bajo condiciones de operación.

El esfuerzo normal máximo se obtuvo mediante la suma de aportes por flexión y carga axial y el esfuerzo cortante máximo corresponde al esfuerzo de torsión ya establecido.

$$\sigma_{max,static} = \sigma_b + \sigma_c = 35.79 \text{ [Mpa]} \quad (45)$$

A partir de los valores obtenidos, se realizó el cálculo del esfuerzo equivalente Von Mises estático, con el valor obtenido se calcula el factor de seguridad estático como la razón entre el límite elástico del material seleccionado y el esfuerzo equivalente.

$$\sigma_{vm,static} = \sqrt{\sigma_{max,static}^2 + 3 * \tau_{mas,static}^2} = 62.07 \text{ [Mpa]} \quad (46)$$

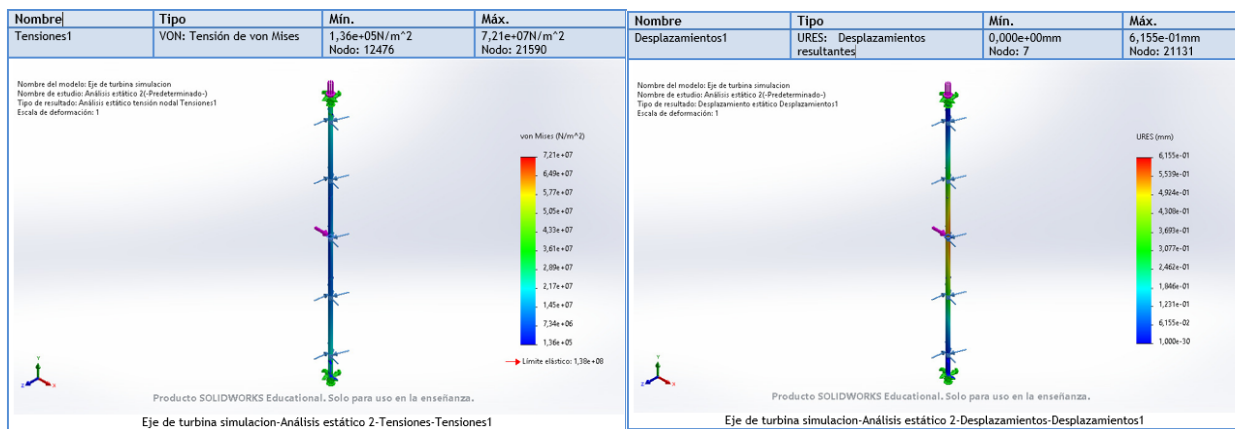
$$n_{static} = \frac{S_y}{\sigma_{vm,static}} = 2.2 \quad (47)$$

**5.4.10 Simulaciones CAD del Eje del Rotor**

Con el fin de validar el diseño mecánico del eje, se realizó un análisis estructural estático y de fatiga mediante simulaciones CAD bajo condiciones de carga definidas en el modelo analítico.

**Figura 22**

*Simulación análisis tensiones equivalentes y análisis de desplazamientos.*

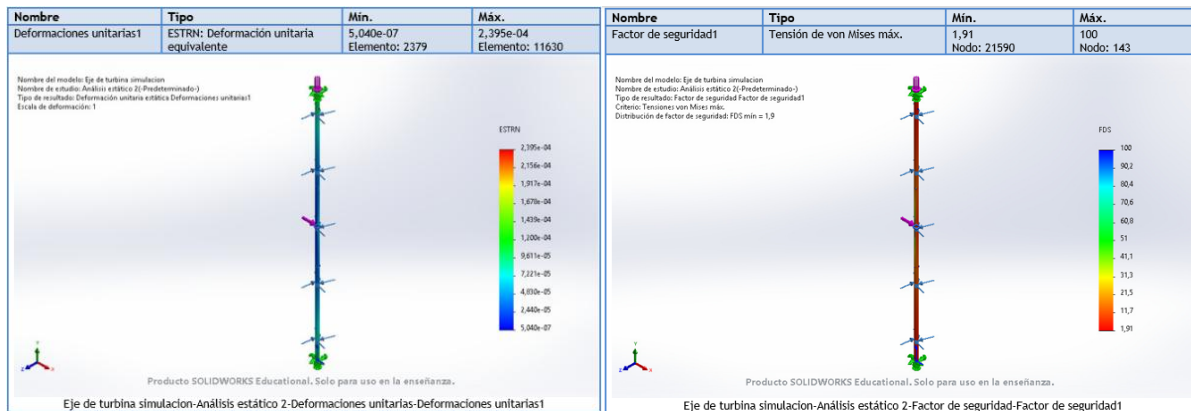


Los resultados obtenidos del análisis de tensiones permiten observar un valor máximo de tensión equivalente de  $7,21 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>, localizado principalmente en las zonas cercanas a los apoyos o cambios geométricos como el orificio transversal. Al comparar dicho valor con el límite elástico de material seleccionado de  $1,38 \times 10^8$  N/m, se observa que las tensiones máximas se mantienen por debajo del límite, lo que permite observar que el eje se encuentra dentro del límite elástico en su operación y no presenta riesgos.

El análisis de desplazamiento presenta un valor mínimo aproximado de 0.615mm, correspondiente a la sección de mayor momento flector, el desplazamiento mínimo observado en relación con la longitud no compromete el funcionamiento del sistema.

**Figura 23**

*Simulación análisis deformaciones unitarias y análisis factor de seguridad.*



Las deformaciones unitarias muestran un valor máximo  $2,4 \times 10^{-4}$ , principalmente concentradas en las regiones donde se presenta mayor tensión. La distribución uniforme de las deformaciones demuestra una rigidez estructural adecuada y una correcta distribución de cargas.

El análisis del factor de seguridad mediante el criterio de Von Mises, se obtiene un valor mínimo aproximado de 1.9 localizado en las zonas críticas ya identificadas. Este valor se encuentra dentro de los intervalos aceptables para sistemas mecánicos de pequeña escala y proporcionando un nivel seguro de confiabilidad estructural.

**Figura 24**

*Simulación análisis de daño acumulado y vida total.*

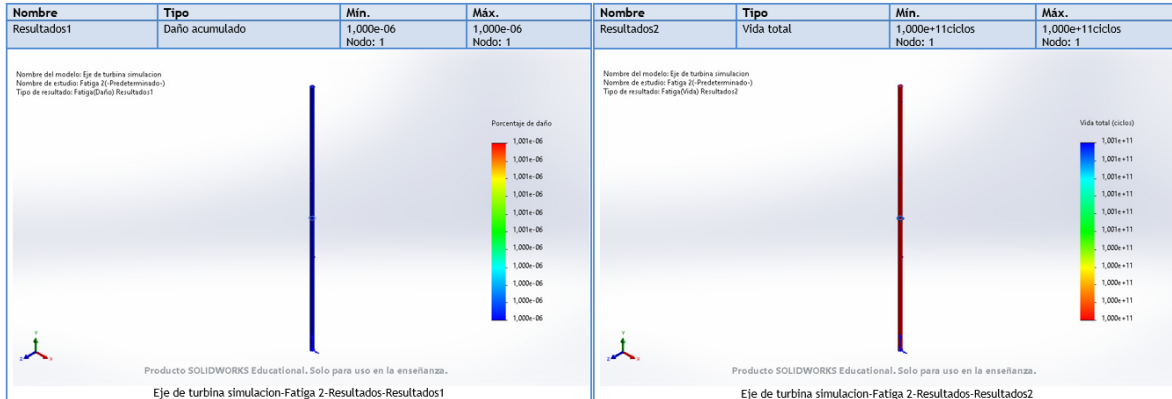
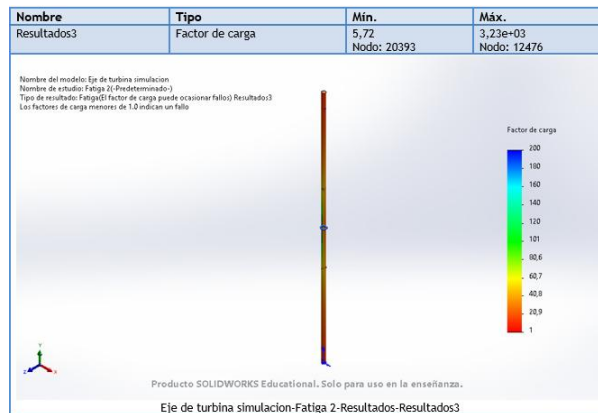


Figura 25

*Simulación análisis de fatiga.*



El análisis de fatiga del eje se realizó con el fin de evaluar el comportamiento frente a cargas cíclicas generadas durante la operación. Los valores obtenidos muestran un daño acumulado de  $10^{-6}$ , esto indica que la aparición de fallas por fatiga es mínima o nula bajo condiciones de carga analizadas.

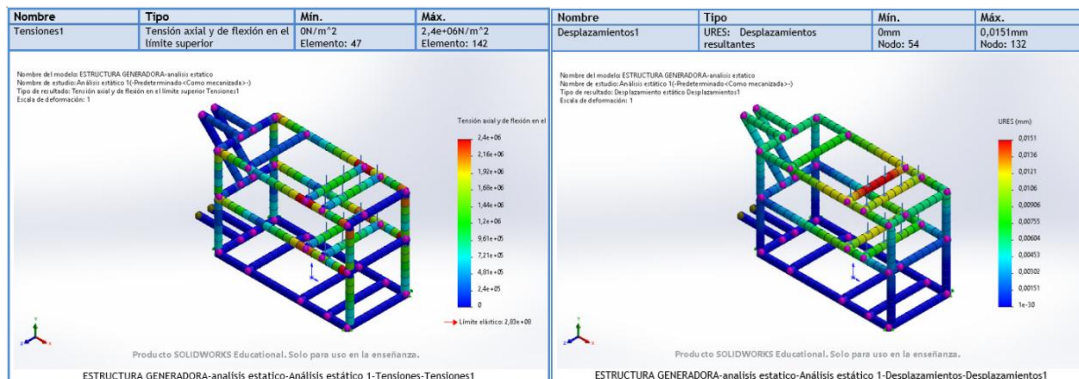
La vida total estimada supera los  $10^{11}$  ciclos, el valor obtenido es considerablemente mayor al número de ciclos esperados del sistema. De igual manera, los factores de carga obtenidos son considerablemente superiores a la unidad en todo el eje, lo que permite evidenciar un diseño seguro frente a fallas por fatiga.

## 5.5 Diseño, Modelado y Simulación Estructura de Soporte

Esta fase aborda el análisis estructural de la estructura de generación y soporte de la turbina eólica, la cual cumple la función de sostener el rotor, además de albergar el sistema de transmisión y generación. Esta estructura es un elemento crítico del sistema ya que se encarga de garantizar la integridad mecánica frente a las cargas presentes durante la operación y el peso propio del conjunto de componentes. El análisis realizado incluye tensión, flexión y desplazamientos, con el fin de verificar que la estructura opere dentro de los límites admisibles del material acero al carbono en perfil 1x1 [in].

**Figura 26**

*Simulación análisis tensiones y análisis de desplazamiento.*

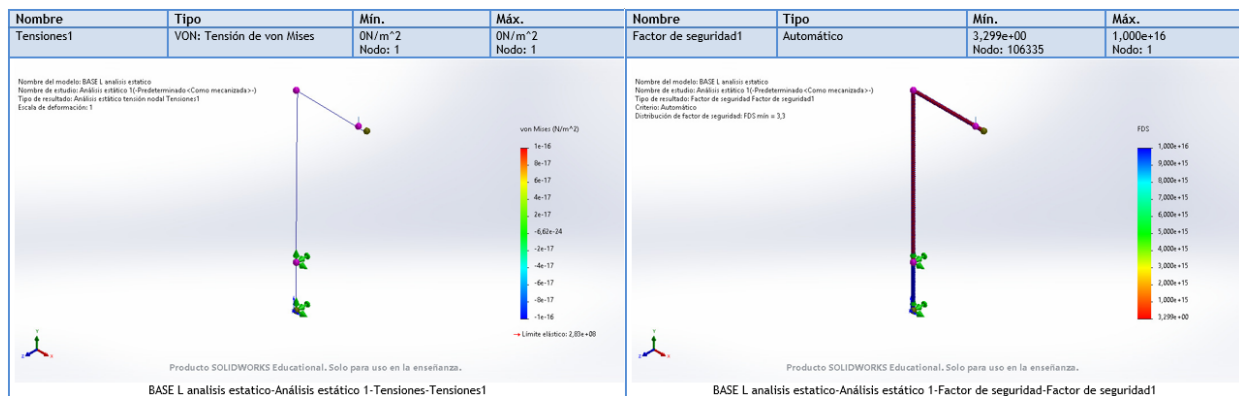


Los resultados de la simulación de tensiones permiten observar que el valor máximo de tensión aproximado es 2.4 Mpa, el cual se localiza principalmente en la unión de los elementos superiores y algunas secciones verticales, los cuales soportan esfuerzos provenientes del rotor y eje de la turbina. El valor obtenido es considerablemente inferior al límite elástico del material seleccionado para la estructura el cual se encuentra alrededor de 280 Mpa, lo que permite ver que la estructura opera dentro del régimen elástico. Por lo que no se espera la aparición de deformaciones permanentes ni fallas en la estructura.

El análisis de desplazamientos resultantes arroja un valor máximo de 0.015 mm, localizado en la parte superior de la estructura donde se concentran las cargas transmitidas por el conjunto del rotor. El dato obtenido es bajo en comparación con las dimensiones de la estructura general, lo que indica una rigidez estructural buena.

## Figura 27

*Simulación análisis tensión y factor de seguridad.*



El factor de seguridad obtenido presenta un valor elevado de 3.3, lo cual confirma que el apoyo en L trabaja ampliamente dentro del régimen elástico del material. Adicionalmente, el análisis estático realizado muestra valores de tensión muy bajos, indicando que bajo las condiciones de carga aplicadas esta base no se encuentra sometida a esfuerzos significativos.

## 5.6 Diseño, Modelado y Simulación Conductos Venturi

El conducto tipo Venturi se incorpora al diseño del sistema de generación para acelerar el flujo de aire hacia el rotor mediante el efecto de convergencia, incrementando la velocidad incidente y mejorando el par de arranque en condiciones bajas de viento.

Para realizar un correcto diseño del conducto se tiene en cuenta el valor de la presión dinámica disponible de la velocidad media del viento y la densidad de este en la ciudad de Bucaramanga, la cual se representa de la siguiente manera:

$$Pd = \frac{1}{2} * \rho * V^2 = 1.536 [Pa] \quad (48)$$

Con el valor obtenido de la presión dinámica disponible, se logra estimar la velocidad máxima alcanzada con dicha presión gracias a la relación entre presión dinámica y velocidad.

$$Pd = \frac{1}{2} * \rho * (V_2^2 - V_1^2) = 2.2627 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (49)$$

### 5.6.1 Geometría y Dimensionamiento del Conducto

Los parámetros principales se calculan mediante la ecuación fundamental de continuidad, considerando un flujo incompresible y en régimen estacionario. Para el diseño se asume un diámetro de entrada de 0.07 m, el cual se seleccionó de acuerdo con las dimensiones del sistema y el área efectiva de captación. Adicionalmente, se toma una longitud de zona de captación de 0.01 m, garantizando la conservación de masa entre las secciones de entrada y garganta.

**Tabla 10**

*Dimensionamiento geométrico del conducto.*

Dimensionamiento Geométrico		
Diámetro de entrada	D1	0,07 [m]
Diámetro de garganta	D2	0,0588 [m]
Área 1	A1	$3.8484 \times 10^{-3} [m^2]$
Área 2	A2	$2.7212 \times 10^{-3} [m^2]$
Relación de Áreas		1,4142

### 5.6.2 Longitudes de Estrangulamiento

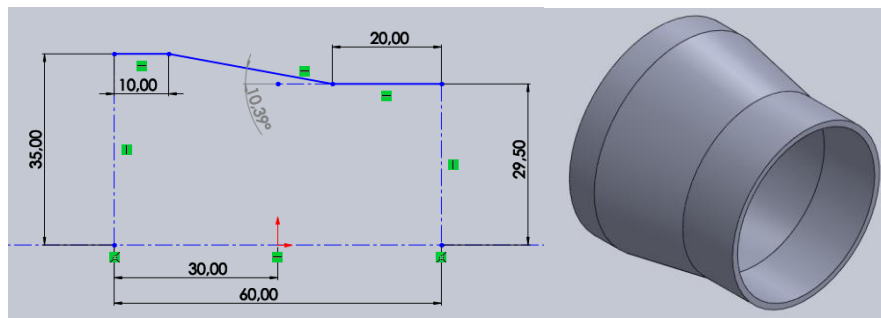
Las longitudes de las zonas de convergencia y estrechamiento se calculan considerando ángulos de apertura controlados para minimizar las pérdidas por separación de flujo. Para estos cálculos el valor del ángulo selecciona es de  $10^\circ$ , el cual se considera óptimo para el diseño tipo tobera del conducto, este valor maximiza la aceleración del flujo son generar separación de flujo prematura y garantiza un flujo adherido a la garganta.

$$L_{Conv} = \frac{D1 - D2}{2 * \tan(\theta)} = 3.119 [cm] \quad (50)$$

La longitud de convergencia obtenida de 3.119 cm garantiza el correcto funcionamiento del conducto en esta sección, la longitud de la garganta se toma entre el rango de 2 a 3 cm para evitar las pérdidas de velocidad del flujo.

### Figura 28

*Dimensiones y diseño CAD del conducto.*



### 5.6.3 Caída de Presión ( $\Delta P$ ) Ecuación de Bernoulli

La caída de presión estática entre la entrada y la garganta del conducto Venturi se determinó aplicando la ecuación de Bernoulli para flujo horizontal sin pérdidas es decir idealizada.

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \rho * (V_2^2 - V_1^2) = 1.5286 [Pa] \quad (51)$$

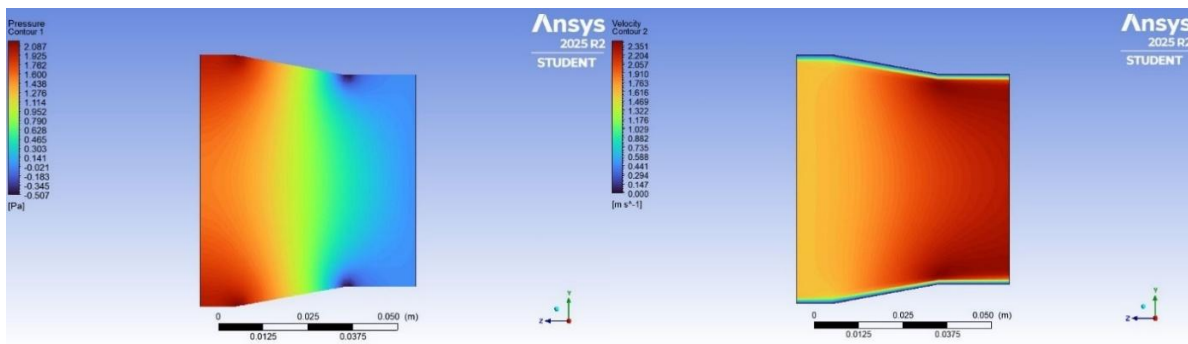
Aunque el  $\Delta P$  es bajo debido a la velocidad inicial reducida, confirma la capacidad del conducto para acelerar el flujo incluso en vientos de arranque menores a 2 m/s donde la turbina presenta menor eficiencia.

#### 5.6.4 Simulación CFD Conducto Venturi

Con el fin de observar el desempeño del funcionamiento y diseño del conducto Venturi en condiciones de operación, se realizó una simulación numérica mediante ANSYS Fluent para validar que el conducto acelera el fluido y genera una caída de presión a lo largo del conducto.

**Figura 29**

*Simulación CFD del conducto Venturi.*



*Nota.* Las simulaciones muestran los rangos de velocidad y presión de flujo interno en el conducto.

Los resultados de la simulación CFD muestran el comportamiento característico de un conducto Venturi operando con aire de baja velocidad. El campo de presión evidencia una disminución progresiva desde la sección de entrada hasta la garganta del conducto, seguida de

una recuperación aguas abajo, comportamiento relacionado con el principio de conservación de la energía descrito por Bernoulli en su ecuación.

El campo de velocidad confirma una aceleración del flujo en la región de menos sección transversal, alcanzando valores máximos de 2.3 m/s, los cuales son superiores a la velocidad de entrada. La distribución suave de los contornos, sin regiones extensas de separación de flujo, indica que el diseño geométrico del conducto favorece un régimen estable, incluso bajo condiciones de bajo número de Reynolds.

De acuerdo con lo anterior, los resultados validan el diseño del conducto Venturi como elemento adecuado para incrementar localmente la velocidad del flujo, alineándose con los objetivos de acondicionamiento del viento planteados.

### **5.7 Diseño y Funcionamiento de los Deflectores**

Los deflectores incorporados en la turbina Savonius cumplen la función de elementos direccionales de flujo con medidas de 6 x 92 cm, y cumplen la función de orientar el viento hacia la zona activa del rotor y reducen su incidencia en la pala de retorno. Este efecto favorece el incremento de la diferencia de presión entre las caras del perfil, generando mayor par especialmente en el arranque.

Adicionalmente, se integran conductor Venturi en algunos deflectores, lo cuales provocan una aceleración local de flujo debido a la reducción de área de paso. Este aumento de velocidad efectiva contribuye a la mejora del par de arranque y el desempeño de la turbina en las condiciones de operación. Dicho esto, los deflectores representan una estrategia de optimización aerodinámica orientada a maximizar el aprovechamiento del recurso eólico disponible, sin modificar considerablemente la geometría del rotor.

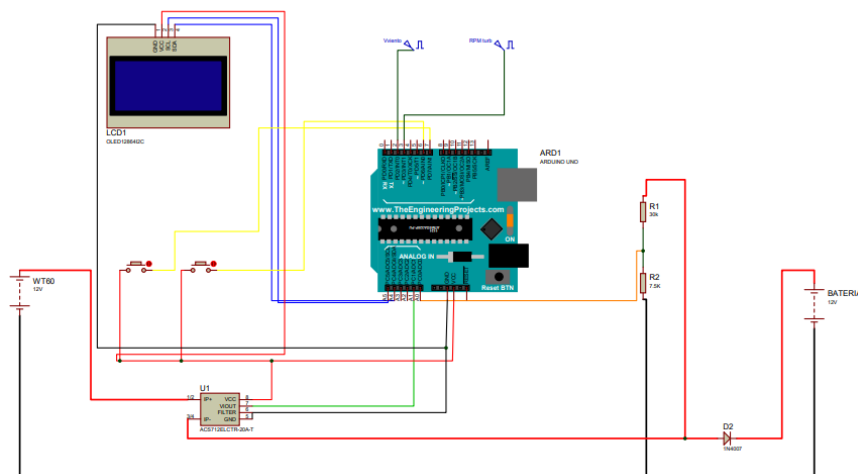
### 5.8 Diseño y Montaje del Sistema de Toma de Datos

El presente capítulo describe el sistema de toma de datos implementado el cual se encarga del monitoreo y evaluación del desempeño en operación de la turbina eólica desarrollada en este proyecto. Este sistema fue diseñado con el objetivo de registrar las principales variables eléctricas y operativas del sistema de generación, lo que permite analizar el comportamiento de esta en condiciones de operación variables.

Para la toma de datos se empleó una plataforma Arduino uno, la cual funciona como central de adquisición y procesamiento, el sistema incorpora dos sensores de velocidad, uno encargado de medir las RPM de giro del rotor y el segundo para el sensor de velocidad de viento mediante la incorporación de un anemómetro diseñado para el proyecto, un sensor de voltaje y una pantalla OLED de visualización con dos pulsados para navegar entre los datos de los sensores obtenidos en tiempo real.

#### Figura 30

*Circuito electrónico para la toma de datos.*



*Nota.* Elaboración propia en el software Proteus

## 6 Resultados

Este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos a partir del estudio teórico, pruebas experimentales y simulación numérica CFD de la turbina eólica propuesta. Se muestran los resultados teóricos obtenidos mediante los modelos físicos y ecuaciones que describen el comportamiento de la turbina. Los resultados experimentales se centran en variables medibles del sistema como la velocidad de rotación de la turbina y generador, y de igual manera el voltaje producido por este. Adicionalmente, se presentan simulaciones CFD realizadas para estudiar el comportamiento general de la turbina en condiciones de operación reales.

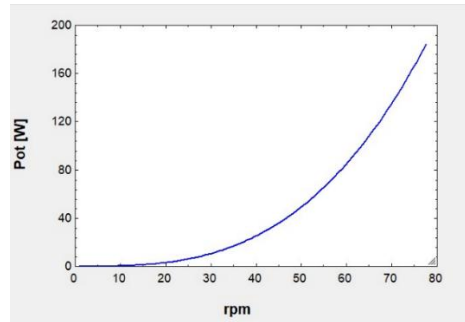
### 6.1 Resultados Teóricos de Potencia de la Turbina Eólica

Con el fin de estimar el desempeño energético de la turbina propuesta, se realizan simulaciones teóricas enfocadas hacia el análisis de potencia generada de acuerdo con la velocidad del viento, RPM del rotor y torque generado. Esto debido a que, durante la realización de la puesta en marcha y operación experimental, la turbina opero sin una carga eléctrica conectada debido al Controlador WT060, el cual al identificar que la batería se encuentra entre los parámetros de no carga, acciona el freno de seguridad del generador para evitar la sobrecarga del sistema y de la batería.

De acuerdo con lo anterior, el análisis de potencia se abordó desde un enfoque teórico, lo que permite estimar el comportamiento del sistema bajo condiciones ideales de operación y evaluar su viabilidad energética.

#### **Figura 31**

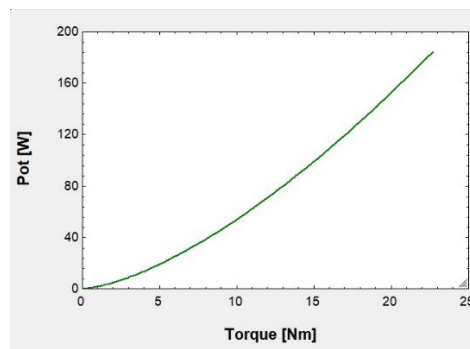
*Grafica Potencia [W] vs RPM del rotor.*



En la gráfica se evidencia un incremento no lineal de la potencia en función de la velocidad de rotación de la turbina. A bajos niveles de RPM la potencia refleja la baja eficiencia aerodinámica del rotor en régimen de arranque debido a la limitada energía extraída del viento, donde se puede observar la predominancia del torque sobre la velocidad angular. Sin embargo, al aumentar la velocidad de giro del rotor de la turbina se logra evidenciar un crecimiento acelerado de la potencia disponible, lo cual indica un óptimo aprovechamiento del recurso eólico.

### Figura 32

*Gráfica Potencia [W] vs Torque [Nm].*

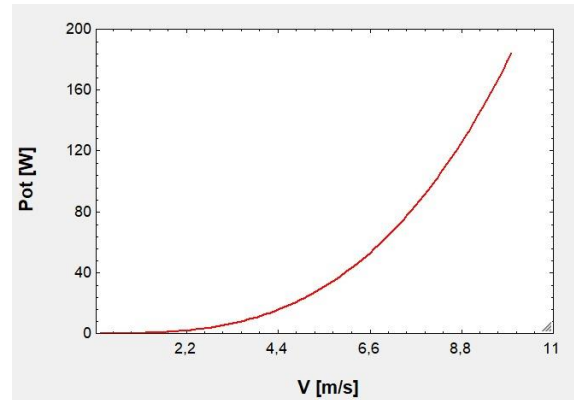


En la gráfica se observa una curva característica potencia – torque con una relación creciente continua. A medida que el torque aumenta, la potencia generada se incrementa lo que refleja una mayor capacidad del rotor para transmitir energía mecánica al eje y sistema de transmisión. El comportamiento observado indica que la turbina se comporta de manera estable

frente al aumento de carga, sin la presencia de caídas de potencia considerables, lo que indica un diseño adecuado del sistema y una correcta transferencia de esfuerzos.

### Figura 33

*Grafica Potencia [W] vs Velocidad del viento [m/s].*



La grafica evidencia un crecimiento no lineal, el cual es característicos de los sistemas de generación eólico, donde la potencia disponible es proporcional al cubo de la velocidad. A partir de la gráfica se puede observar que, a bajas velocidades de viento, la potencia obtenida es baja debido a la energía cinética limitada del flujo. Sin embargo, a medida que la velocidad aumenta la turbina aprovecha de manera más eficiente el recurso eólico, por lo que se logra evidenciar un incremento de la potencia generada.

## 6.2 Resultados Experimentales Turbina Eólica

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas de funcionamiento realizadas al prototipo construido. La realización de estas pruebas tiene como objetivo evaluar el comportamiento real del sistema frente a condiciones de operación variables.

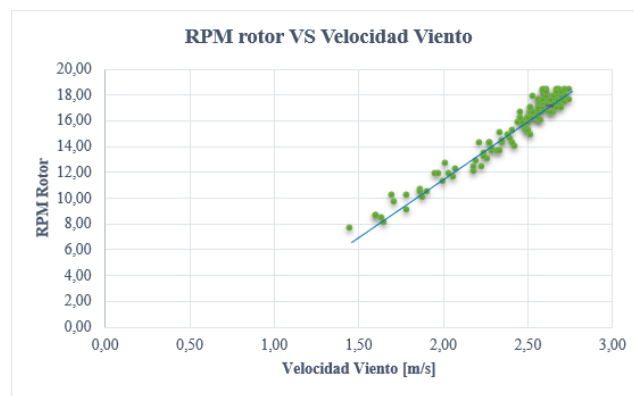
Las pruebas experimentales se realizaron en el barrio San Francisco de la ciudad de Bucaramanga, a una altura aproximada de entre 15 a 20 metros de altura, en un entorno urbano

caracterizado por la numerosa presencia de grandes edificaciones cercanas, la cuales generan condiciones de flujo de viento altamente turbulento e irregular, además de contar con la presencia de túneles o canalizaciones de viento generados por las construcciones cercanas.

Durante la toma de datos se registraron valores de velocidad del viento, RPM del rotor de la turbina y voltaje generado, los cuales fueron utilizados para la contracción de las gráficas presentadas.

### Figura 34

*Grafica RPM del rotor vs Velocidad del viento.*

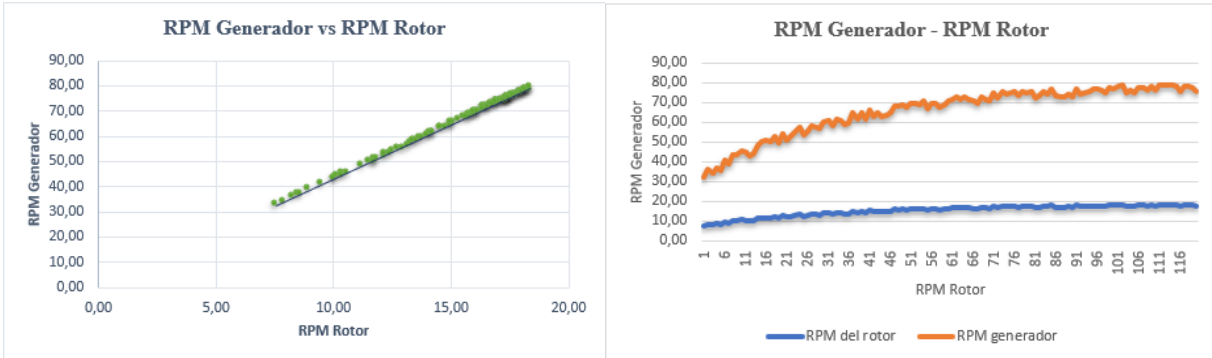


A partir del análisis de la gráfica se puede concluir que la turbina presenta un comportamiento estable y predecible dentro del rango de velocidades de operación. Se logra observar una tendencia creciente aproximadamente lineal entre la velocidad y las RPM.

El comportamiento observado corresponde a las condiciones de operación real, donde actúan fuerzas de rozamiento, el torque de resistencia del generador, pérdidas asociadas a la transmisión por cadena y variaciones de la velocidad del flujo. La dispersión de puntos alrededor de la línea de tendencia se atribuye principalmente a los factores mencionados, sin embargo, la consistencia de los valores obtenidos confirma un régimen de operación estable.

**Figura 35**

*Graficas de RPM del generador vs RPM del rotor.*



La transmisión mecánica entre el rotor y el generador eléctrico se realiza mediante un sistema de transmisión por cadena de dos etapas, con una relación de 4.3:1. El objetivo de esta transmisión es incrementar la velocidad de rotación del generador para cumplir con los requerimientos de operación de este.

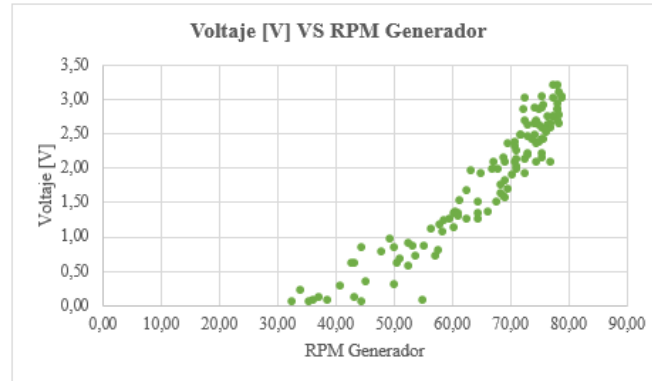
Aunque la relación geométrica de la transmisión es de 4.3:1, la presencia de pérdidas por fricción en la cadena, los piñones y demás elementos del sistema reduce la eficiencia del sistema, por lo que la relación de transmisión efectiva se estima aproximadamente en 3.9:1.

La grafica de RPM del generador VS RPM del rotor permite evidenciar una relación lineal definida, esto confirma que la transmisión por cadena seleccionada mantiene una relación constante a lo largo del rango de operación, validando el diseño y correcta implementación del sistema de transmisión de dos etapas.

Por otra parte, la gráfica de evolución conjunta de las RPM permite observar que ambas variables presentan un aumento progresivo y proporcional durante la operación de la turbina. Las fluctuaciones observadas se atribuyen a los factores mencionado anteriormente.

**Figura 36**

*Grafica de Voltaje VS RPM del generador.*



La grafica presenta la relación entre el voltaje y las RPM del generador, esta permite observar una tendencia creciente definida, lo que indica que el voltaje de salida aumenta conforme incrementa la velocidad de rotación del generador. Este comportamiento se relaciona directamente con el principio de funcionamiento de los generadores eléctricos.

Al observar en el rango de bajas RPM se aprecia un voltaje cercano a cero, lo cual se atribuye a la necesidad de superar el torque de resistencia del generador y perdidas dentro del sistema. Una vez superado este límite, el incremento del voltaje con las RPM se comporta de manera aproximadamente lineal.

### **6.3 Discusión de Resultados Experimentales**

Las diferencias observadas entre los valores teóricos y experimentales se explican principalmente por el carácter no ideal de las condiciones reales de operación del sistema. Mientras que los modelos teóricos asumen un flujo uniforme y constante con pérdidas despreciables, la gráfica experimental de RPM del rotor en función de la velocidad del viento

evidencia la influencia directa de las variaciones del viento urbano, manifestada en la dispersión de los datos y valores de rotación inferiores a los estimados teóricamente.

El análisis de la relación entre las RPM del generador vs RPM del rotor muestra un comportamiento lineal, lo que confirma el correcto funcionamiento del sistema de transmisión. Sin embargo, la pendiente de la curva y el nivel máximo de RPM alcanzado indican la presencia de pérdidas mecánicas significativas asociadas a la fricción en rodamientos, la transmisión por cadena y posibles desalineamientos del sistema. Estas pérdidas resultan críticas debido al bajo torque disponible del rotor.

Por otra parte, el voltaje en función de las RPM del generador evidencia que, a bajas velocidades de rotación, el generador presenta una eficiencia reducida, lo que confirma que las pérdidas eléctricas son predominantes en el proceso de generación. Adicionalmente, las pérdidas aerodinámicas derivadas del flujo urbano turbulento influyen directamente en la reducción del torque efectivo del rotor, aunque estas se reducen parcialmente debido al diseño del perfil seleccionado, al número de etapas y la inclusión de deflectores.

De acuerdo con lo anterior, las pérdidas mecánicas y eléctricas son predominantes en el sistema, explicando así las variaciones entre los resultados teóricos y experimentales, sin comprometer la viabilidad del prototipo como sistema de microgeneración eólica.

## 7 Criticidad y Mantenimiento Turbina Savonius

El análisis de criticidad es una herramienta fundamental en la ingeniería que se usa para identificar los componentes que conforman un sistema mecánico y cuya falla genera mayor impacto en la operación, la seguridad, costos de mantenimiento y confiabilidad del equipo. Este análisis permite priorizar acciones preventivas y optimizar recursos técnicos y económicos.

En generadores eólicos de pequeña escala, como la desarrollada en el presente proyecto, el análisis de criticidad es fundamental debido a la interacción de componentes mecánicos y estructurales. La identificación de componentes críticos del sistema permite comprender el comportamiento del sistema ante la aparición de posibles fallas, anticipación de riesgos operativos y estrategias o planes de mantenimiento adecuados para garantizar el funcionamiento correcto del sistema.

En este capítulo se presenta el análisis de criticidad de la turbina Savonius construida, utilizando la metodología de ponderación de criterios tales como la frecuencia de falla, impacto operativo, flexibilidad operativa, costo de mantenimiento y el impacto en la seguridad y el medio ambiente. Adicionalmente, se clasifican los componentes del sistema según su nivel de criticidad, lo que proporciona una base sólida para la toma de decisiones en el mantenimiento y operación del sistema.

La asignación de los ponderados para cada uno de los factores necesarios para el desarrollo se presenta en la siguiente tabla.

### **Tabla 11**

*Ponderados para el análisis de criticidad.*

Tabla de Ponderados		
Impacto en Seguridad, Higiene y Medio Ambiente (Sha)	No produce	1
	Si produce	2
Costo de Mantenimiento (Cm)	\$0 - \$100.000	1
	\$100.000 - \$500.000	2
	> \$500.000	4
Flexibilidad Operacional (Fo)	Repuesto listo para instalar	1
	Repuesto de facil adquisicion	2
	Repuesto no disponible	3
Impacto Operacional (Io)	Impacto entre 1% - 25%	1
	Impacto entre 26% - 50%	2
	Impacto entre 51% - 75%	4
	Impacto entre 76% - 100%	6
Frecuencia de Falla (Ff)	1 falla por año	1
	2 - 3 fallas por año	2
	4 - 5 fallas por año	4
	6 o mas fallas por año	6

De acuerdo con la información recopilada, se realiza la asignación de los valores correspondientes a cada uno de los factores para los elementos identificados en el sistema de

**Tabla 12**

*Análisis de componentes críticos.*

Análisis de Componentes Críticos						
Nº	Elementos	Ff	Io	Fo	Cm	Sha
1	Rodamientos	2	6	2	1	1
2	Cadenas	2	6	2	1	1
3	Piñones	1	4	2	1	1
4	Coronas	1	4	2	1	1
5	Tensores	1	2	2	1	1
6	Tornillos de Eje	1	4	2	1	1
7	Tornillos Estructura de Generación	1	2	2	1	1
8	Acople de Ejes	1	6	3	1	1
9	Generador	1	6	3	2	1
10	Rotor	1	6	3	2	1
11	Estructura	1	6	3	2	1
12	Ruedas de Transporte	1	1	2	1	1
13	Paradas Deflectoras	2	1	3	1	1
14	Eje del Rotor	1	6	3	2	1
15	Ejes Sistema de Transmisión	1	6	3	1	1

*Nota.* La tabla de análisis de componentes críticos se realizó a partir de la tabla 10.

Según los valores asignados a cada uno de los factores, se calcula el valor de consecuencia de falla (C) y criticidades correspondientes a cada uno de los elementos del sistema mediante la siguiente ecuación.

$$C = Sha + Cm + (Fo * Io) \quad (52)$$

$$Criticidad = Ff * C \quad (53)$$

**Tabla 13**

Valores de consecuencia de falla (C) y criticidad.

Nº	Elementos	Ff	C	CTR
1	Rodamientos	2	14	28
2	Cadenas	2	14	28
3	Piñones	1	10	10
4	Coronas	1	10	10
5	Tensores	1	6	6
6	Tornillos de Eje	1	10	10
7	Tornillos Estructura de Generacion	1	6	6
8	Acople de Ejes	1	20	20
9	Generador	1	21	21
10	Rotor	1	21	21
11	Estructura	1	21	21
12	Ruedas de Transporte	1	4	4
13	Paredes Deflectoras	2	5	10
14	Eje del Rotor	1	21	21
15	Ejes Sistema de Transmision	1	20	20

De acuerdo con los valores de criticidad obtenidos, se define la clasificación de criticidad adoptada, donde se establecen tres niveles en función de dicho valor. Los elementos clasificados como Muy Críticos (MC) corresponden a los componentes cuya falla puede generar una interrupción grave en el proceso, comprometiendo la seguridad o la operatividad del equipo; los Críticos (C) corresponden a elementos cuya falla afecta el rendimiento del equipo, pero no lo detiene por completo, por lo que es necesario monitorearlos y planificar mantenimientos y por ultimo los No Críticos (NC) corresponden a los elementos cuya falla tiene un impacto mínimo en la operación del equipo. Su mantenimiento es de baja prioridad y pueden ser reemplazadas o reparadas sin afectar significativamente la operación.

**Tabla 14**

*Clasificación de criticidad.*

Categoría	Descripción	Rango
Muy Crítico [MC]	Falla frecuente o consecuencias graves al sufrir averías. Se requiere atención prioritaria.	> 20
Crítico [C]	Falla moderada e impacto moderado al sufrir averías. Se requiere de gestión activa.	10 – 20
No Crítico [NC]	Bajo impacto y falla poco frecuente. Se requiere mantenimiento básico preventivo.	< 10

### 7.1 Matriz de criticidad

La matriz de criticidad presenta los resultados detallados de la evaluación cuantitativa de cada componente. Esta se encarga de consolidar la clasificación previamente obtenida y permite visualizar como los elementos del sistema acumulan mayor riesgo mediante las clasificaciones definidas.

**Tabla 15**

*Matriz de criticidad.*

MATRIZ CRITICIDAD	CONSECUENCIAS																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
F. FALLA	6																				
	4																				
	2													1,2							
	1				12		5,7				3,4,6,13									8,15	9,10,11,14

*Nota.* Se elabora a partir de los valores de criticidad obtenidos.

**Tabla 16**

*Resultado matriz de criticidad.*

Nº	Elementos	Categoría
1	Rodamientos	MC
2	Cadenas	MC
9	Generador	MC
10	Rotor	MC
11	Estructura	MC
14	Eje del Rotor	MC
3	Piñones	C
4	Coronas	C
6	Tornillos de Eje	C
8	Acople de Ejes	C
13	Paredes Deflectoras	C
15	Ejes Sistema de Transmision	C
5	Tensores	NC
7	Tornillos Estructura de Generacion	NC
12	Ruedas de Transporte	NC

La tabla 16 presenta la clasificación final de criticidad de los 15 componentes principales del sistema general de la turbina eólica. Mediante el análisis de esta, se identifican 6 componentes muy críticos, 6 componentes críticos y 3 componentes no críticos.

## 7.2 Modelo de mantenimiento

Con base en los resultados del análisis de criticidad, se establece un modelo de mantenimiento dirigido a garantizar la seguridad, disponibilidad y confiabilidad de la turbina eólica. Adicionalmente, se definen las actividades específicas para cada componente del sistema, priorizando los elementos con una falla de impacto económico y operativo considerablemente mayor.

El modelo propuesto aplica fundamentos de mantenimiento preventivo y correctivo, seleccionados de acuerdo con el nivel de criticidad correspondiente a cada uno de los componentes de la turbina eólica.

Tabla 17

*Modelo de mantenimiento planteado.*

Componentes Muy Críticos				
Componentes	Actividad de mantenimiento	Tipo de mantenimiento	Frecuencia de mantenimiento	Observaciones
Rodamientos	Inspección de ruido, holgura y presencia de corrosión. Lubricación o Reemplazo.	Preventivo Correctivo	Mensual	El desgaste excesivo del rodamiento puede generar fallas en el eje y para total del sistema de generación
Cadenas	Inspección tensión, alineación y holgura. Lubricación o Reemplazo.	Preventivo Correctivo	Mensual	El alargamiento de la cadena genera pérdidas de transmisión. La no lubricación de la cadena genera endurecimiento de la misma
Generador	Inspección de conexiones eléctricas, voltaje y temperatura. Lubricación del eje y ajuste.	Preventivo	Trimestral	Componente de alto costo y alto impacto operativo.
Rotor	Inspección visual de fisuras y deformaciones. Ajuste elementos de sujeción	Preventivo	Trimestral	El desbalance y roturas o fisuras en los alabes y bases, genera vibraciones y pérdidas la rotación.
Estructura	Inspección de corrosión, fisuras, deformaciones y estabilidad.	Preventivo	Semestral	Las fallas estructurales representan un riesgo para la seguridad de la turbina.
Eje del Rotor	Inspección de alineación, desgaste y fisuras.	Preventivo	Trimestral	La falla del eje representa una pérdida total de generación.

Componentes Críticos				
Piñones	Inspección desgaste, dientes y alineación. Lubricación o Reemplazo.	Preventivo Correctivo	Trimestral	El desgaste progresivo del piñón afecta la eficiencia de la transmisión.
Coronas	Inspección desgaste, dientes y alineación. Reemplazo.	Preventivo Correctivo	Trimestral	Trabajan en conjunto con los piñones.
Tomillos de Eje	Verificación de apriete y fijación.	Preventivo	Trimestral	El desajuste puede generar fallas catastróficas en el sistema.
Acople de Ejes	Inspección de desgaste y alineación. Ajuste elementos de sujeción	Preventivo	Trimestral	El desajuste y desalineación transmite vibraciones y genera resistencia.
Paredes Deflectoras	Inspección de deformaciones y fijaciones a la estructura.	Preventivo	Semestral	Afectan el rendimiento aerodinámico de la turbina.
Ejes Sistema de Transmisión	Inspección de alineación y desgaste.	Preventivo	Trimestral	La falla del eje representa una pérdida total de generación.

Componentes No Críticos				
Tensores	Inspección desgaste y ajuste. Lubricación o Reemplazo.	Preventivo Correctivo	Semestral	Fácil reemplazo y bajo costo, bajo impacto operativo.
Tomillos Estructura de Generación	Revisión de de apriete y ajuste.	Preventivo	Semestral	La falla de estos no detiene el sistema de forma inmediata.
Ruedas de Transporte	Verificación de apriete y fijación.	Preventivo	Trimestral	No influyen en la generación de energía.

*Nota.* Se elabora a partir de la información relacionada con la criticidad y los datos obtenidos.

## 8 Evaluación Económica

El presente capítulo muestra la evaluación económica del sistema de generación eólica enfocado a la reducción del consumo eléctrico del sistema de iluminación de una vivienda residencial. A diferencia de proyectos orientados a la comercialización de energía, este análisis se enfoca en el ahorro generado por la sustitución parcial del consumo suministrado por la red.

Para este análisis se consideraron los costos relacionados con el desarrollo e implementación y también los beneficios económicos derivados de la producción de energía durante la vida útil del dispositivo estimada en 20 años. Este análisis se realiza bajo el contexto del costo de la tarifa energética en Bucaramanga-Santander, teniendo en cuenta el crecimiento anual del costo de la energía y una tasa de descuento representativa del valor del dinero en el tiempo.

Esta evaluación utiliza indicadores financieros ampliamente utilizados en proyectos de ingeniería, tales como Payback, VPN y TIR, los cuales permiten establecer de manera objetiva si el sistema propuesto es económicamente viable para la autogeneración de energía.

La tabla de datos de entrada reúne los parámetros técnicos y económicos utilizados en la evaluación financiera del proyecto de generación eólica. La inversión inicial de este corresponde al precio de la turbina de \$2'361.569 COP con un margen de ganancia de 20% y la implementación completa del sistema.

### **Tabla 18**

*Presupuesto de fabricación y Margen de ganancia de la turbina.*

Categoría	Descripción	Costo total
Materiales de fabricación	Incluye los materiales consumibles y estructurales necesarios para la construcción prototipo, tales como tornillería, perfiles de acero, fibra de vidrio, resinas, catalizadores, pintura, materiales de fabricación de moldes y otros insumos y materiales utilizados en los procesos de manufactura.	\$ 923.831
Insumos para herramientas	Incluye los elementos consumibles asociados al uso de herramientas durante la fabricación y ensamble del prototipo, tales como lijas, brocas, discos de corte, discos de desbaste y otros accesorios necesarios para los procesos de mecanizado.	\$ 127.800
Componentes mecánicos	Corresponde a los elementos mecánicos del sistema de transmisión y soporte de la turbina, esto incluye ejes, chumaceras, cadenas, piñones y coronas, acoples y demás componentes encargados de la transmisión de movimiento.	\$ 208.000
Componentes Electricos	Comprende los dispositivos electrónicos necesarios para el control, monitoreo y generación de la energía, tales como el generador de imanes, controlador de carga WT060, sensores, cableado, protecciones, entre otros elementos usados en el sistema eléctrico y electrónico.	\$ 708.365
Software de diseño y simulación	Para este apartado se usaron software para el diseño, modelado y análisis del sistema, tales como SolidWorks y ANSYS en su versión student gratuita, por lo que no representan un gasto por licenciamiento.	\$ -
Margen de ganancia esperado (%)	Representa un porcentaje adicional aplicado sobre los costos directos del proyecto, esto con el fin de estimar un escenario de comercialización del prototipo, considerando la posible venta o replicación del sistema.	\$ 393.599
TOTAL		\$ 2.361.596

**Tabla 19**

*Datos necesarios para la evaluación económica del proyecto.*

VALOR TURBINA	\$ 2.361.596,00	COP
Producción promedio	10	W
Horas de operación	18	horas
Producción promedio día	180	Wh/día
Días de producción	365	días
Producción prom. anual	65700	Wh/año
Producción prom. anual	65,7	KWh/año
Precio del KW	\$ 757,53	COP
Ingreso por energía anual	\$ 49.769,72	COP/año
Incremento anual	15%	
Costo de mitto. anual	\$ 25.000,00	COP
Tasa de descuento	4%	
Vida útil	20	años

*Nota.* Tabla elaborada a partir de los resultados obtenidos en apartados anteriores.

El sistema presenta una potencia promedio de 10 W y un tiempo de operación al día de 18 horas, generado así una producción eléctrica de 180Wh/día y una producción anual de 65.7 kWh.

Para la valoración económica se adopta un precio establecido para el año 2026 por la electrificadora de Santander (ESSA) de 757.53 para hogares de estrato 3 en la ciudad, representando así un ahorro anual de \$49.769.72 COP. Adicionalmente, se considera un incremento anual de la tarifa de energía del 15 %, valor correspondiente a los incrementos entre

los años 2020 y 2024 y un costo de mantenimiento anual de \$25.000 COP, el cual es consistente con sistemas de baja escala.

La tasa de descuento del 4% se selecciona debido a que el proyecto no corresponde a una iniciativa de venta de energía, ni una iniciativa comercial pública, sino a un proyecto privado de autoconsumo. Dicho esto, el riesgo financiero es relativamente bajo, ya que los beneficios económicos se materializan en forma de ahorros discretos y estables en el pago de la factura eléctrica.

### Tabla 20

*Resultados del análisis económico del proyecto.*

VPN	\$324.026,78	VIABLE
VAN	\$23.842,46	VIABLE
VFN	\$709.982,58	VIABLE
Rb/c	1,137	VIABLE
TIR	5%	VIABLE
Tiempo de recuperación	20	

*Nota.* Valores obtenidos a partir de la evaluación económica realizada.

Los resultados de la evaluación económica confirman la viabilidad financiera del proyecto, a pesar de tratarse de un sistema de baja potencia destinado al autoconsumo. El VPN de \$324.026 COP y el VAN de \$23.842 COP son positivos, esto indica que los ahorros generados por la producción energética durante la vida útil del sistema, superan los costos de inversión y mantenimiento.

El VFN de \$709.982 COP, permite evidenciar un beneficio económico significativo al final del periodo de evaluación. Asimismo, la relación beneficio costo de 1.137, la cual es superior a la unidad, demuestra la conveniencia o viabilidad económica del proyecto. La TIR con

un porcentaje de 5%, mayor a la tasa de descuento del 4% demuestra que el proyecto presenta una rentabilidad suficiente para justificar su implementación.

### **8.1 Análisis Crítico de la Viabilidad Económico-Financiera.**

Los resultados del análisis económico evidencian que la rentabilidad financiera del sistema es limitada cuando se evalúa bajo criterios tradicionales de inversión, como proyectos orientados a la venta de energía o maximización del retorno económico. Sin embargo, el comportamiento observado es consistente con la naturaleza del proyecto, el cual no se desarrolló como un sistema de generación a gran escala, sino como una solución de microgeneración eólica para el autoconsumo en entornos urbanos.

De acuerdo con lo anterior, la viabilidad del proyecto no se interpreta exclusivamente desde indicadores financieros clásicos, sino desde un enfoque tecnológico y demostrativo, donde el valor principal radica en el aprovechamiento de un recurso renovable, la reducción parcial del consumo eléctrico, la baja necesidad de mantenimiento y aporte a la sostenibilidad energética en viviendas familiares.

En conclusión, el proyecto presenta una viabilidad económico financiera moderada bajo los criterios exclusivamente monetarios. Sin embargo, resulta viable y pertinente como sistema de apoyo energético para autoconsumo residencial, destacándose principalmente por su aporte al desarrollo tecnológico, ambiental y educativo.

### **8.2 Presupuesto General Del Proyecto.**

A continuación, se muestran los gastos generales del proyecto que incluyen los costos de fabricación y también los costos institucionales, algunos asumidos por la Universidad Industrial de Santander.

**Tabla 21***Presupuesto general del proyecto.*

Categoría	Descripción	Costo Total (COP)		
<b>Materiales de fabricación</b>	Incluye los materiales consumibles y estructurales necesarios para la construcción prototipo, tales como tornillería, perfiles de acero, fibra de vidrio, resinas, catalizadores, pintura, materiales de fabricación de moldes y otros insumos y materiales utilizados en los procesos de manufactura.	\$		923.831
<b>Insumos para herramientas</b>	Incluye los elementos consumibles asociados al uso de herramientas durante la fabricación y ensamble del prototipo, tales como lijas, brocas, discos de corte, discos de desbaste y otros accesorios necesarios para los procesos de mecanizado.	\$		127.800
<b>Componentes mecánicos</b>	Sistema de transmisión (tensores/Cadenas/engranajes)	\$		208.000
<b>Componentes eléctricos</b>	Comprende los dispositivos electrónicos necesarios para el control, monitoreo y generación de la energía, tales como el generador de imanes, controlador de carga WT060, sensores, cableado, protecciones, entre otros elementos usados en el sistema eléctrico y electrónico.	\$		708.365
<b>Margen de ganancia esperado (%)</b>	Representa un porcentaje adicional aplicado sobre los costos directos del proyecto, esto con el fin de estimar un escenario de comercialización del prototipo, considerando la posible venta o replicación del sistema.	\$		393.599
<b>Subtotal</b>		\$		<b>2.361.596</b>
<b>Costos Institucionales</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (COP)</b>	<b>Costo Total (COP)</b>
<b>Costos de Fabricación</b>	Uso de maquinaria, talleres y mano de obra externa	-	\$ 500.000	\$ 500.000
<b>Software</b>	Licencia de software de simulación (CFD)	1	\$ -	\$ -
	Licencia de software de simulación (CAD) para 1 año	1	\$ 249.186,10	\$ 249.186,10
<b>Bibliografía y documentación</b>	Compra de libros, papers e impresión	1	\$ 100.000,00	\$ 100.000,00
<b>Otros costos</b>	Viáticos	1	\$ 100.000,00	\$ 100.000,00
	Asesorías	32	\$ 305.000,00	\$ 9.760.000,00
	Costo de trabajo intelectual de las 2 personas encargadas del proyecto	320	\$ 7.295,00	\$ 4.668.800,00
<b>Subtotal</b>				<b>\$ 15.377.986,10</b>
<b>TOTAL</b>			\$	<b>17.739.581,74</b>

El costo neto del desarrollo del proyecto es de \$17'739.581 COP, este valor contempla los costos de fabricación, insumos para herramientas, componentes eléctricos, margen de ganancia y costos institucionales como asesorías, literatura, software y uso de instalaciones los cuales son solventados por la universidad.

## 9 Conclusiones

El desarrollo del presente proyecto permitió diseñar, construir y evaluar un sistema de generación eólica basado en una turbina Savonius de múltiples etapas con inclusión de deflectores, demostrando su funcionamiento bajo condiciones reales de viento urbano caracterizado por bajos niveles de viento disponible y alta turbulencia. El sistema desarrollado cumple con el objetivo de aportar energía eléctrica como apoyo energético en aplicaciones de iluminación en viviendas, validando su viabilidad técnica dentro del contexto urbano de la ciudad de Bucaramanga.

El análisis del recurso eólico de la ciudad de Bucaramanga evidenció que las velocidades medias del viento son relativamente bajas, lo que limita la generación de energía mediante turbinas eólicas convencionales. Sin embargo, se determinó que el recurso es técnicamente aprovechable mediante estrategias como la selección adecuada del sitio de instalación-, aprovechamiento de efectos de canalización del viento y aumento de la altura del montaje, lo cual justifica el uso de tecnologías de eje vertical orientadas a la microgeneración y apoyo energético.

El diseño de la turbina Savonius de 1m de diámetro y 1.5m de altura, con configuración de múltiples etapas y la incorporación de deflectores, demostró ser una alternativa técnicamente adecuada para el aprovechamiento del viento urbano. La disposición escalonada de las etapas permite obtener un par más uniforme, mientras que los deflectores contribuyen a reducir el torque negativo sobre las palas de retorno, mejorando el desempeño aerodinámico del sistema.

Las pruebas experimentales realizadas evidenciaron que la turbina diseñada es capaz de iniciar su propio giro a bajas velocidades de viento y generar energía eléctrica de forma efectiva, comportamiento característico del tipo de turbina seleccionado. Las diferencias observadas entre los resultados teóricos y experimentales se atribuyen principalmente a pérdidas mecánicas y eléctricas, así como la variabilidad del viento, sin que represente un riesgo ni comprometa la viabilidad funcional del sistema.

La evaluación económica-financiera realizada indica que el sistema de generación eólica propuesto es viable bajo un enfoque de autoconsumo energético y como sistema complementario de apoyo a la red convencional. Los resultados obtenidos muestran que los ahorros obtenidos por la energía generada permiten compensar la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento a lo largo de la vida del sistema.

Sin embargo, el periodo de recuperación es igual a la vida útil del proyecto, lo que evidencia que el desempeño económico del sistema es limitado y que su implementación se justifica principalmente desde un enfoque de reducción progresiva del gasto energético y aprovechamiento de una energía renovable en estos entornos. Dicho esto, los datos obtenidos no muestran un desempeño económico óptimo, pero constituyen una base técnica que puede ser mejorada mediante cambios en el diseño del rotor, en el sistema de canalización y la eficiencia del sistema.

## 10 Limitaciones

El Dimensionamiento de la turbina estuvo limitada por su geometría, la cual estaba enfocada a su instalación en espacios reducidos para facilitar su montaje y adaptabilidad. Como consecuencia, el área efectiva del rotor es limitada, lo cual genera una baja producción de potencia a bajas velocidades porque no genera el torque y velocidad suficiente para incrementar la relación de transmisión y que pueda generar una potencia eléctrica significativa.

La ubicación de los dispositivos de aprovechamiento eólico en entornos urbanas es un factor clave, ya que las grandes edificaciones obstruyen el paso del viento, disminuyendo el potencial eólico y generando altos niveles de turbulencia. Por lo tanto, la instalación de una turbina eólica en pequeñas edificaciones rodeadas por construcciones más altas presenta una baja viabilidad para su instalación, debido a que la turbina no opera bajo condiciones de velocidad y estabilidad de viento requeridas para su adecuado funcionamiento.

El diseño y construcción de una turbina eólica en la ciudad de Bucaramanga se encuentra limitado por las condiciones del potencial eólico disponible, el cual está caracterizado por la velocidad de viento promedio anuales relativamente bajas, así como por una alta variabilidad temporal debido a la influencia del entorno urbano. La presencia de edificaciones y otros obstáculos generan fenómenos de turbulencia, cambios bruscos de dirección y reducción de la velocidad efectiva del viento, lo que restringe la cantidad de energía aprovechada por el sistema.

## 11 Recomendaciones Para Trabajos Futuros

Para mejorar el aprovechamiento de este recurso en entornos urbanos se aconseja estudiar la implementación de dispositivos de canalización del flujo, que permitan incrementar la velocidad del viento incidente sobre el rotor, garantizando que su integración estructural no genere zonas de bloqueo ni efectos de frenado que disminuyan el aprovechamiento del potencial eólico disponible.

Estudiar el comportamiento de arranque de una turbina bajo condiciones de viento urbano, evaluando el torque generado a bajas velocidades y la influencia de la turbulencia, con el fin de optimizar el diseño y desempeño inicial de la turbina.

Estudiar la relación que existe entre altura y diámetro de un rotor que permita identificar las mejores configuraciones que maximicen el torque a bajas velocidades de viento.

Profundizar en el estudio de perfiles de alabes y materiales alternativos, que permitan reducir el peso del rotor y mejorar el arranque y rendimiento de la turbina a bajas velocidades de viento.

Evaluar la implementación de sistema de generación híbridos, integrando la turbina eólica con fuentes fotovoltaicas, con el propósito de mejorar la continuidad del suministro energético en condiciones de baja disponibilidad del viento.

Estudiar el diseño e implementación de una carcasa o recubrimiento aerodinámico integral que incorpore conductos tipo Venturi alrededor del rotor, orientados a acelerar el flujo de aire incidente sin generar pérdidas significativas por fricción o efectos de bloqueo.

### Referencias Bibliográficas

Alcaldía de Bucaramanga, & Concejo Municipal de Bucaramanga. (2014). Plan de ordenamiento territorial de Bucaramanga 2014-2027 (Acuerdo 011 de 2014).

<https://www.bucaramanga.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/POT-2014-2027.pdf>

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (9.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.

Corficolombiana. (2024, septiembre 30). Una mirada a la evolución tarifaria de la energía.

<https://investigaciones.corfi.com/documents/38211/0/30-09-2024.-Perspectiva-sectorial-tarifas-de-energia.pdf>

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2020). Informe de recursos 2020. <http://caracoli.cdmb.gov.co>

DeChant, L., Ray, J., Lefantzi, S., Ling, J., & Arunajatesan, S. (2016). K- $\epsilon$  turbulence model parameter estimates using an approximate self-similar jet-in-crossflow solution (SAND2016-11530C). Sandia National Laboratories.

ESSS. (s.f.). Dinámica de fluidos computacional: ¿Qué es?

<https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., & Carissimo, B. (Eds.). (2007). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment (COST Action 732). COST Office.

Galvis, A. F., & Lozano Gómez, S. (2023). Simulación en una turbina Savonius implementando las herramientas de CFD para la producción de energía en ríos [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/0d868cb5-dc6a-47cf-8d24-c098ee5d5d27/content>

Gallo Jaramillo, L. A., Chica Arrieta, E. L., & Flórez Serrano, E. G. (2022). Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad. *Ingeniería*, 27(1), e18127. <https://doi.org/10.14483/23448393.18127>

Instituto de Investigaciones Energéticas y Simulación. (s.f.). ¿Qué es la energía eólica, cómo se transforma en electricidad y cuáles son sus ventajas? <https://www.iies.es/single-post/qu%C3%A9-es-la-energ%C3%ADa-e%C3%B3lica-c%C3%B3mo-se-transforma-en-electricidad-y-cu%C3%A1les-son-sus-ventajas>

Liu, S., Zhang, L., Lu, J., Zhang, X., Wang, K., Gan, Z., Liu, X., Jing, Z., Cui, X., & Wang, H. (2025). Advances in urban wind resource development and wind energy harvesters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114943. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.114943>

Prabowoputra, D. M., & Prabowo, A. R. (2022). Effect of the phase-shift angle on the vertical axis Savonius wind turbine performance as a renewable-energy harvesting instrument. *Energy Reports*, 8, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.092>

SkyCiv Engineering. (s.f.). ¿Qué es el momento flector?

<https://skyciv.com/es/docs/tutorials/beam-tutorials/what-is-bending-moment/>

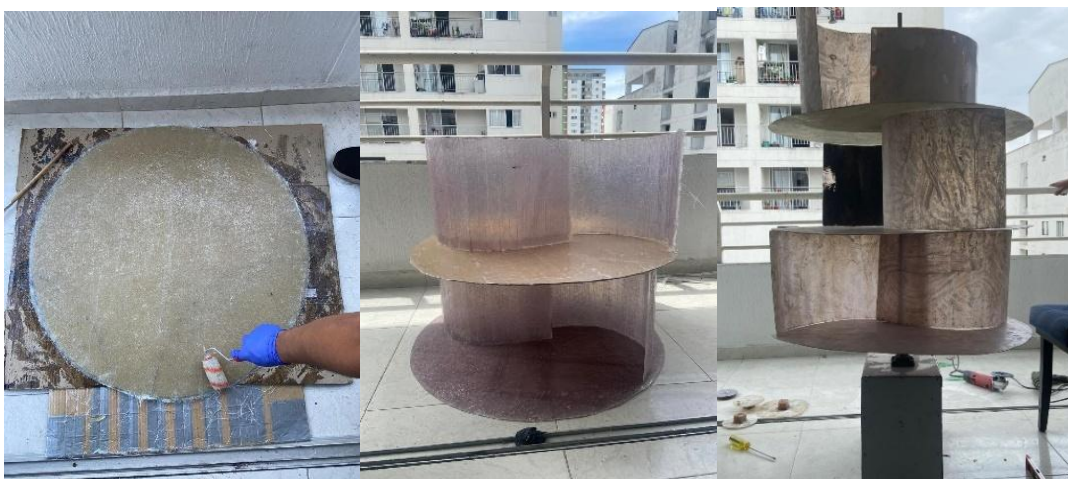
Vergara-Barrios, J., et al. (2014). Análisis estadístico del potencial solar y eólico en el campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga. *Revista UIS Ingenierías*, 13(1), 49–57.

Villarrubia López, M. (2020). *Ingeniería de la energía eólica*. Alfaomega; Marcombo.

Wang, X., Foo, J. S., Fazlizan, A., Chong, W., & Wong, K. (2024). Effects of endplate designs on the performance of Savonius vertical axis wind turbine. *Energy*, 310, 133205.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133205>

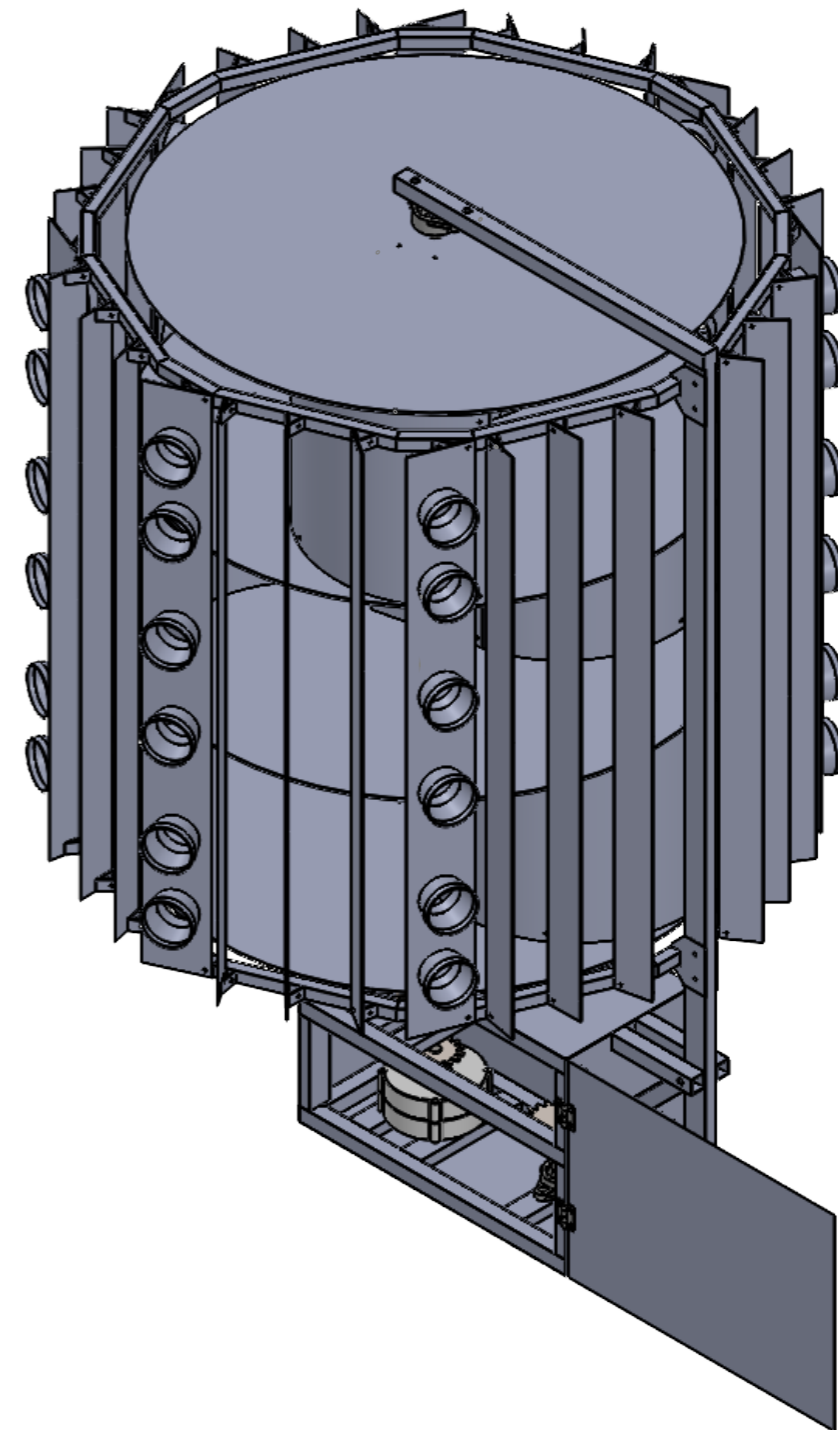
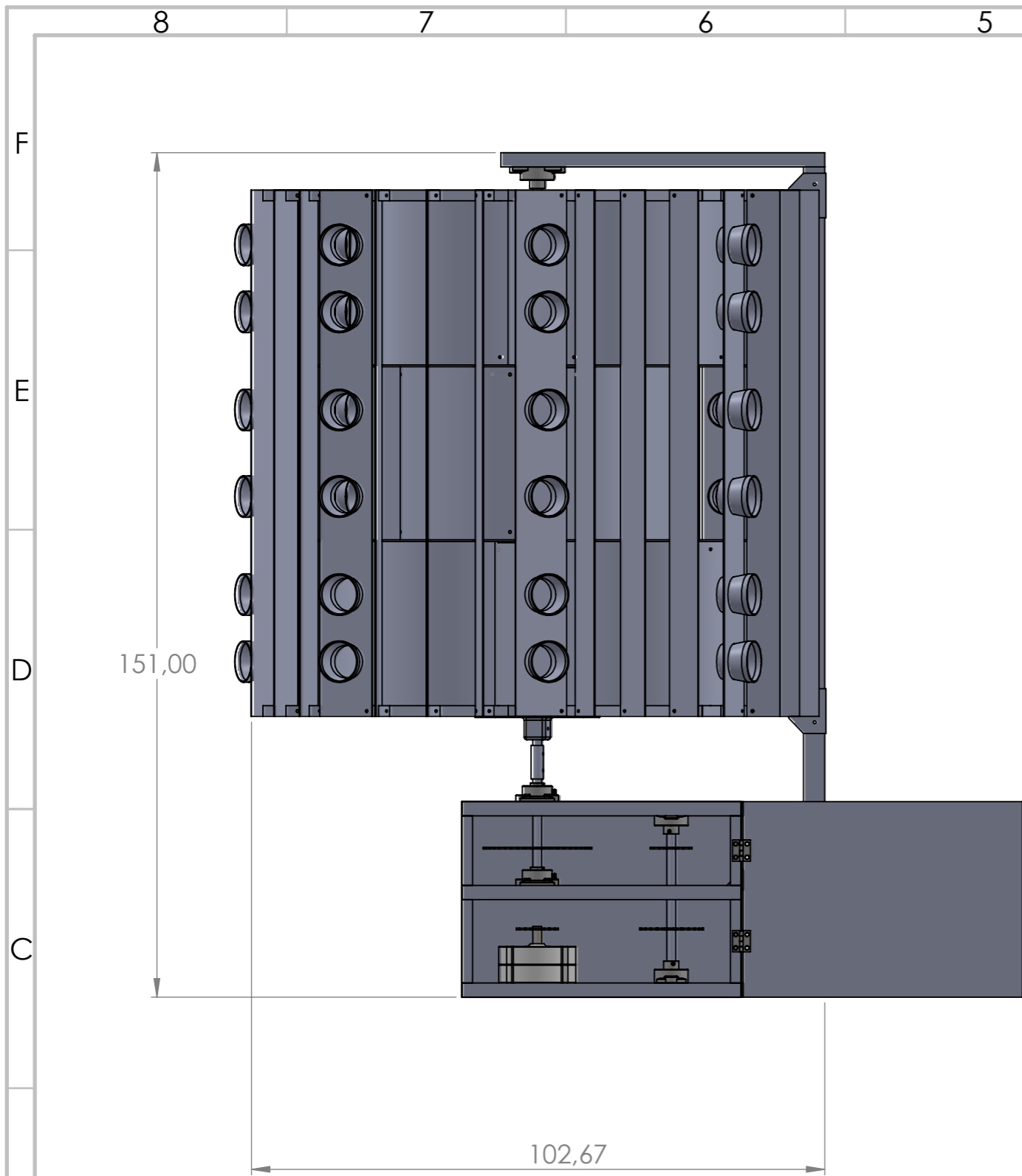
Apéndice

Apéndice A. Evidencias construcción del prototipo.

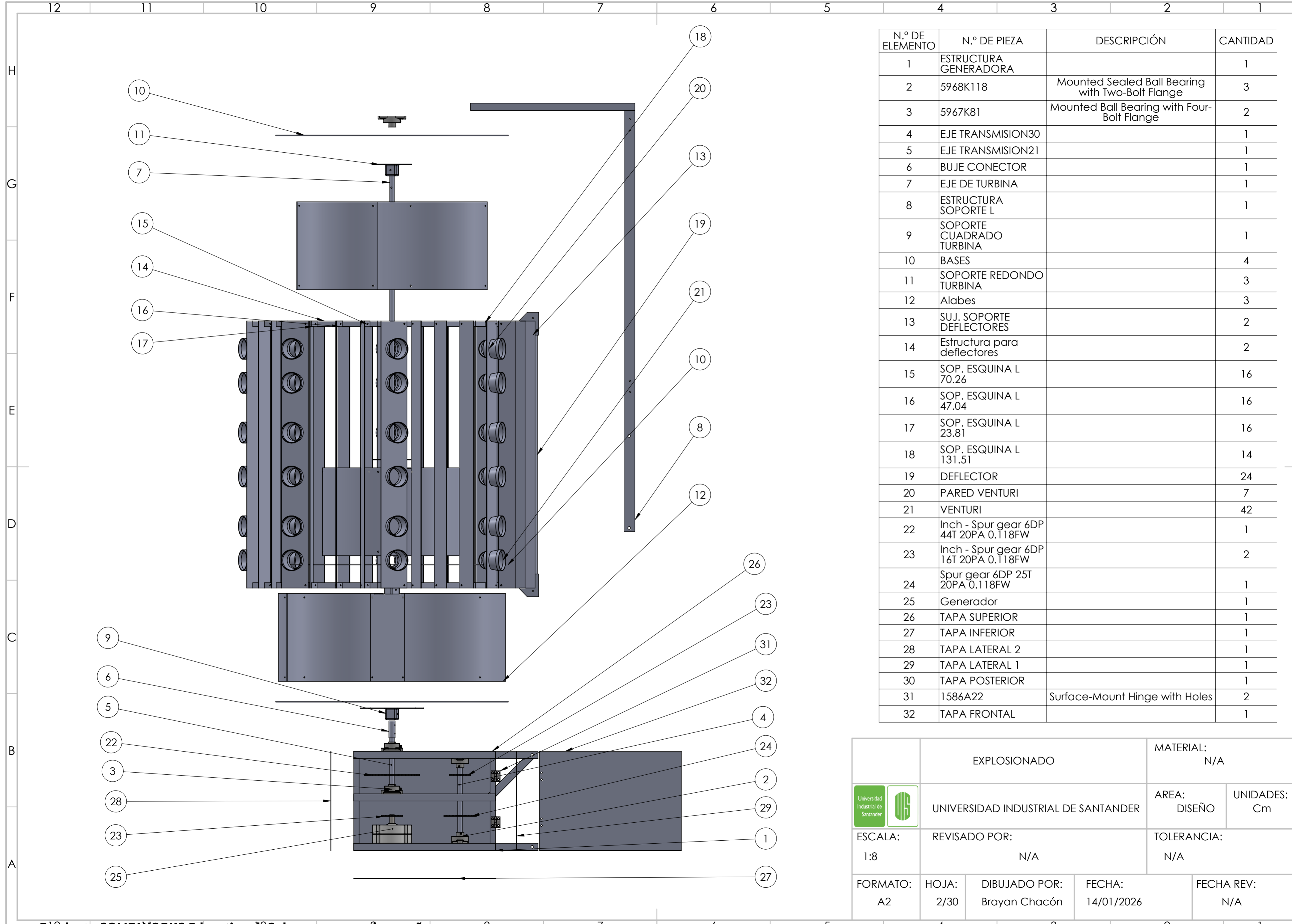




**Apéndice B.** *Planos CAD turbina Savonius.*



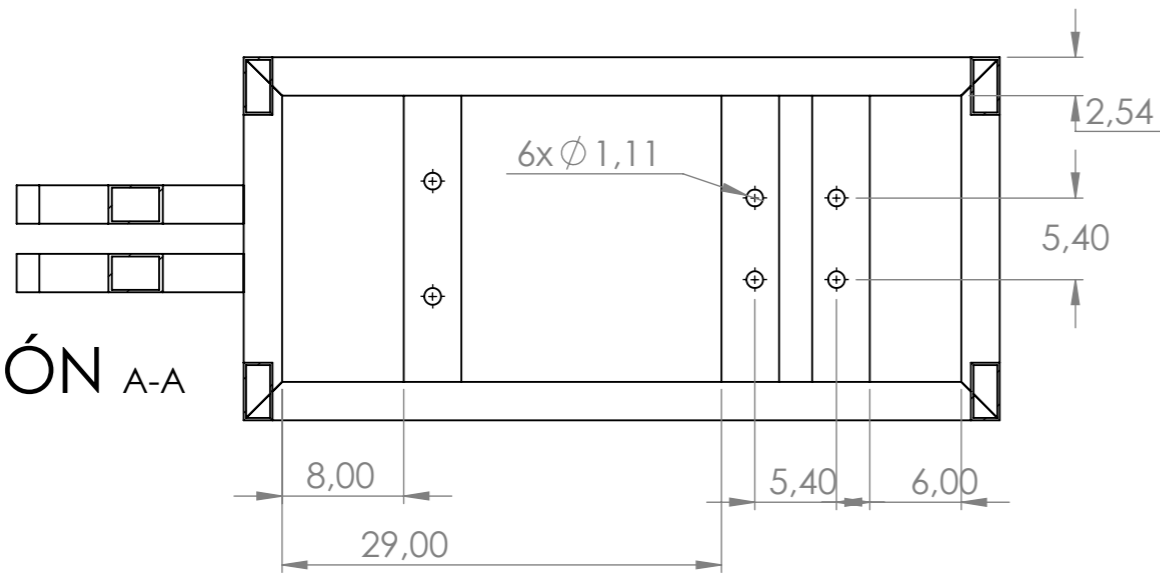
		ENSAMBLE DE LA TURBINA		MATERIAL: Material <sin especificar>	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:10	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A		
FORMATO: A3	HOJA: 1/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	



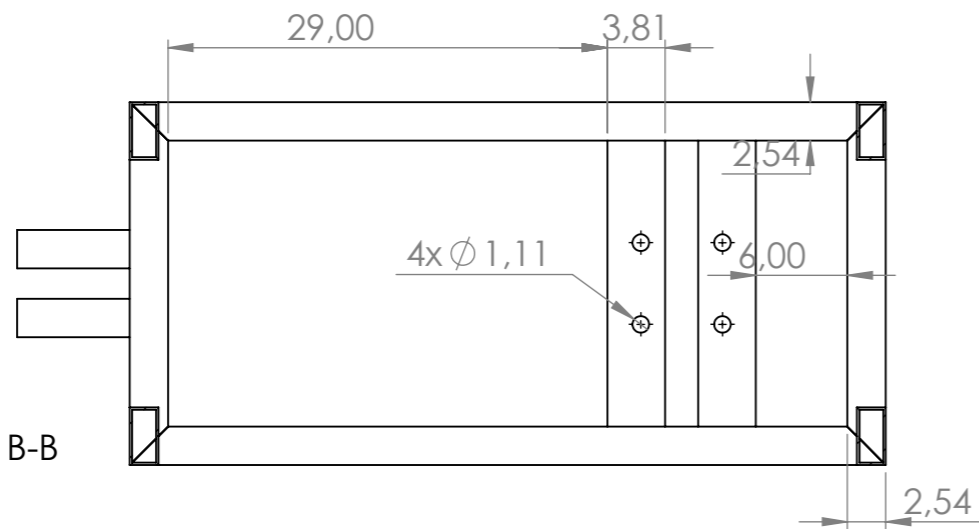
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	ESTRUCTURA GENERADORA		1
2	5968K118	Mounted Sealed Ball Bearing with Two-Bolt Flange	3
3	5967K81	Mounted Ball Bearing with Four-Bolt Flange	2
4	EJE TRANSMISION30		1
5	EJE TRANSMISION21		1
6	BUJE CONECTOR		1
7	EJE DE TURBINA		1
8	ESTRUCTURA SOPORTE L		1
9	SOPORTE CUADRADO TURBINA		1
10	BASES		4
11	SOPORTE REDONDO TURBINA		3
12	Alabes		3
13	SUJ. SOPORTE DEFLECTORES		2
14	Estructura para deflectores		2
15	SOP. ESQUINA L 70.26		16
16	SOP. ESQUINA L 47.04		16
17	SOP. ESQUINA L 23.81		16
18	SOP. ESQUINA L 131.51		14
19	DEFLECTOR		24
20	PARED VENTURI		7
21	VENTURI		42
22	Inch - Spur gear 6DP 44T 20PA 0.118FW		1
23	Inch - Spur gear 6DP 16T 20PA 0.118FW		2
24	Spur gear 6DP 25T 20PA 0.118FW		1
25	Generador		1
26	TAPA SUPERIOR		1
27	TAPA INFERIOR		1
28	TAPA LATERAL 2		1
29	TAPA LATERAL 1		1
30	TAPA POSTERIOR		1
31	1586A22	Surface-Mount Hinge with Holes	2
32	TAPA FRONTAL		1

	EXPLOSIONADO		MATERIAL: N/A	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:8	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A2	HOJA: 2/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A

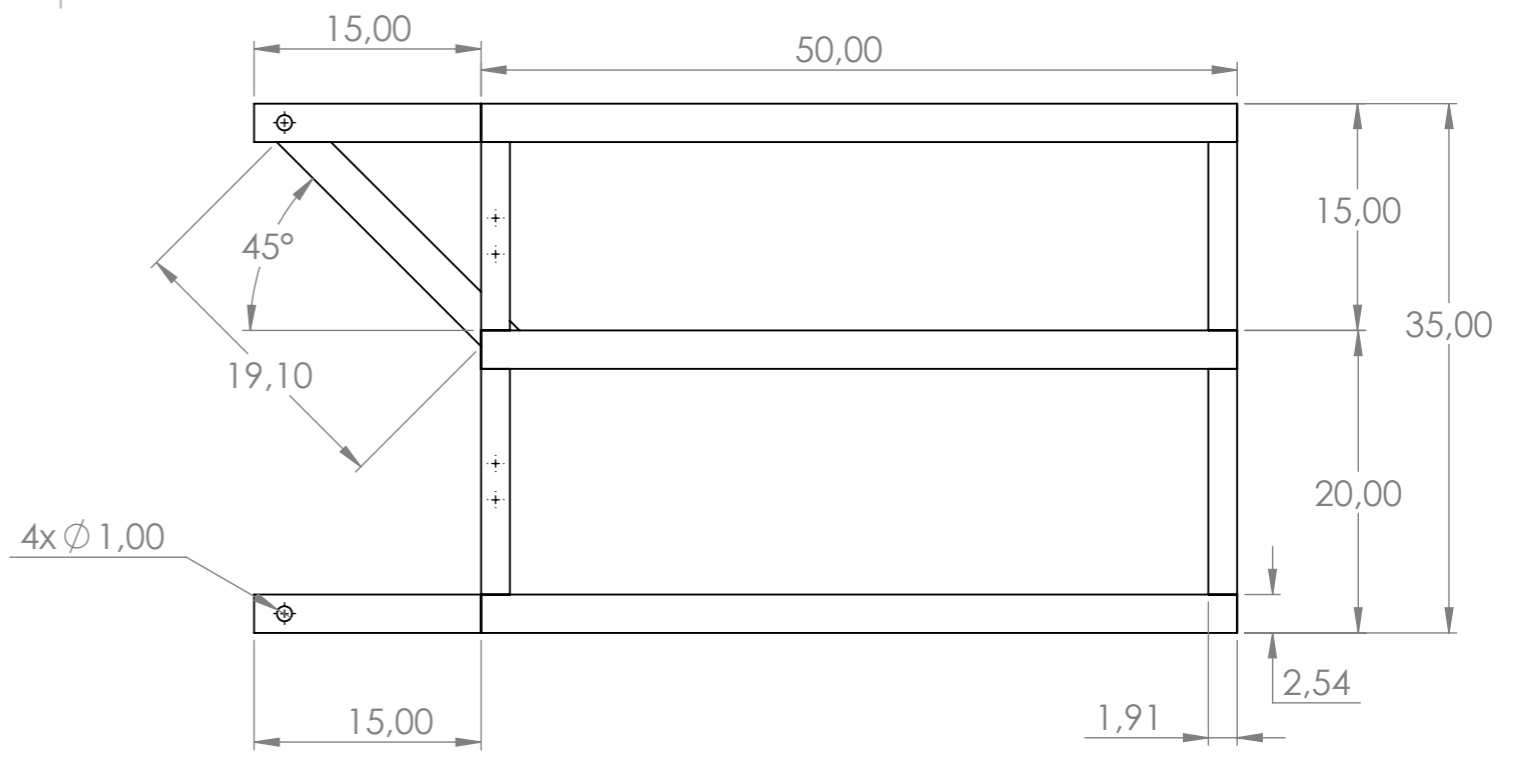
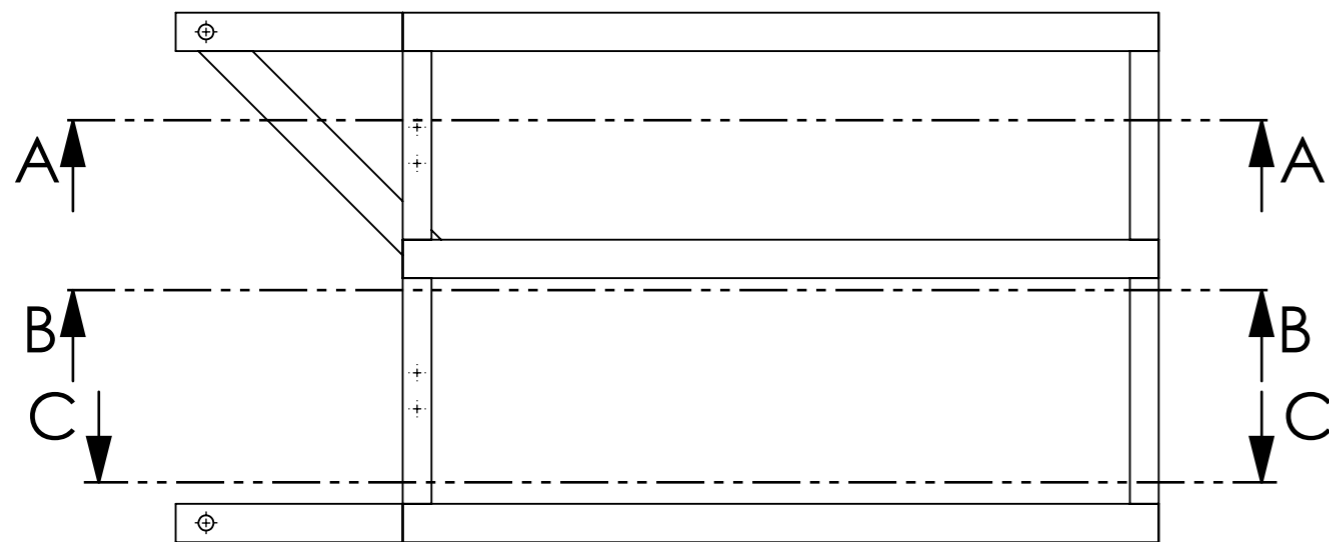
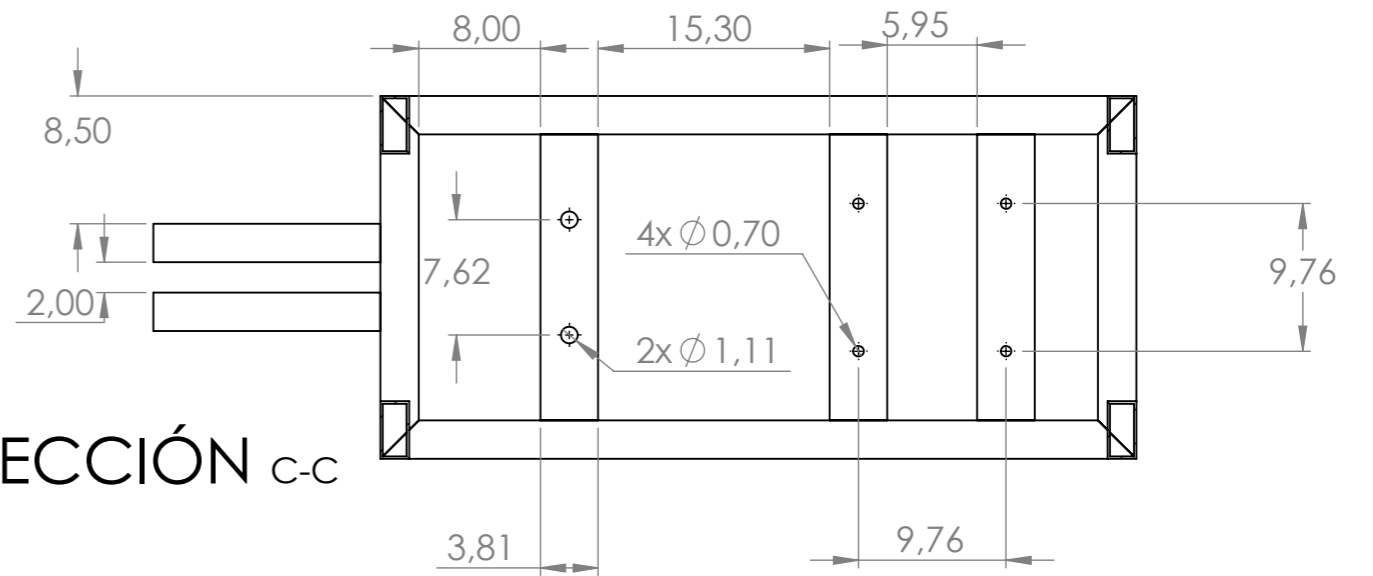
SECCIÓN A-A




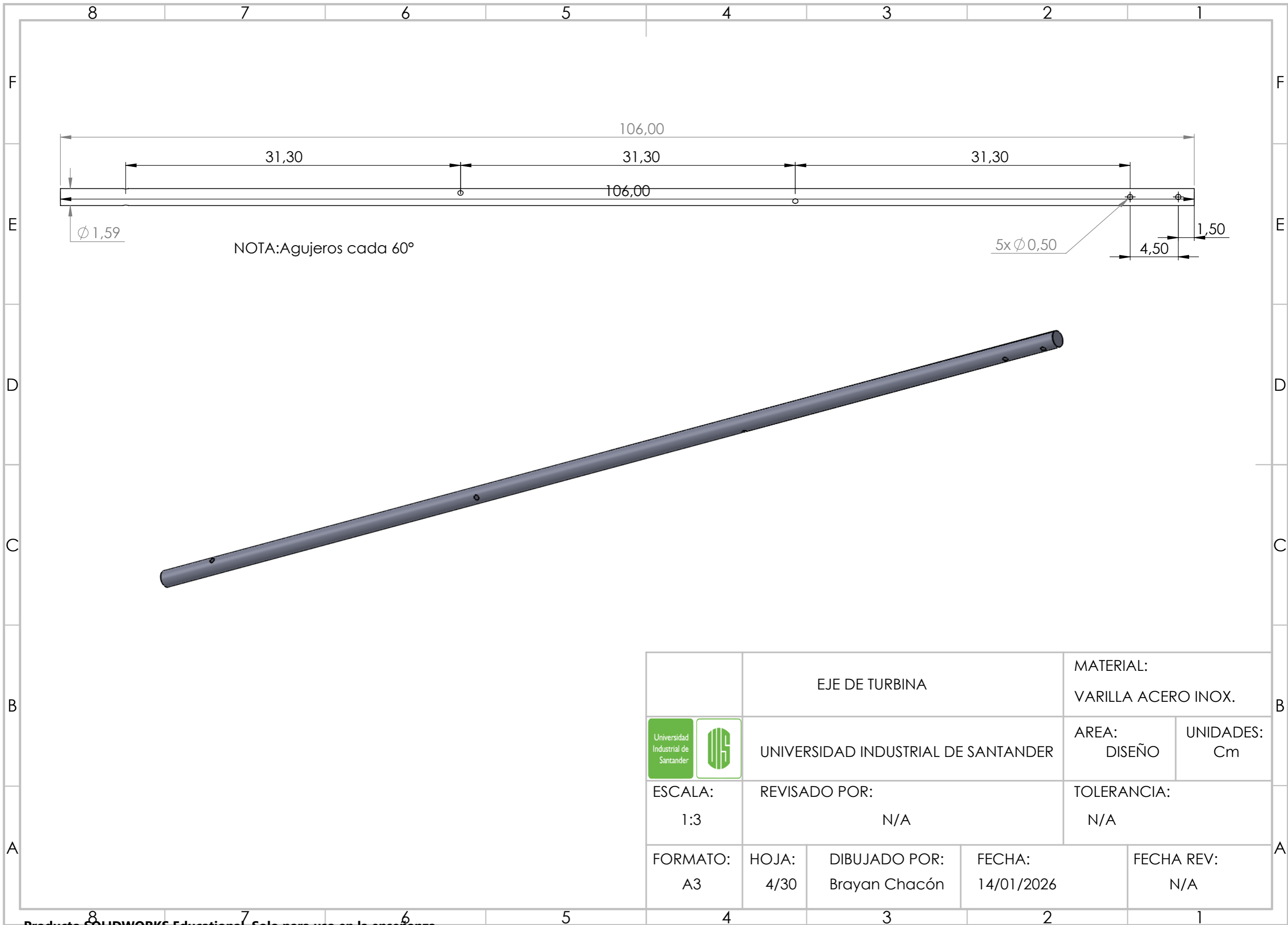
SECCIÓN B-B



SECCIÓN C-C





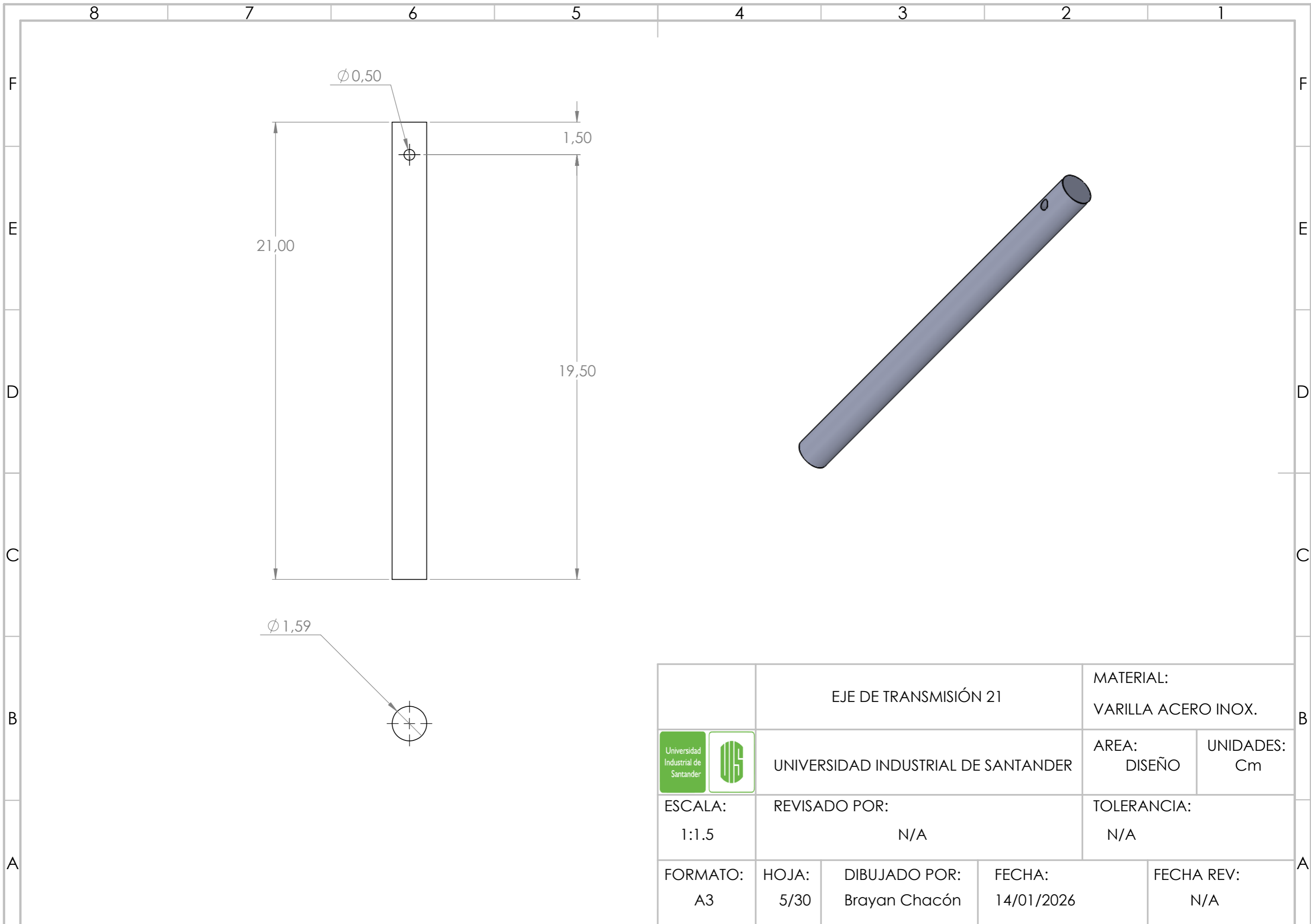
ESTRUCTURA GENERADORA		MATERIAL: PERFIL ACERO AL CARBONO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO
	REVISADO POR: N/A		UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:5	TOLERANCIA: N/A		
FORMATO: A3	HOJA: 3/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026
			FECHA REV: N/A



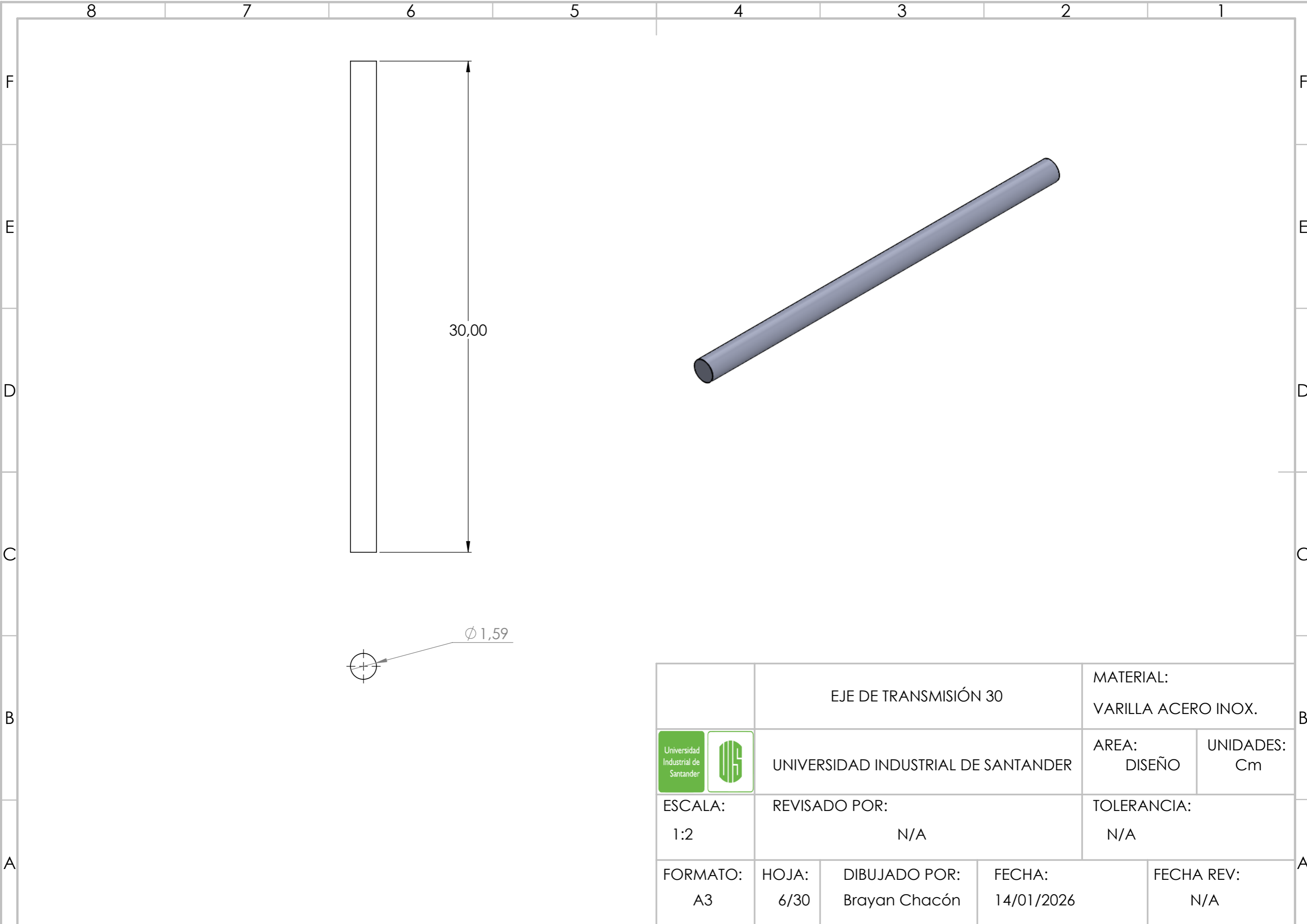
NOTA: Agujeros cada 60°

5x  $\phi$  0,50

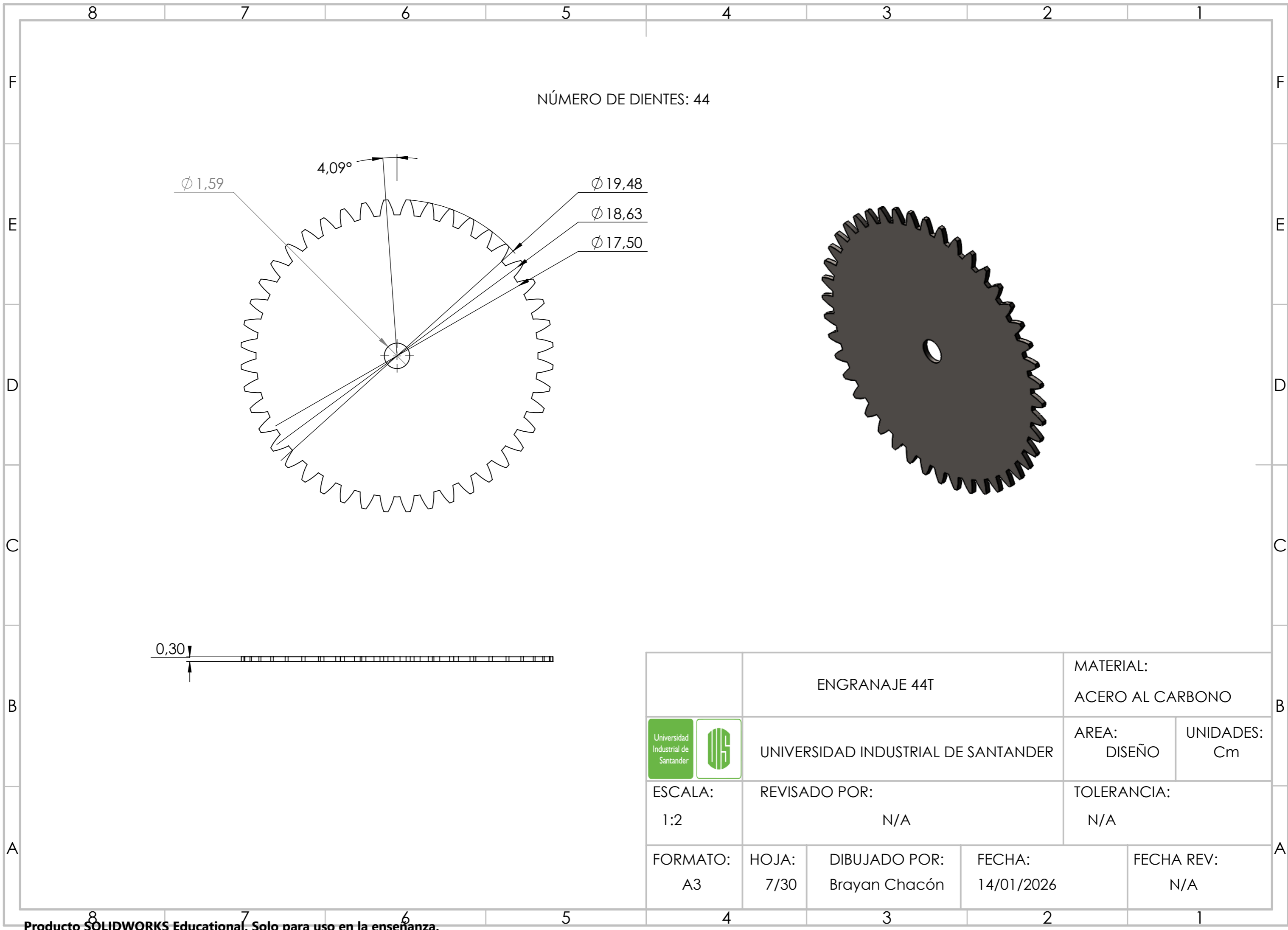
		EJE DE TURBINA		MATERIAL: VARILLA ACERO INOX.	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:3		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 4/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	

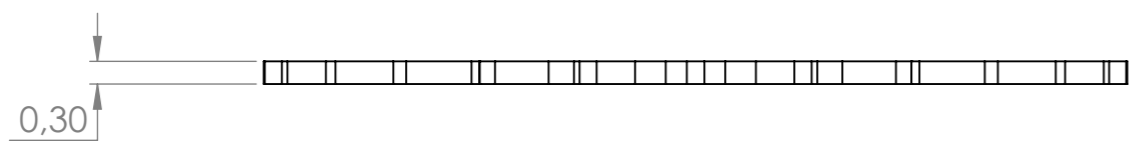
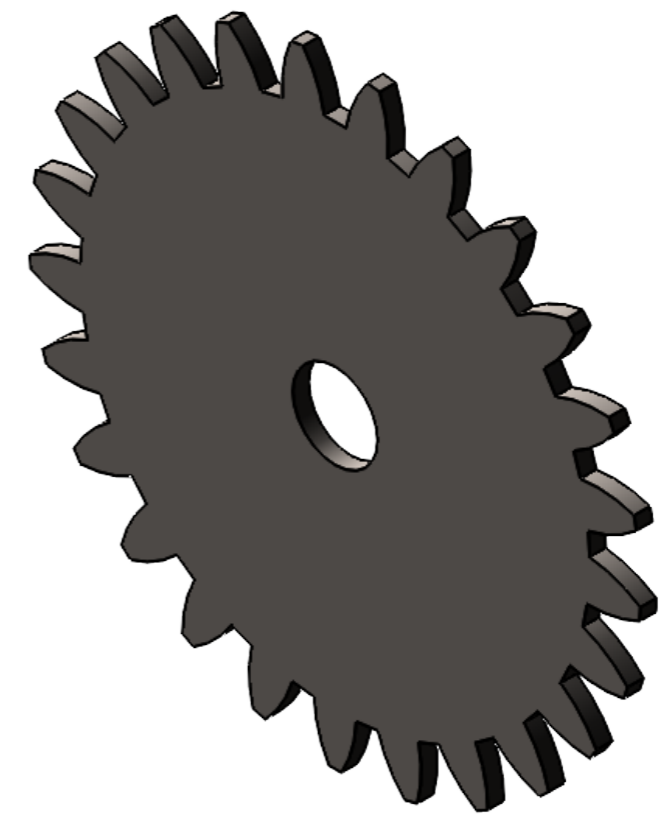
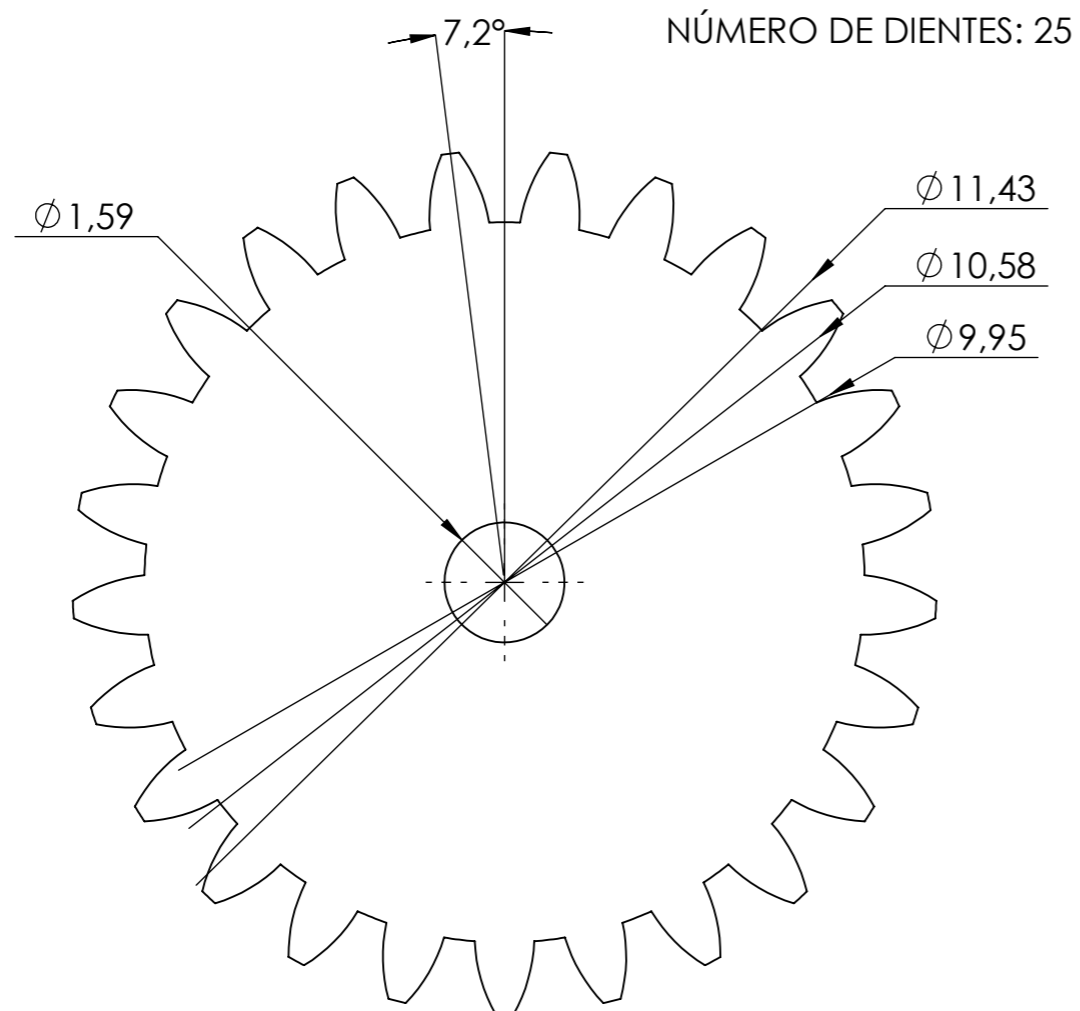



		EJE DE TRANSMISIÓN 21		MATERIAL: VARILLA ACERO INOX.	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:1.5		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 5/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	

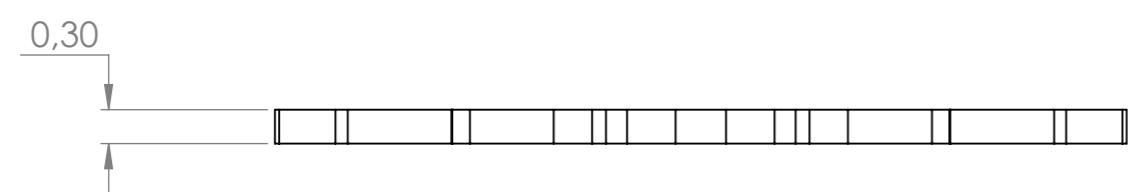
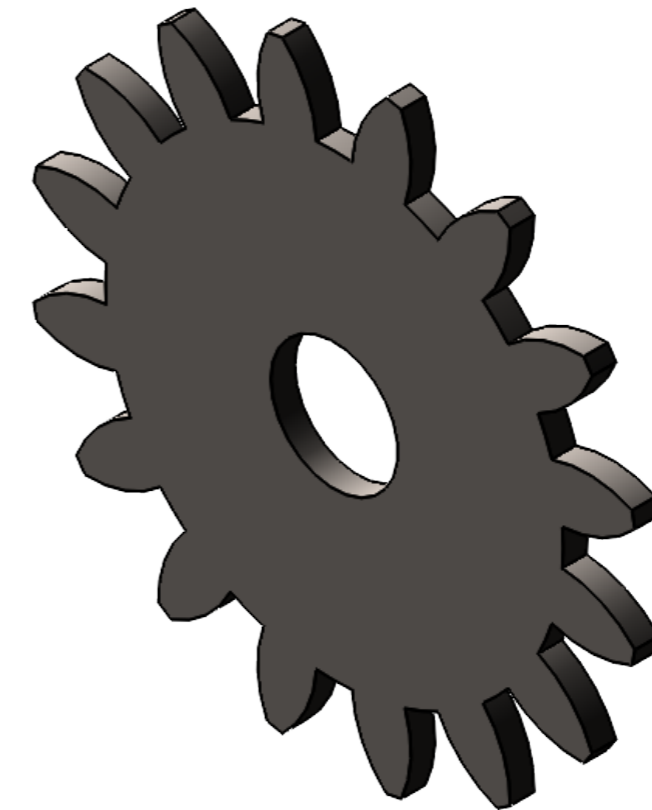
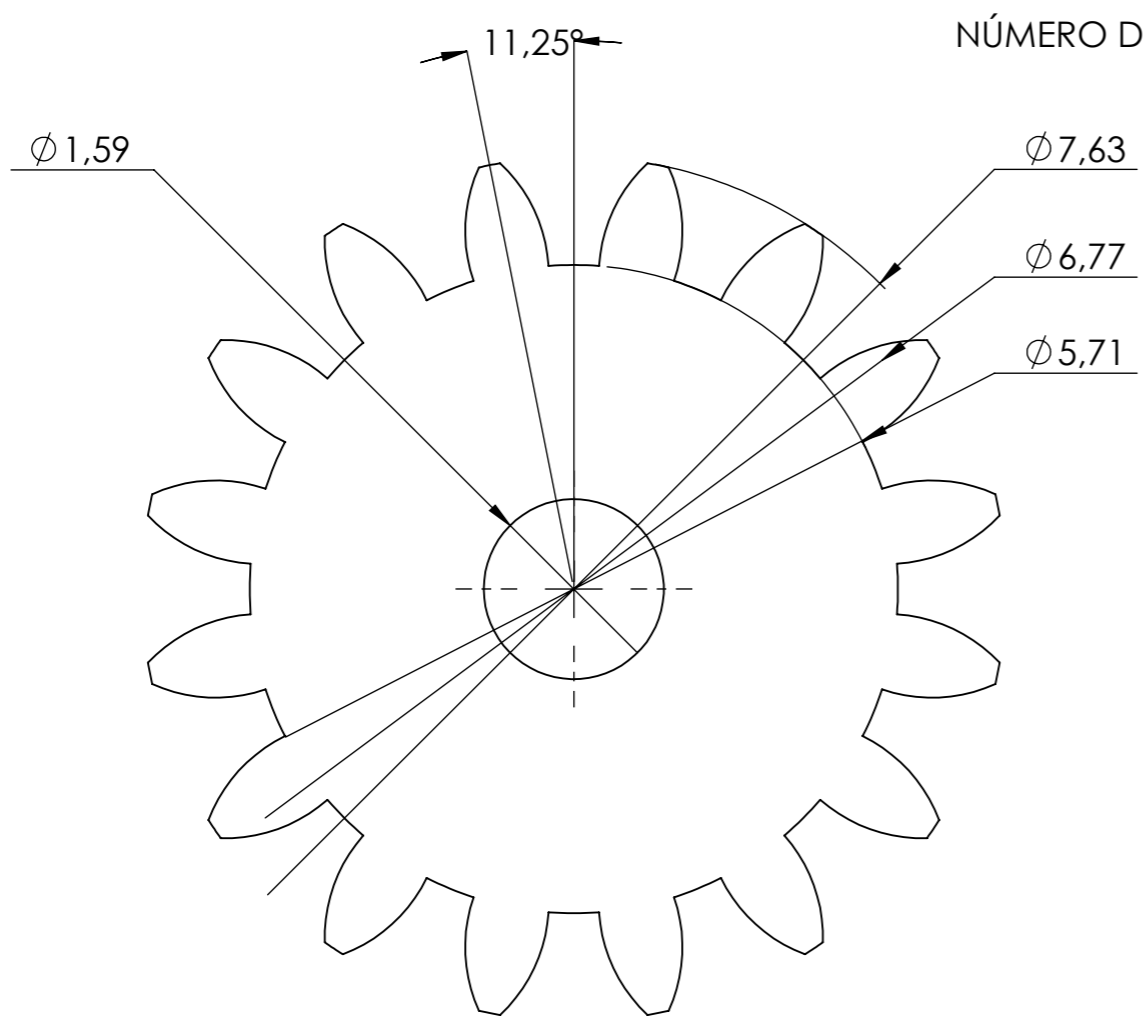



		EJE DE TRANSMISIÓN 30		MATERIAL: VARILLA ACERO INOX.	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:2	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A		
FORMATO: A3	HOJA: 6/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	

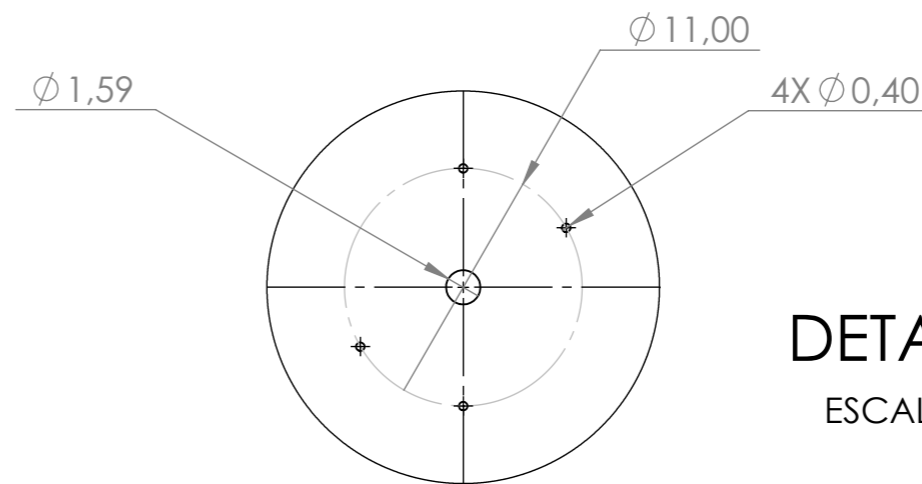
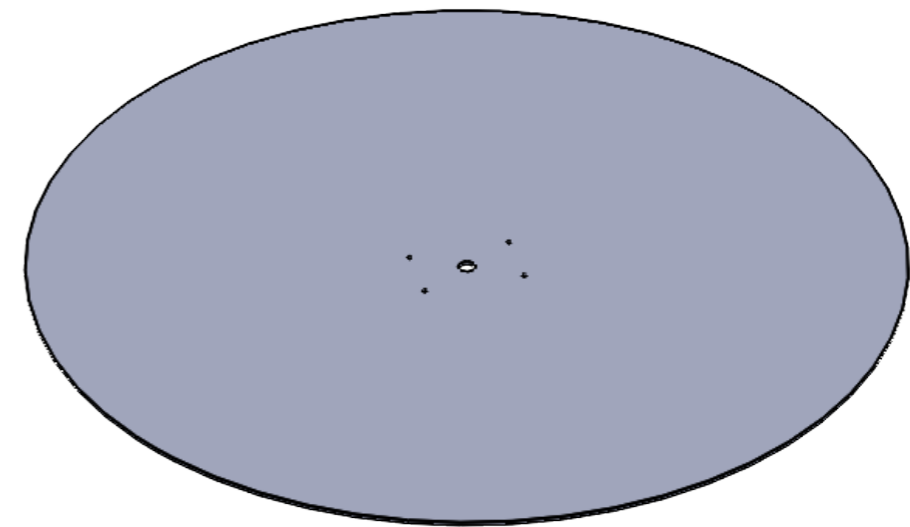
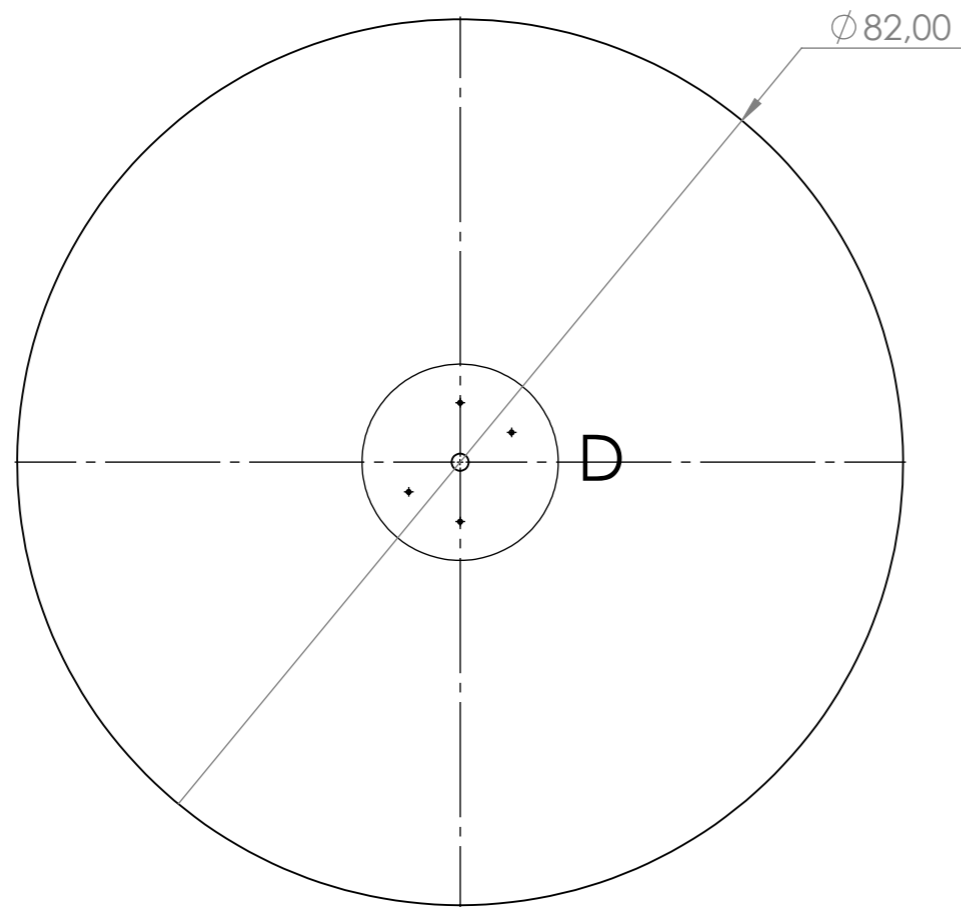




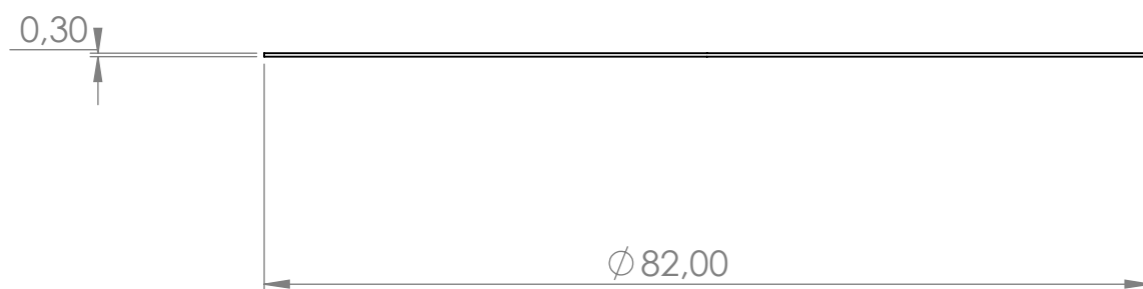
		ENGRANAJE 25T		MATERIAL: ACERO AL CARBONO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
	ESCALA: 1:1	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 8/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	



		ENGRANAJE 16T		MATERIAL: ACERO AL CARBONO	
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1.5:1		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 9/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	



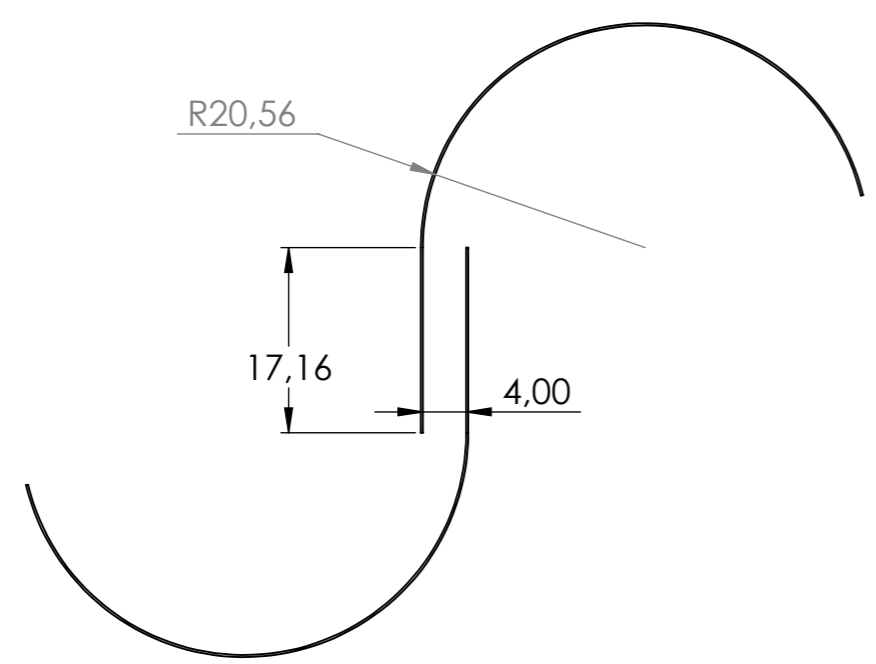
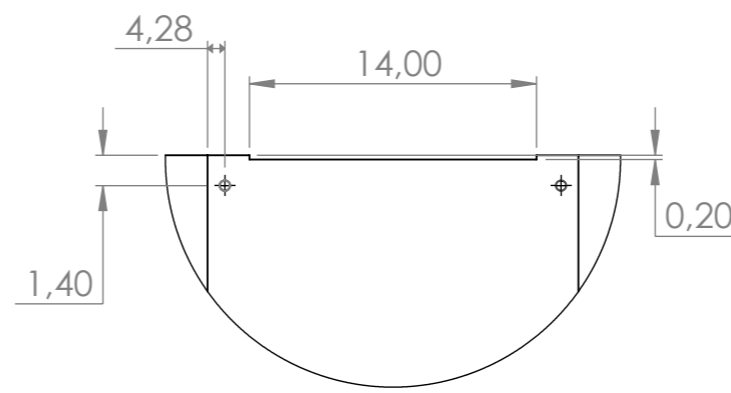
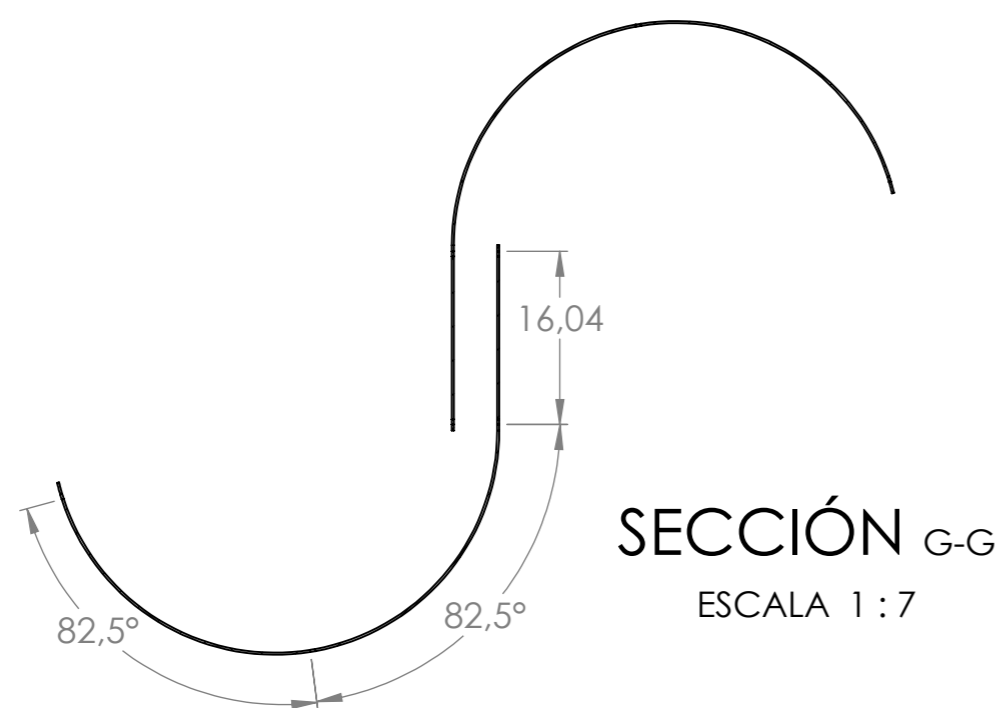
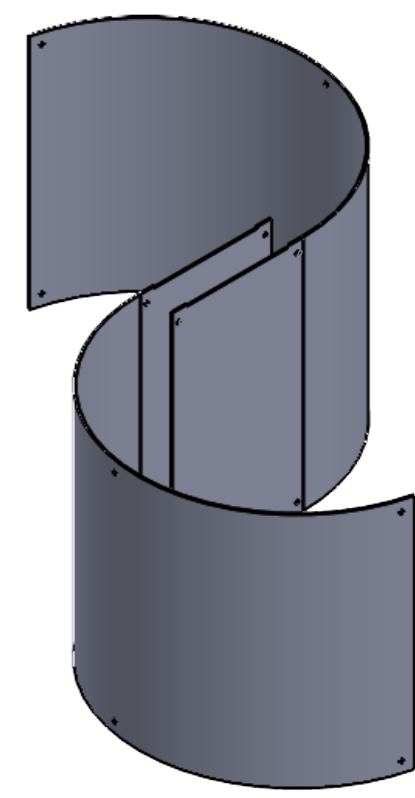
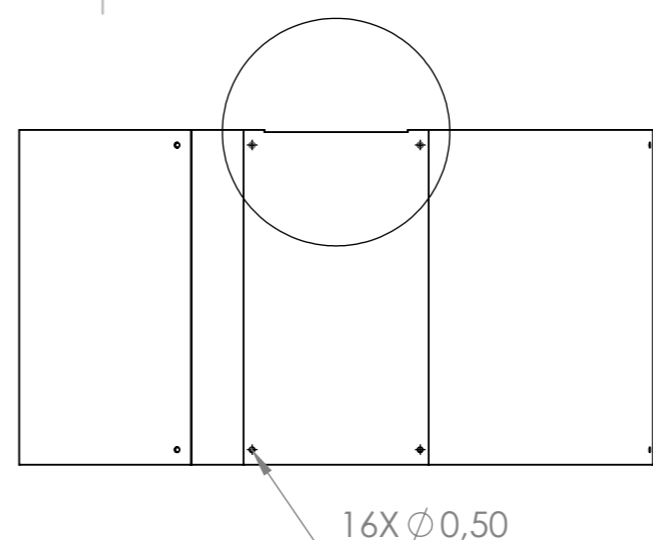
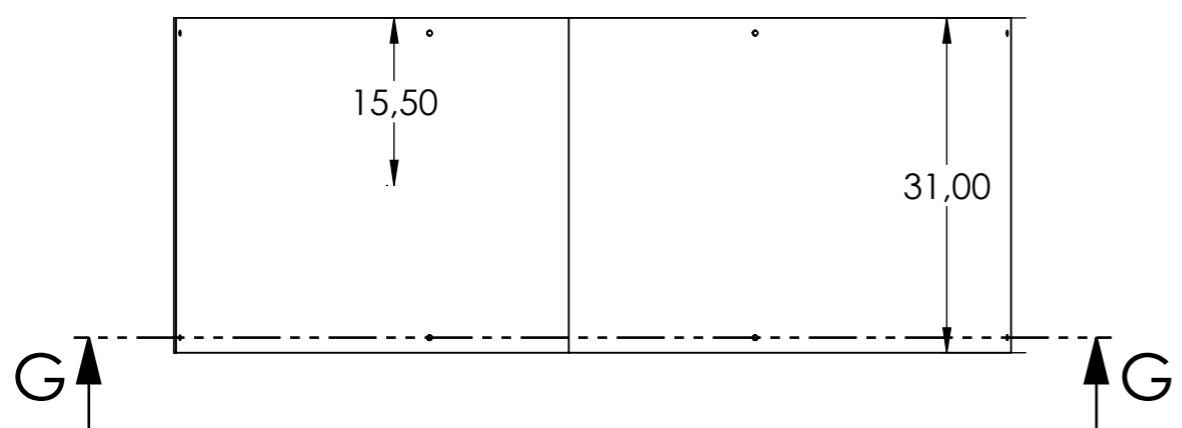
**DETALLE D**  
ESCALA 2 : 7




	BASES		MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:7	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 10/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A

8 7 6 5 4 E 3 2 1

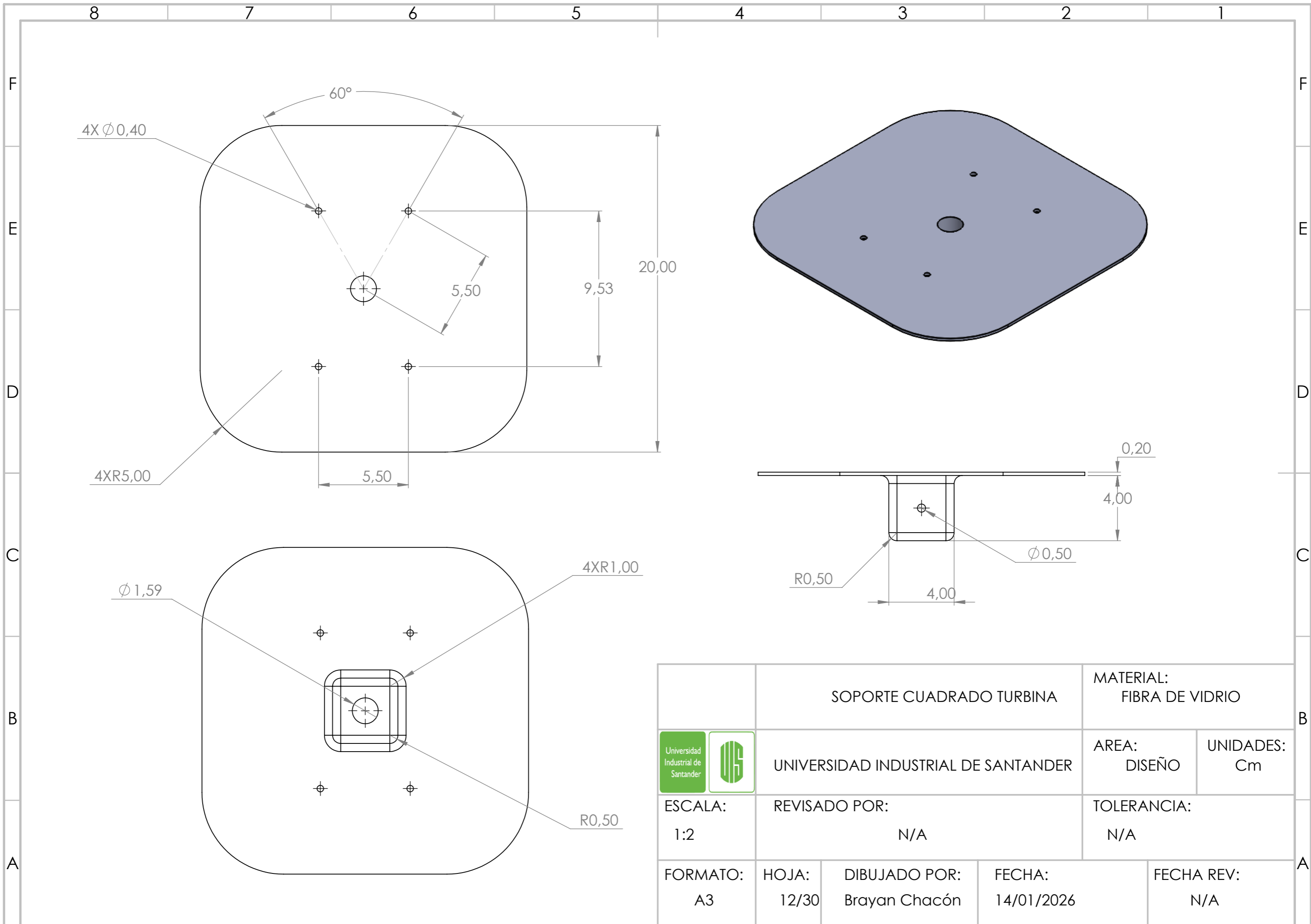
F F



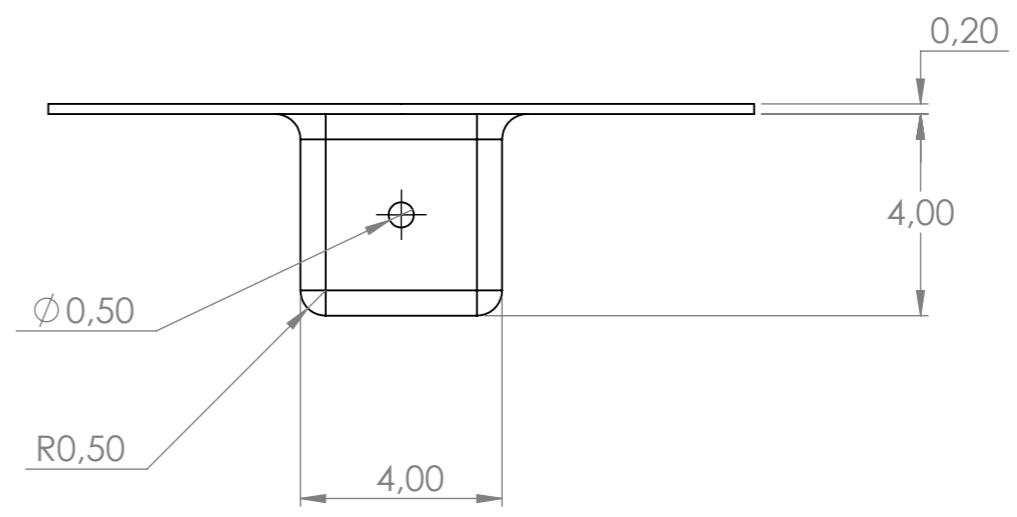
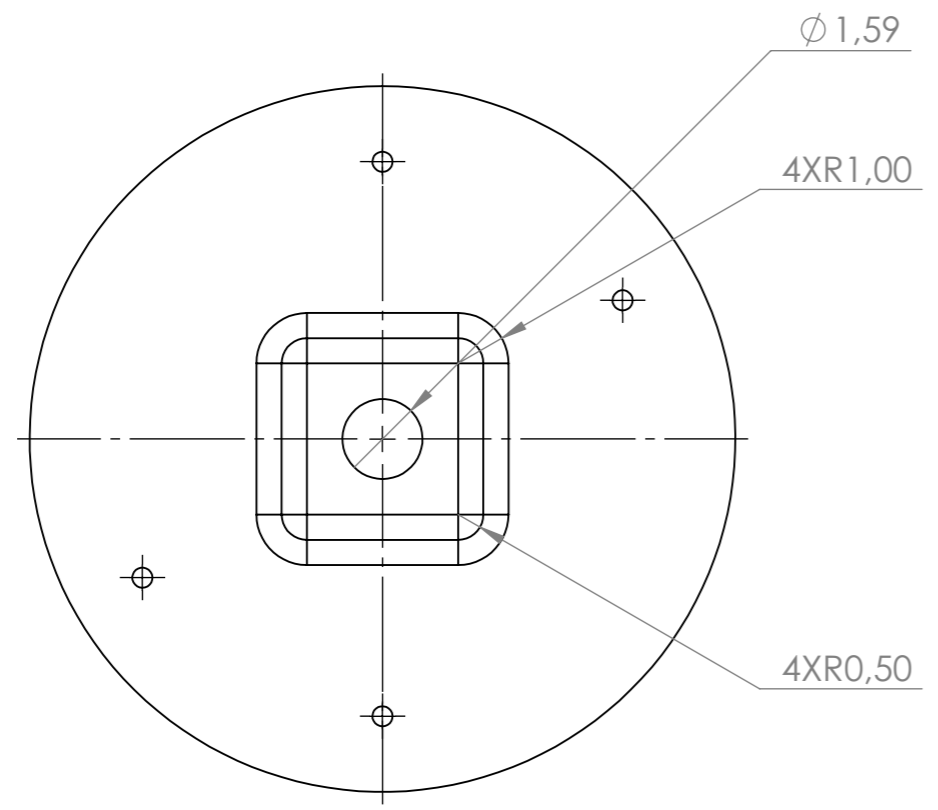
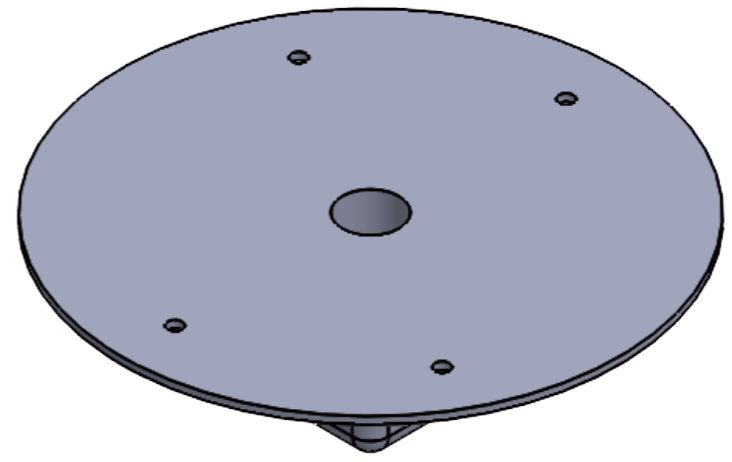
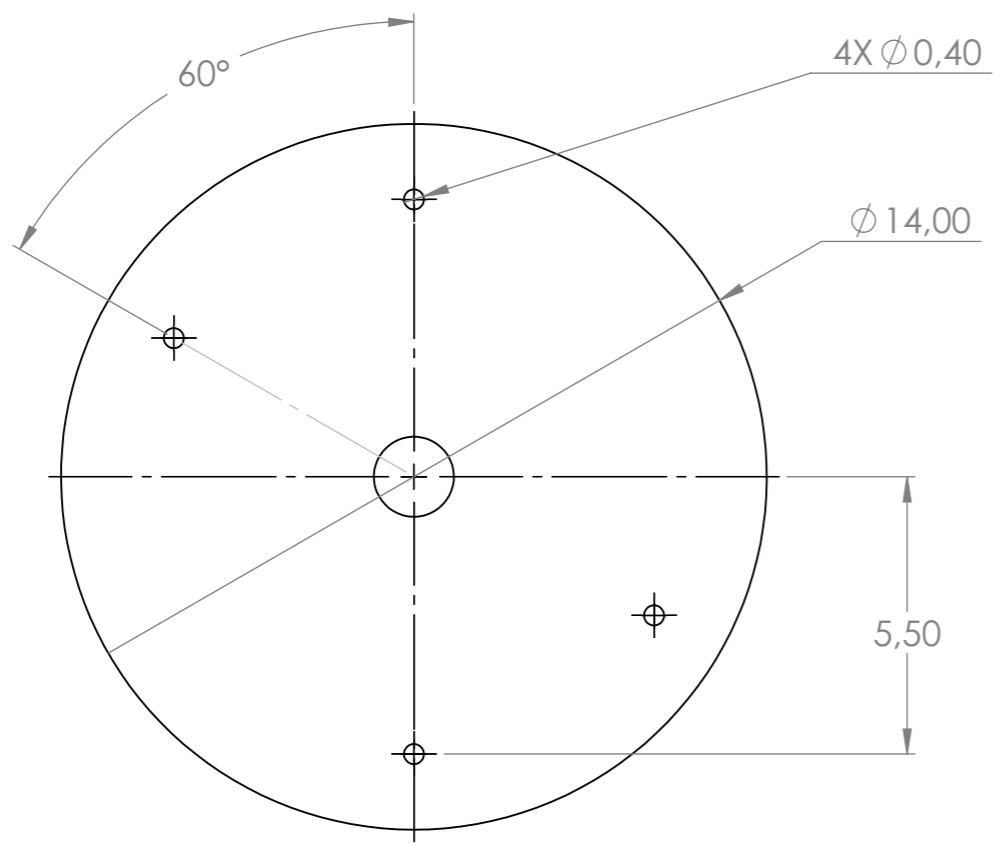
ALABES		MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO		
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
	ESCALA: 1:7	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A
FORMATO: A3	HOJA: 11/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A


8 7 6 5 4 3 2 1

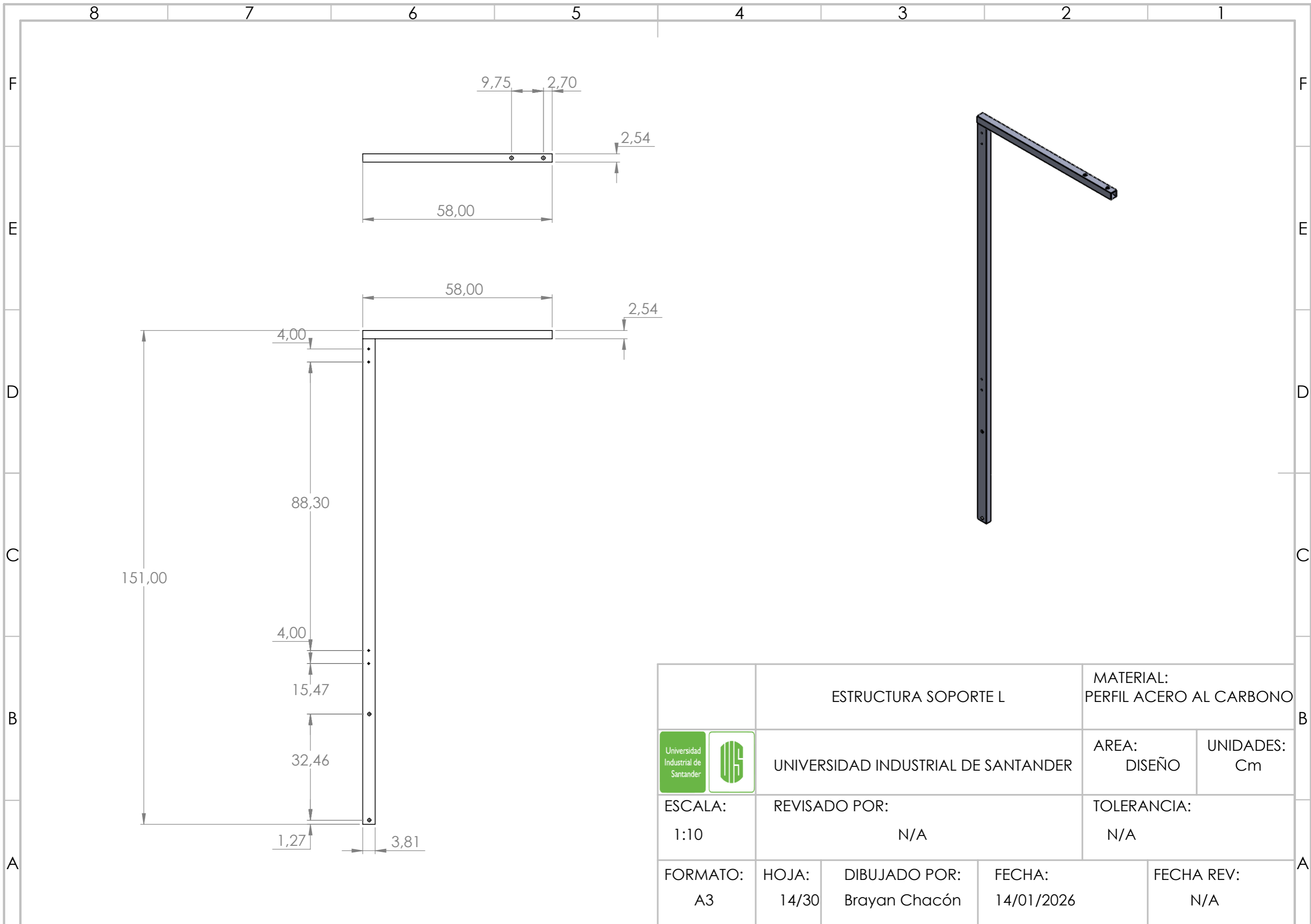
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



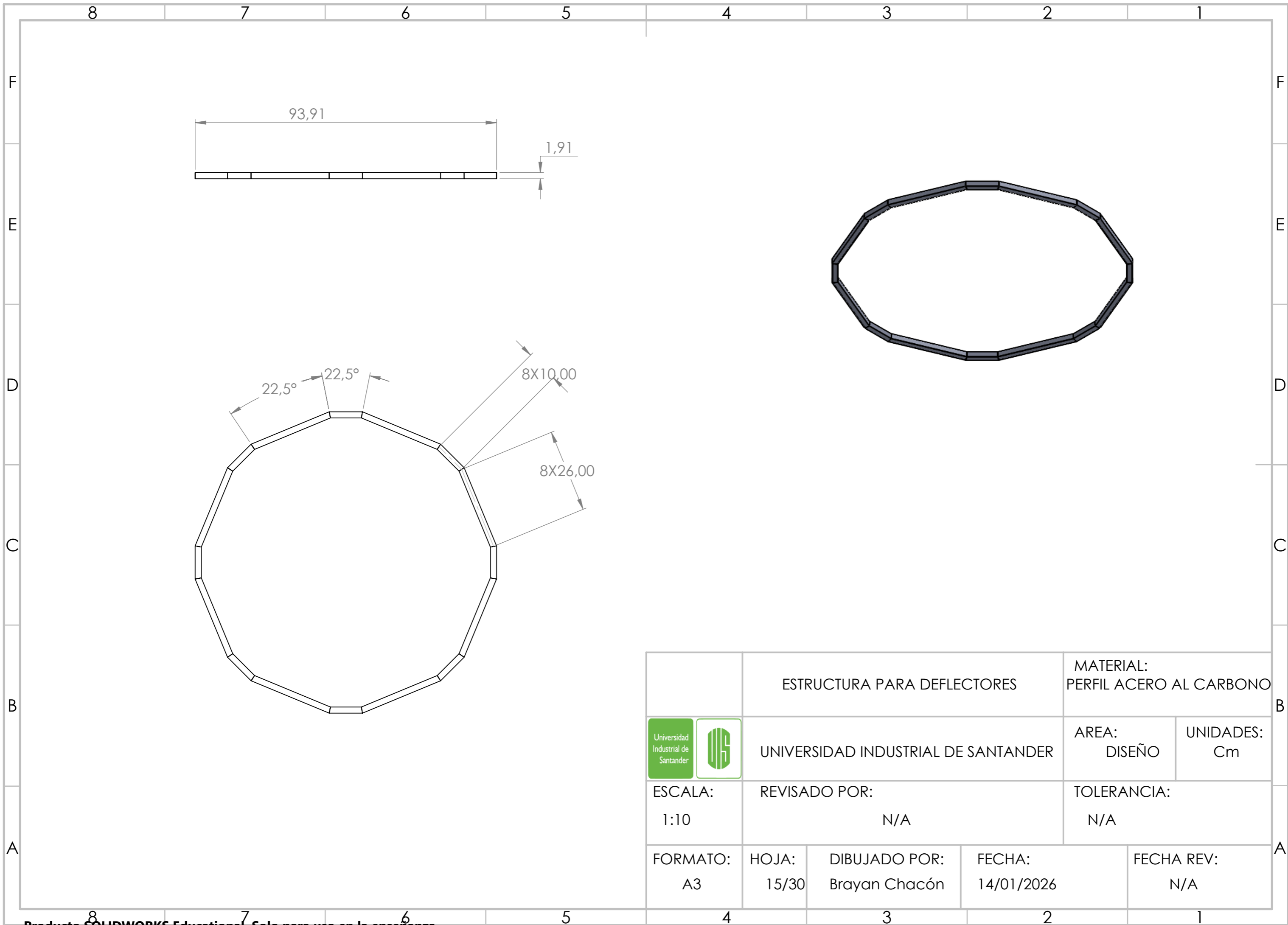
		SOPORTE CUADRADO TURBINA		MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
	ESCALA: 1:2	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 12/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	





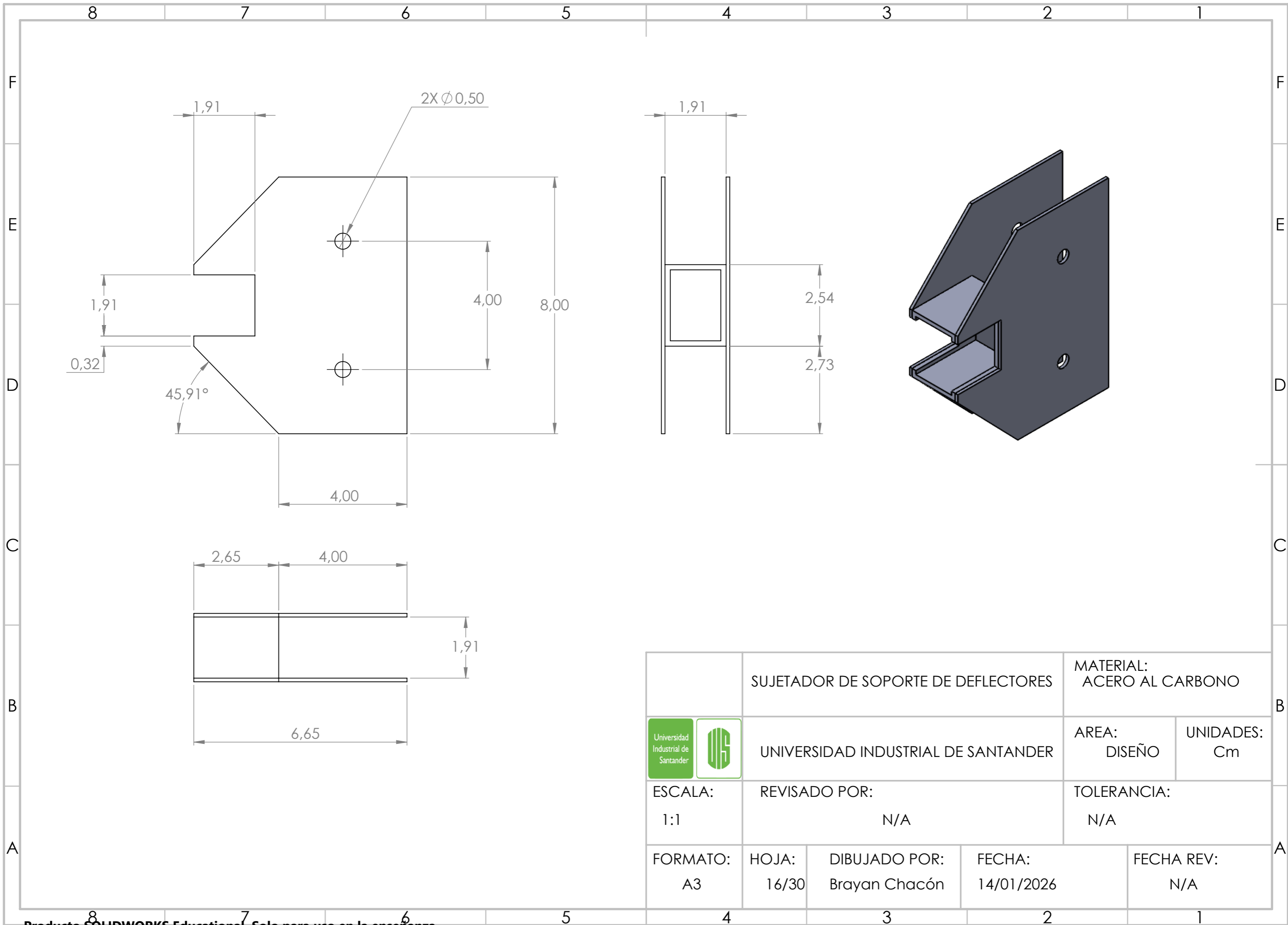
		SOPORTE REDONDO TURBINA		MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
	ESCALA: 1:1.5	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 13/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	





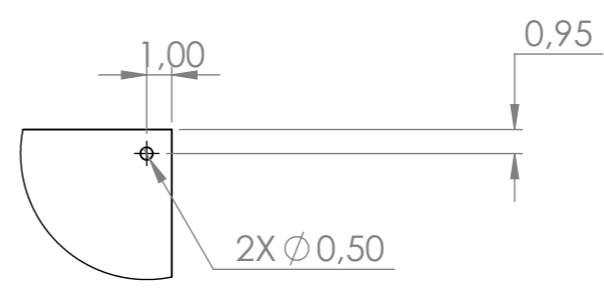
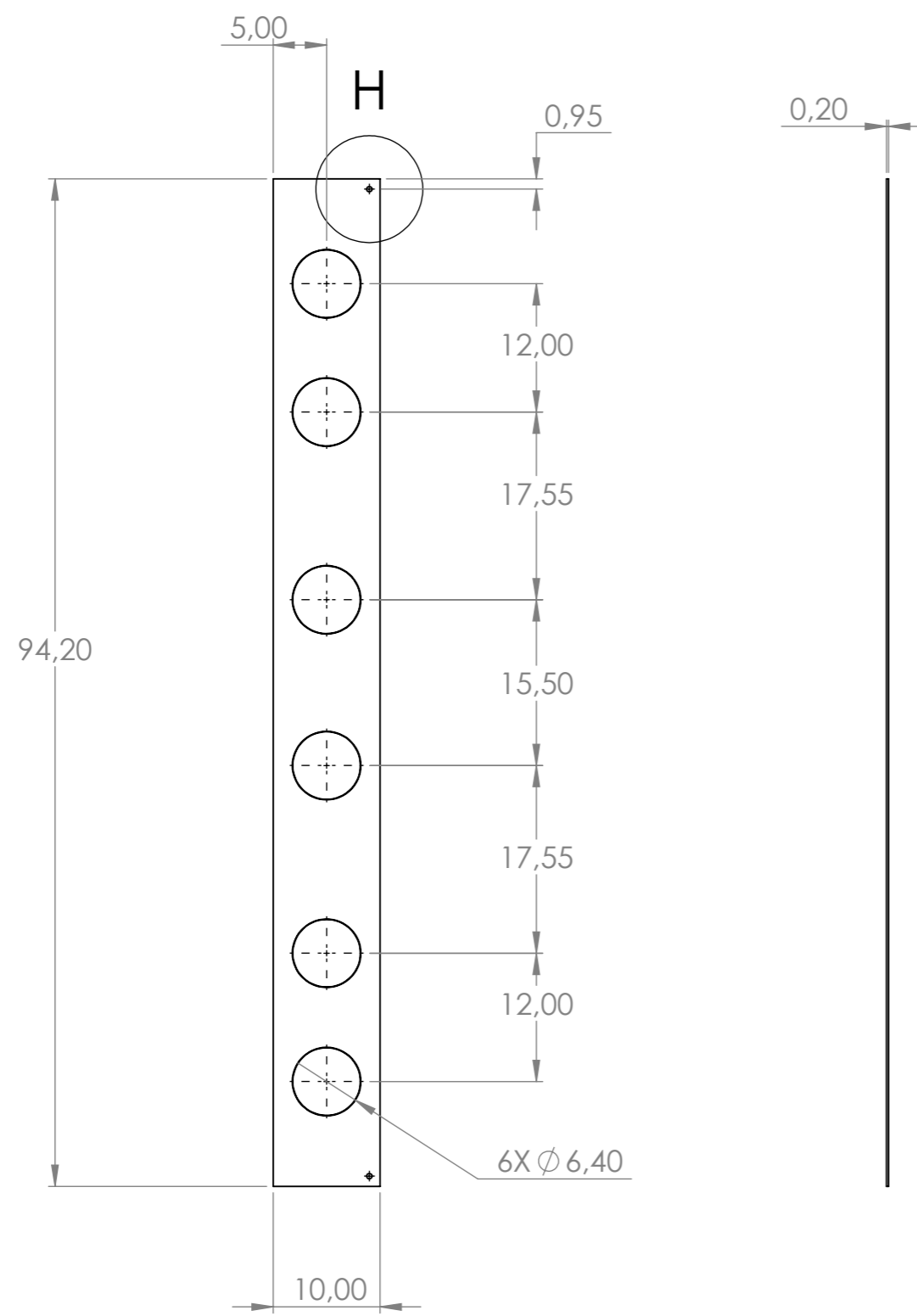
		ESTRUCTURA SOPORTE L		MATERIAL: PERFIL ACERO AL CARBONO	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:10	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A		
FORMATO: A3	HOJA: 14/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	



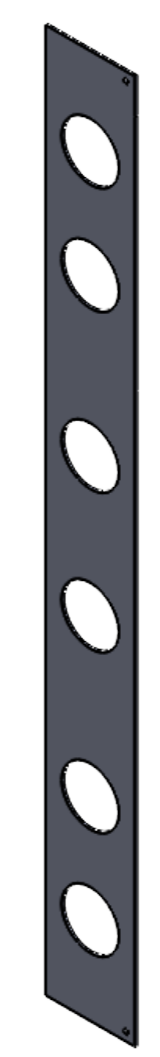
	ESTRUCTURA PARA DEFLECTORES		MATERIAL: PERFIL ACERO AL CARBONO	
 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:10	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 15/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A




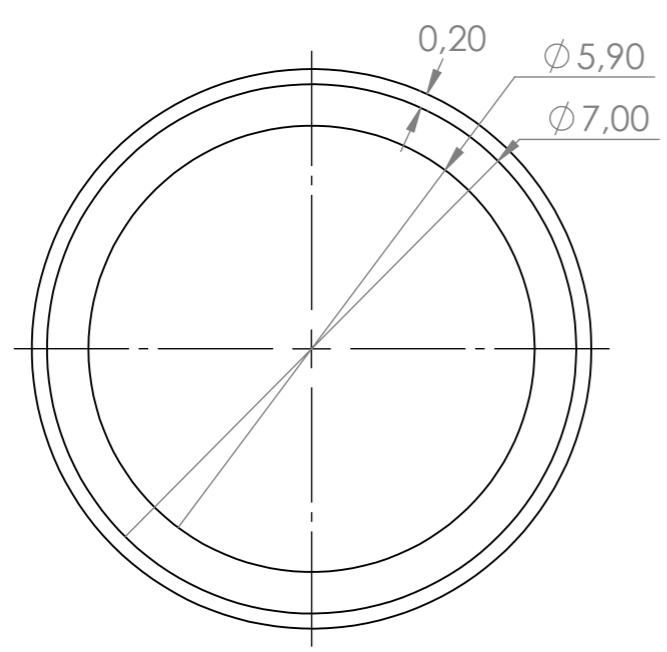
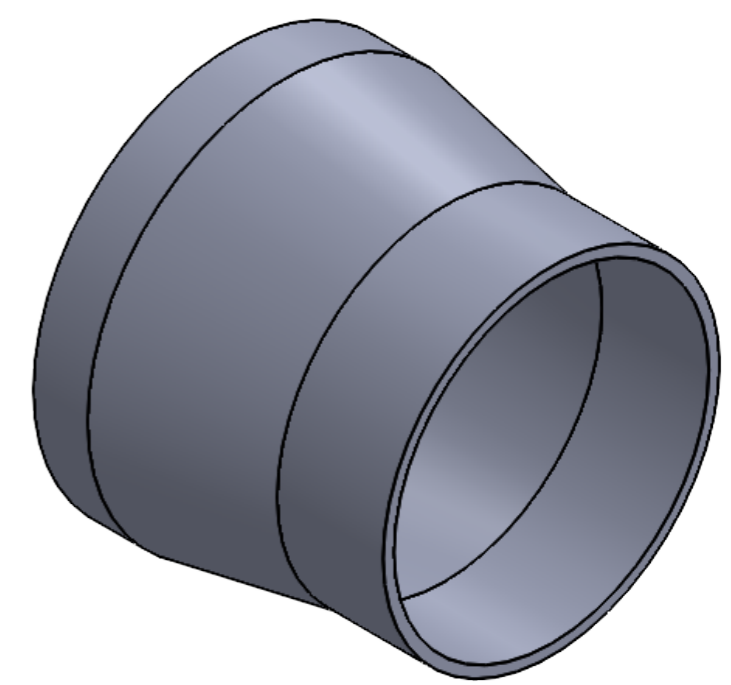
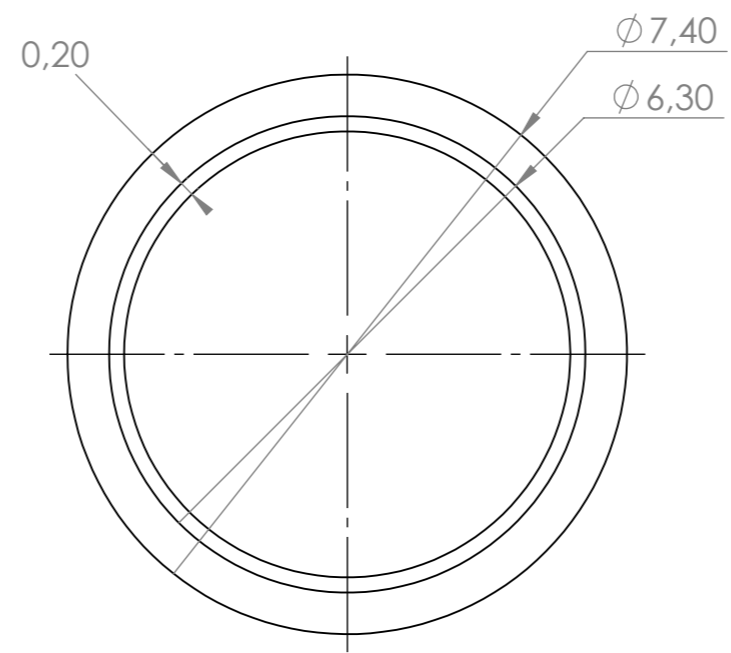
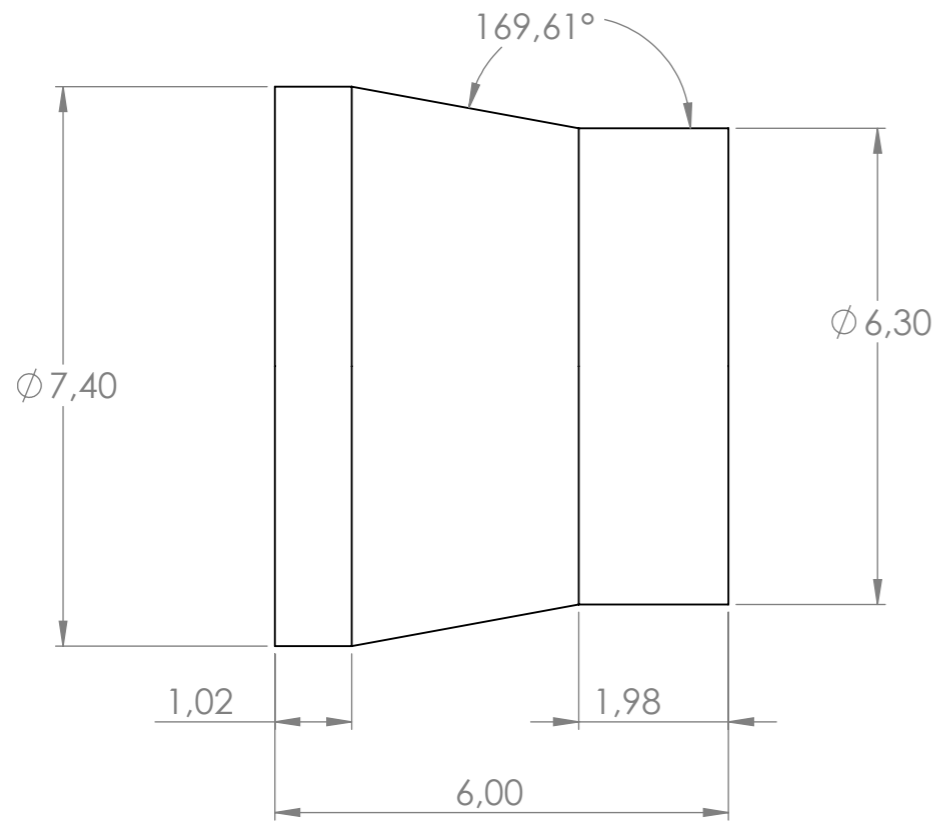
	SUJETADOR DE SOPORTE DE DEFLECTORES		MATERIAL: ACERO AL CARBONO	
 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
	ESCALA: 1:1	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A
FORMATO: A3	HOJA: 16/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A




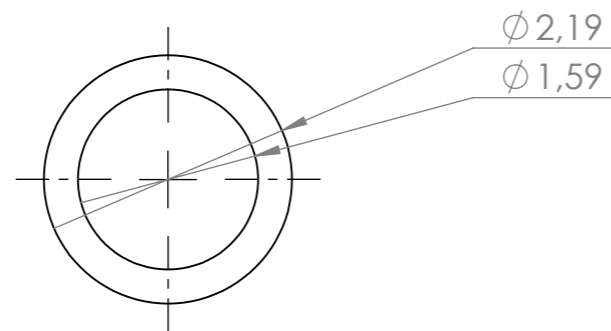
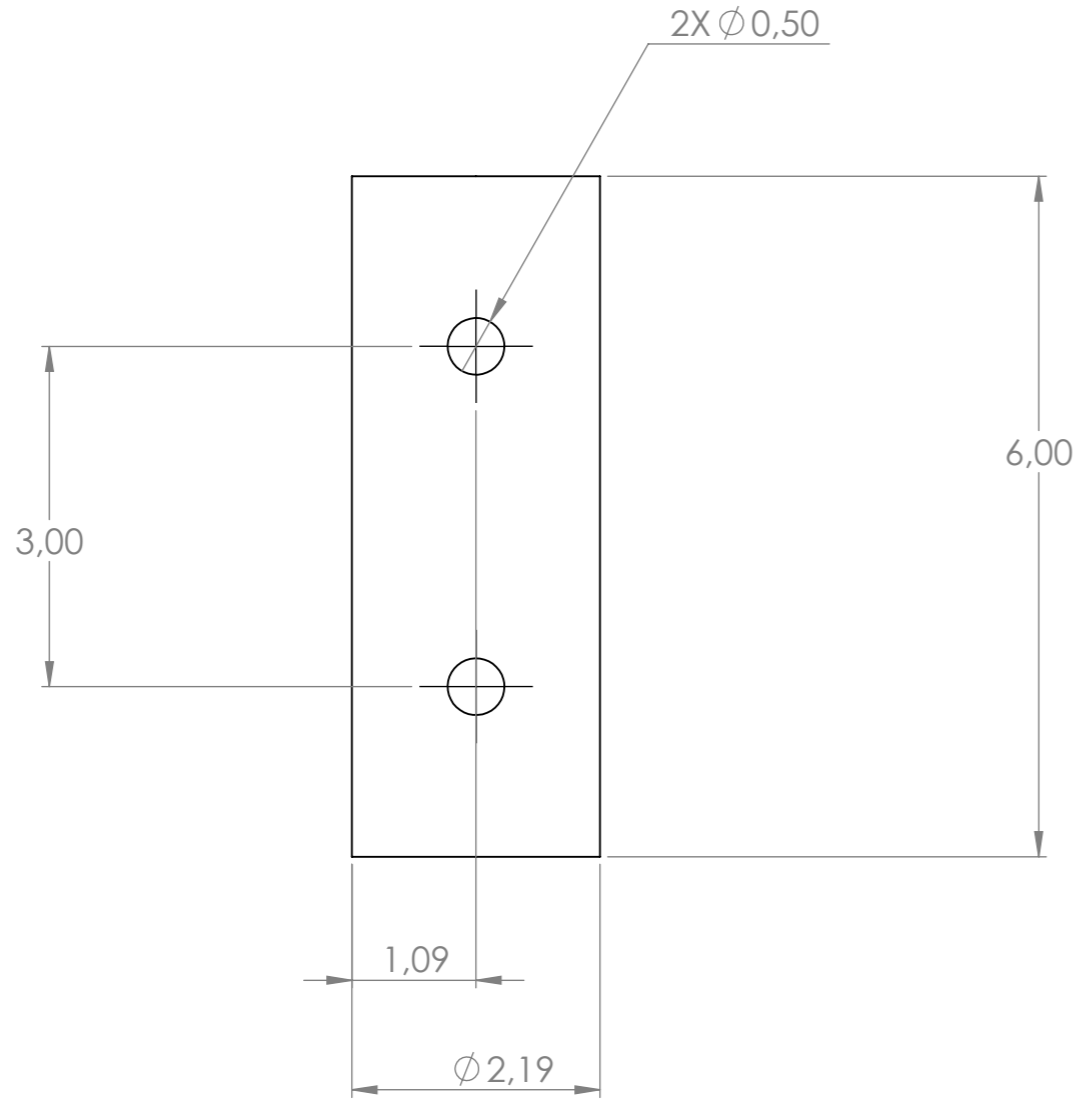
**DETALLE H**  
ESCALA 1 : 3



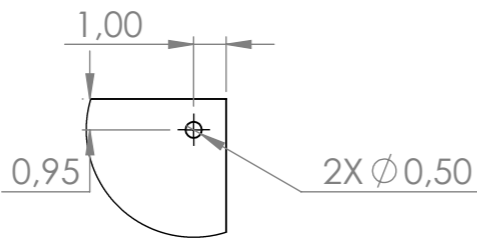
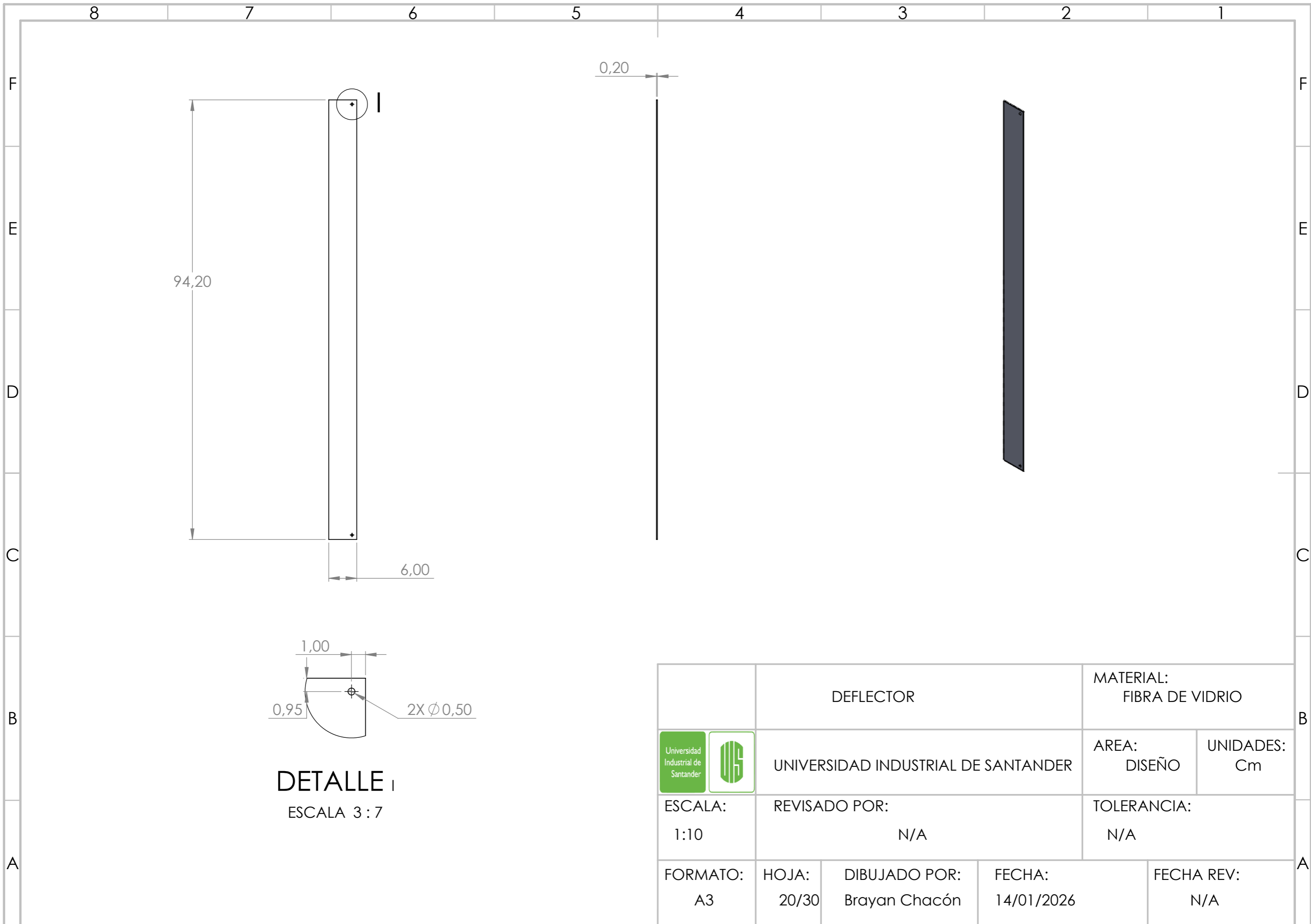
		PARED DE VENTURIS		MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO	
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
ESCALA: 1:6	HOJA: 17/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	



		VENTURI		MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO	
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:1	REVISADO POR: N/A			TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 18/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	

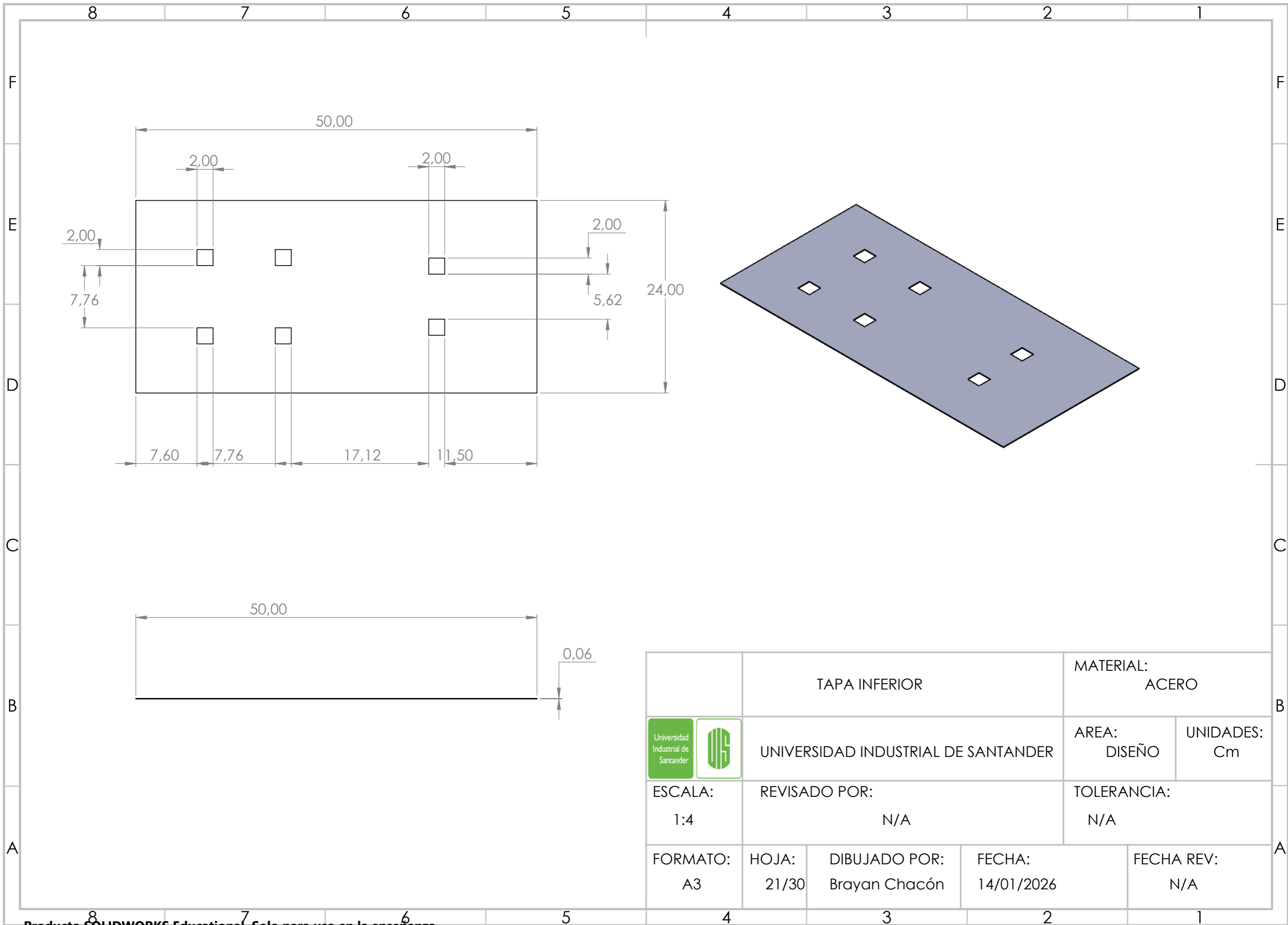


	BUJE CONECTOR		MATERIAL: BRONCE	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1.5:1	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 19/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A

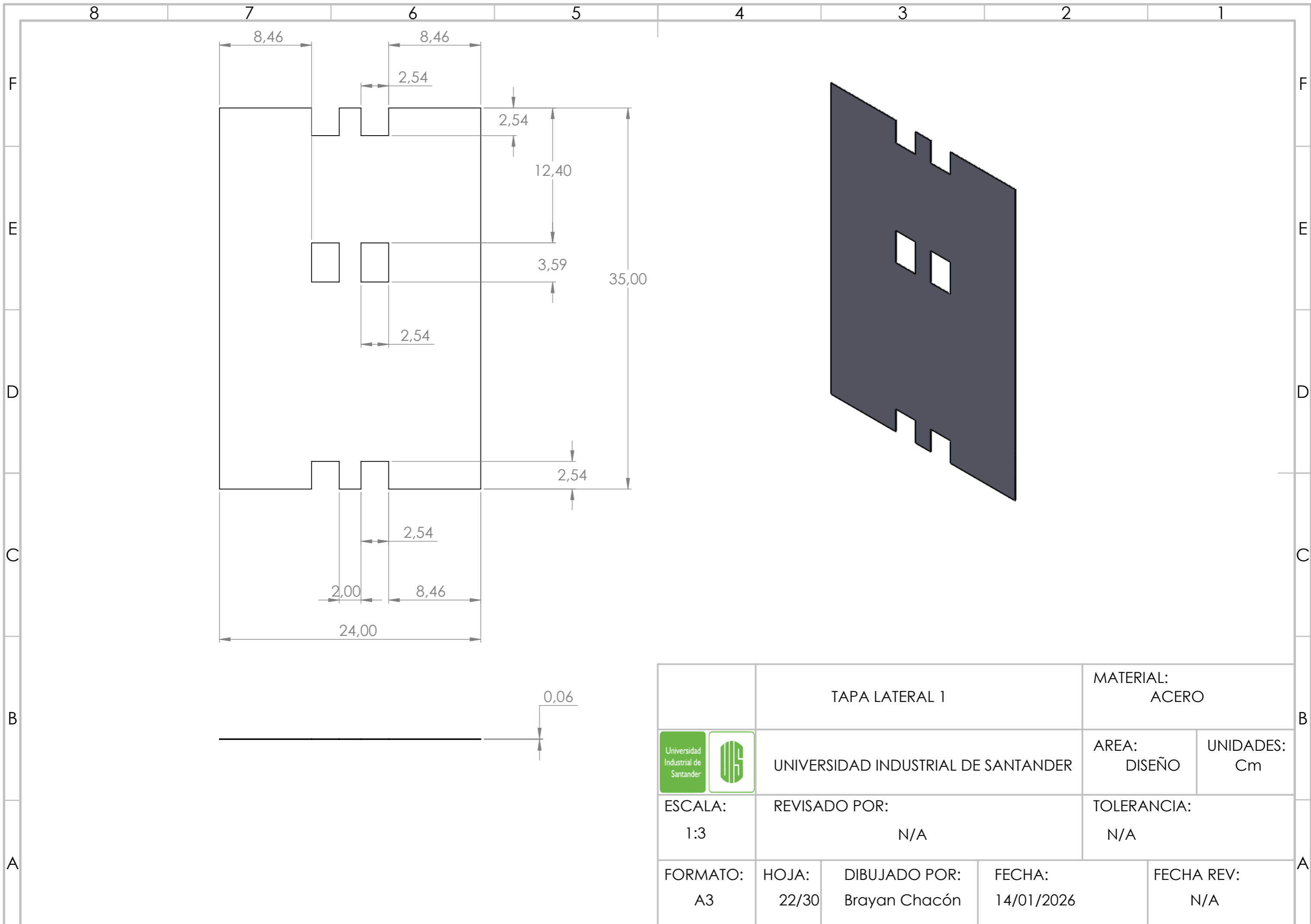



**DETALLE I**  
ESCALA 3 : 7

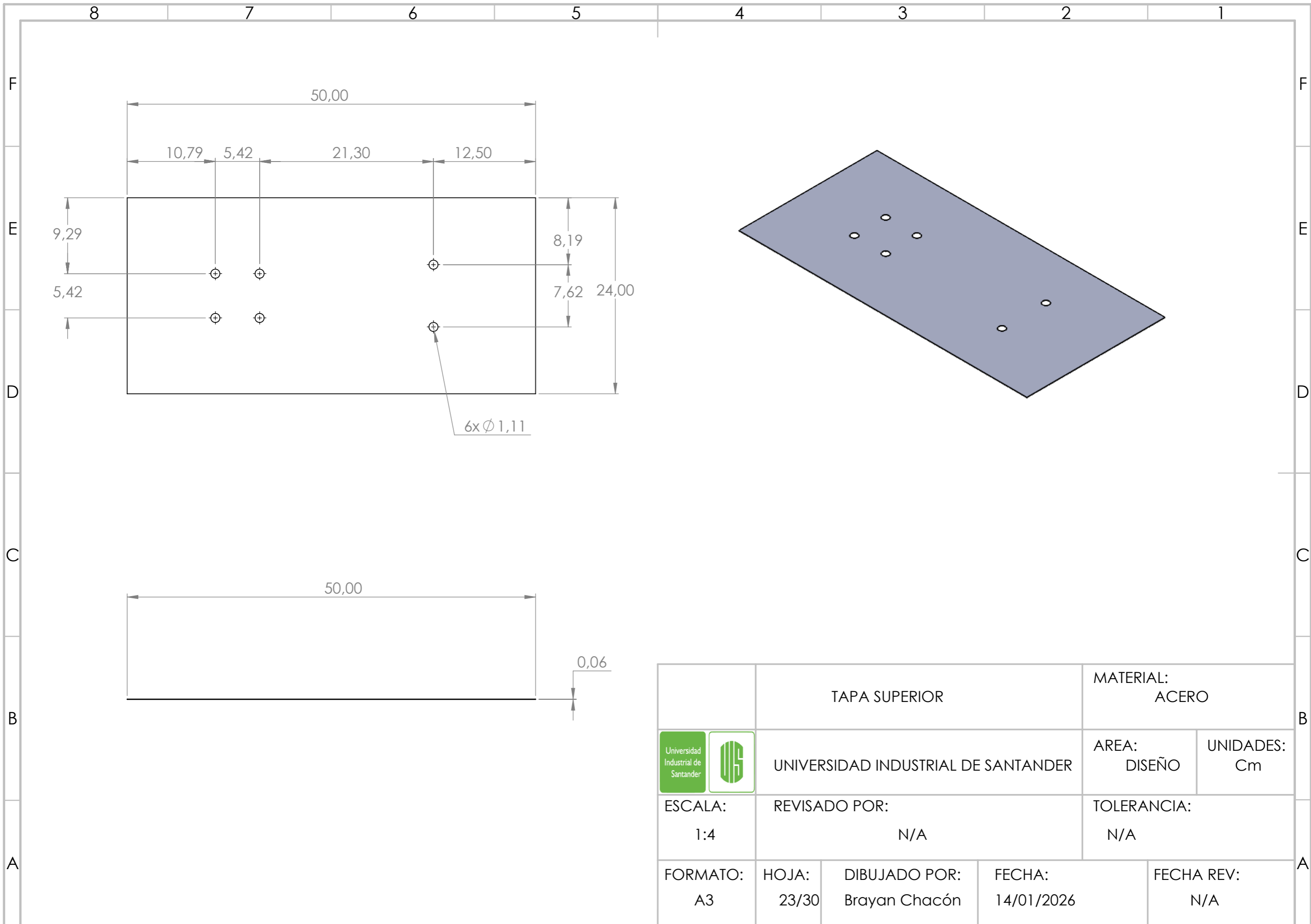
	DEFLECTOR		MATERIAL: FIBRA DE VIDRIO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:10	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 20/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A



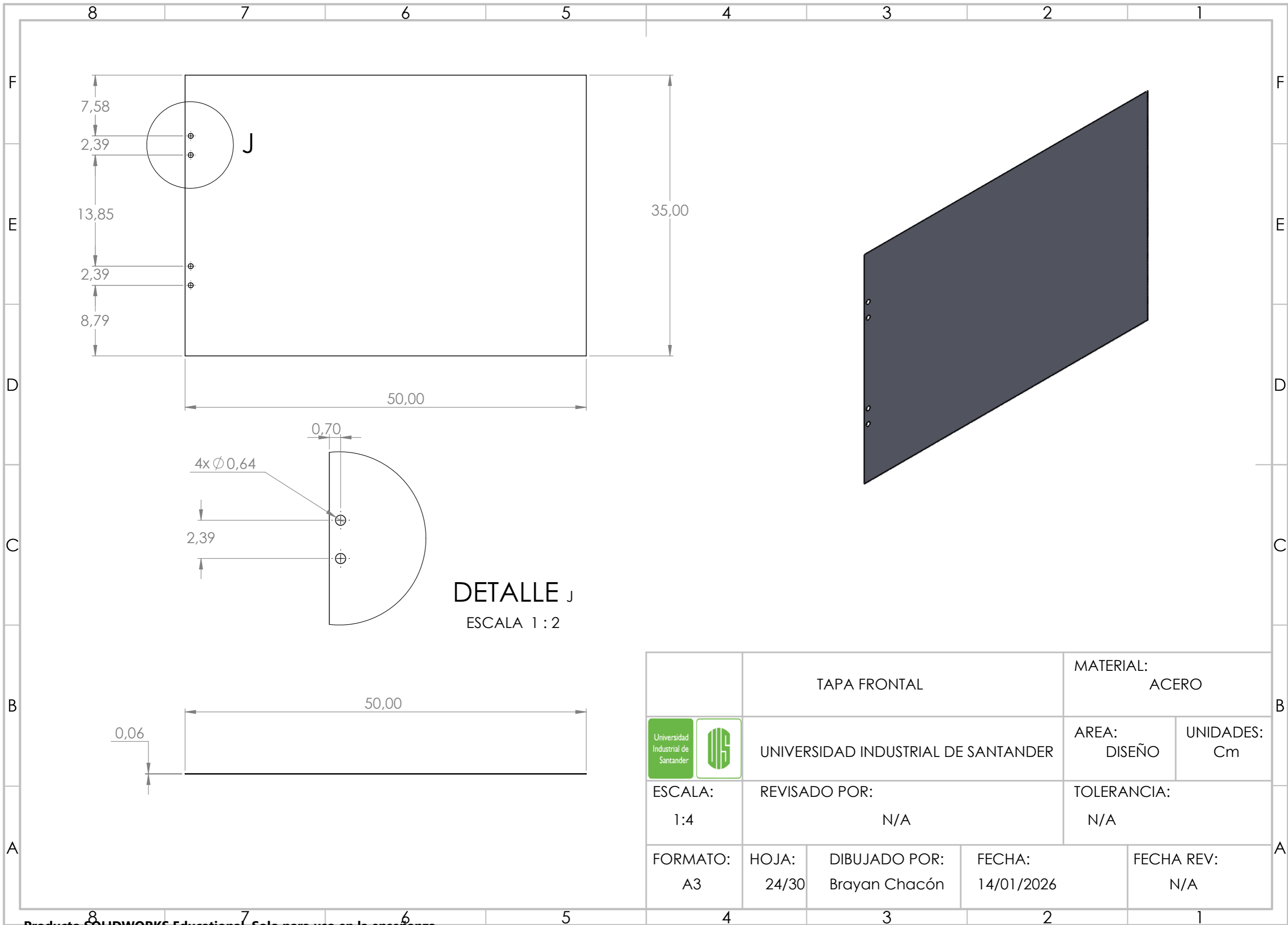
		TAPA INFERIOR		MATERIAL: ACERO	
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:4		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 21/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	





		TAPA LATERAL 1		MATERIAL: ACERO	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:3		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 22/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	

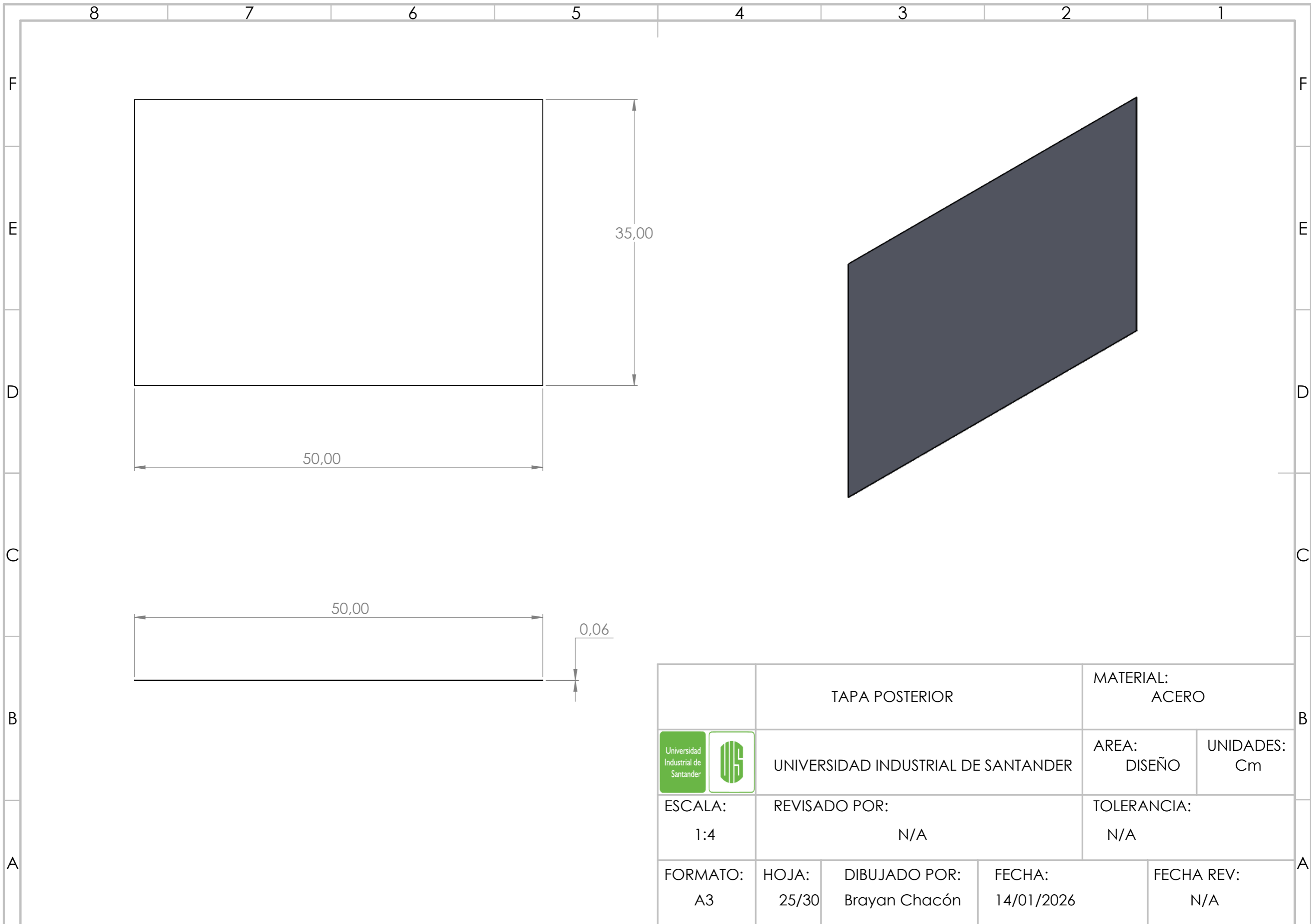


	TAPA SUPERIOR		MATERIAL: ACERO	
 	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:4	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 23/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A

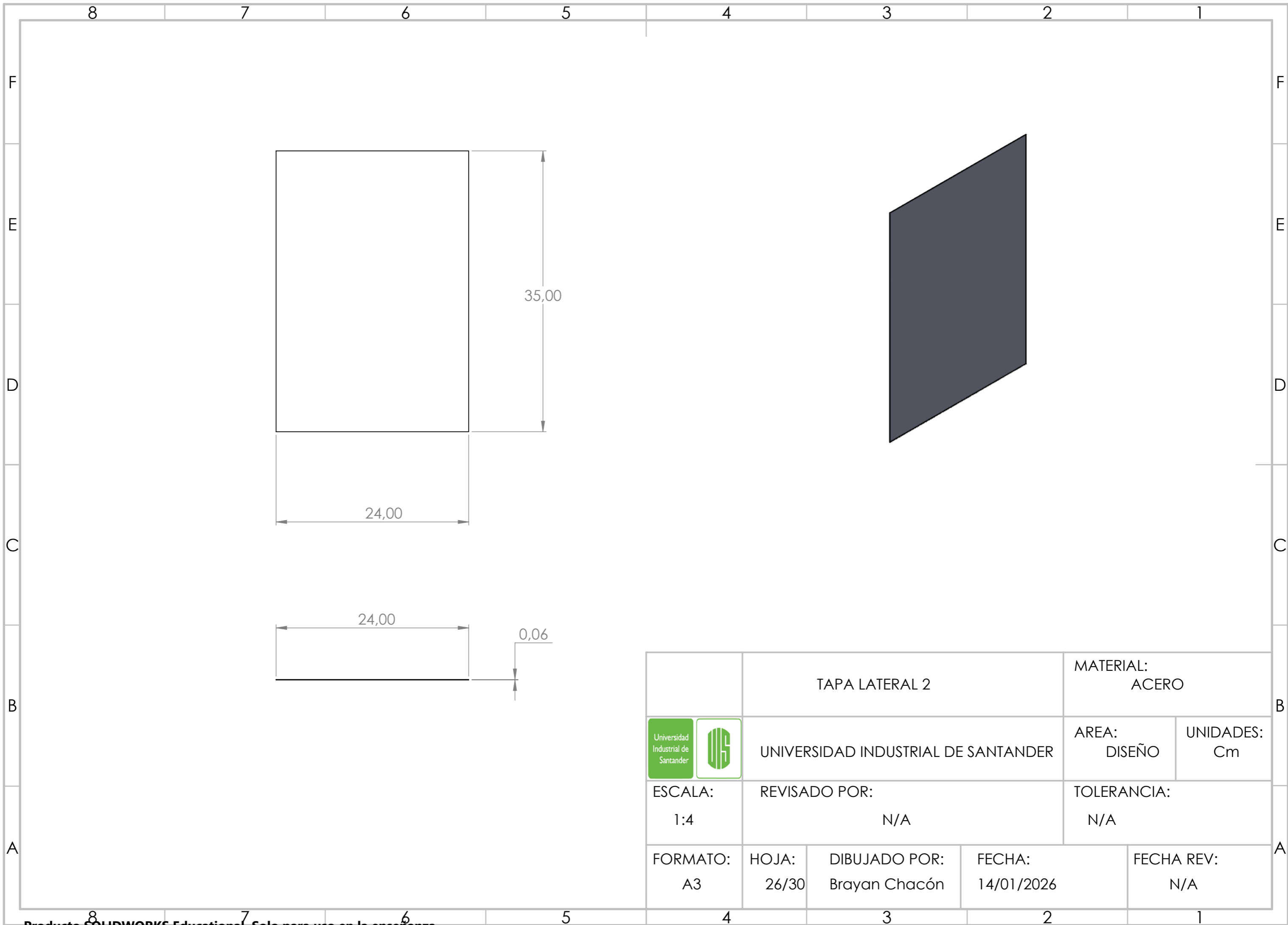



**DETALLE J**  
ESCALA 1 : 2

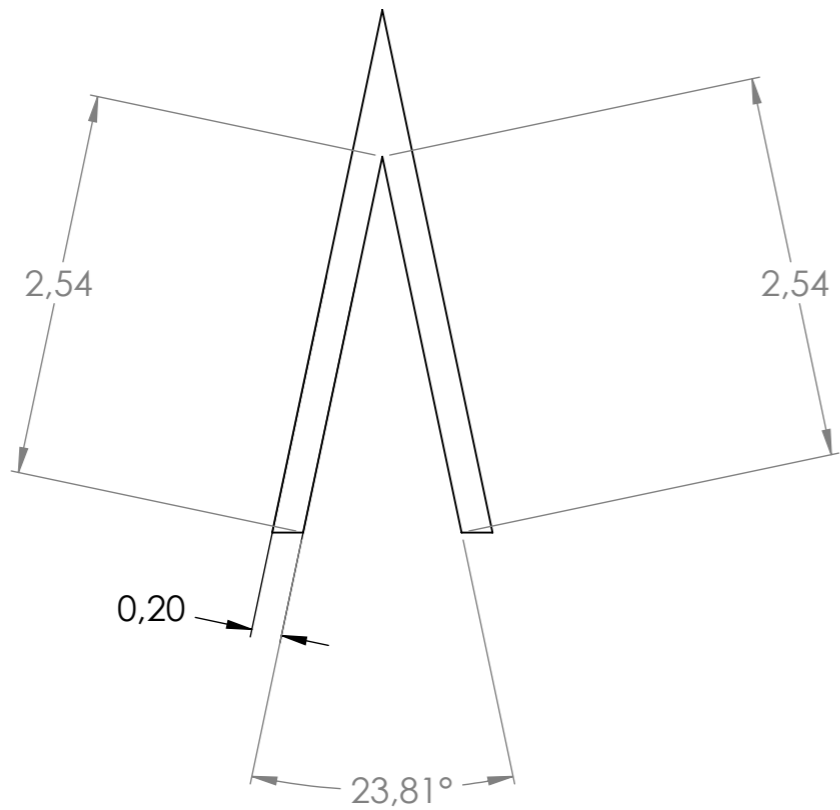
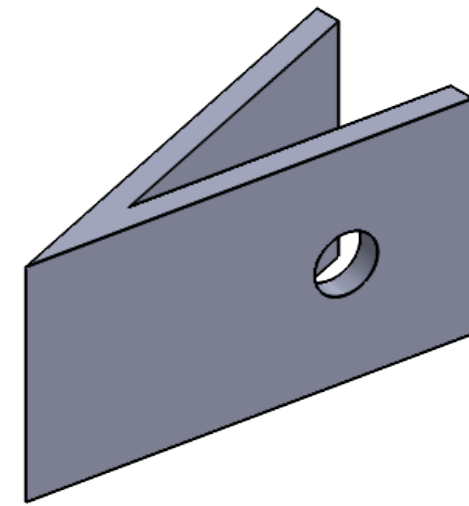
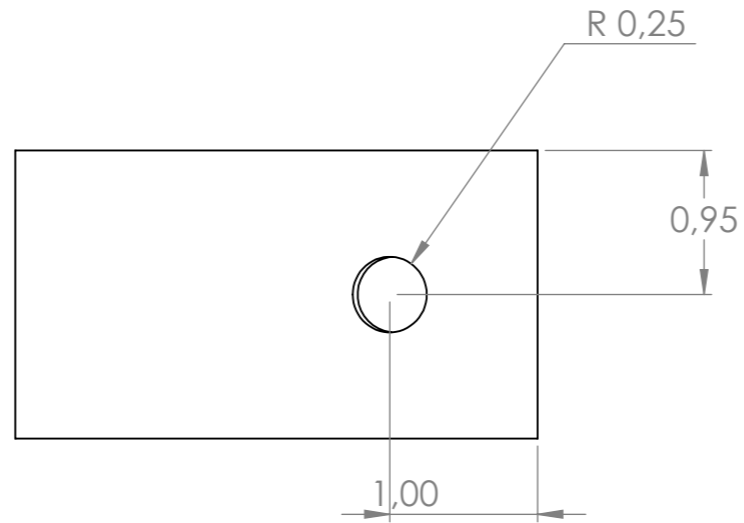
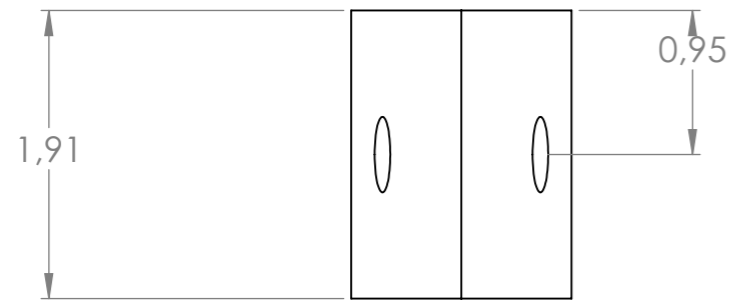
		TAPA FRONTAL		MATERIAL: ACERO	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:4		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 24/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	





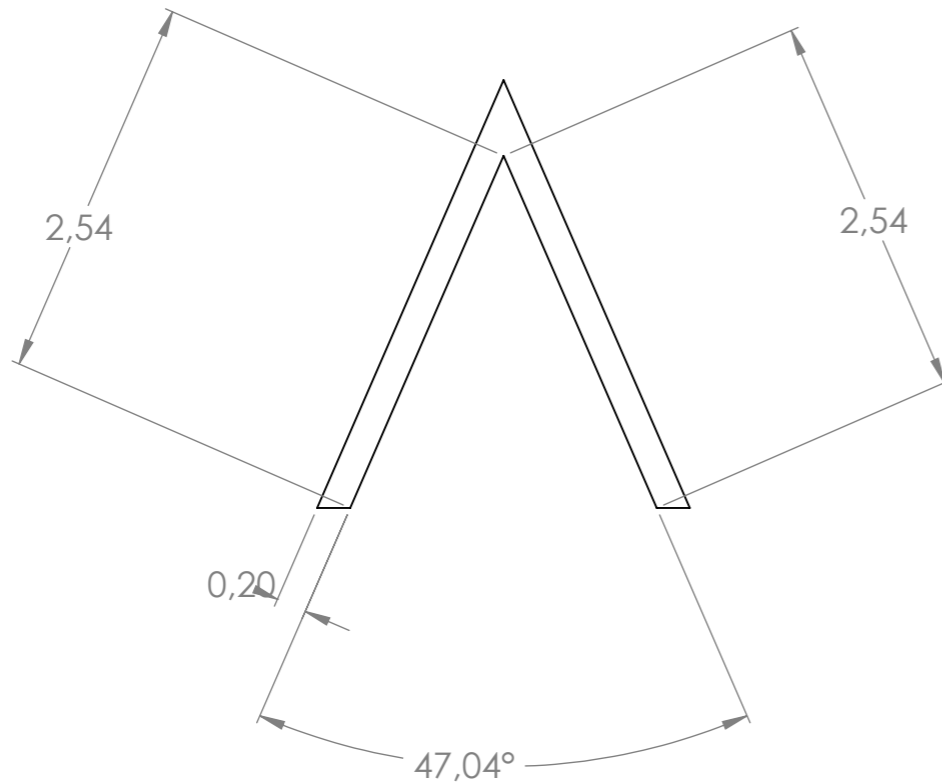
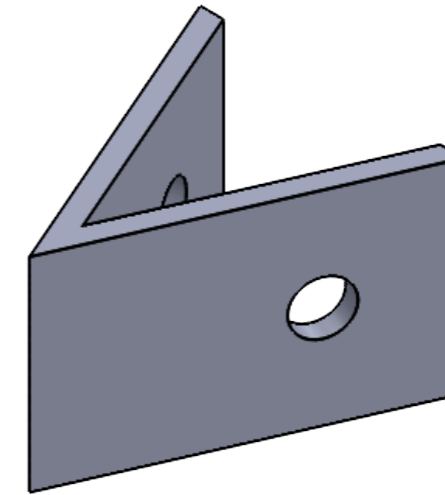
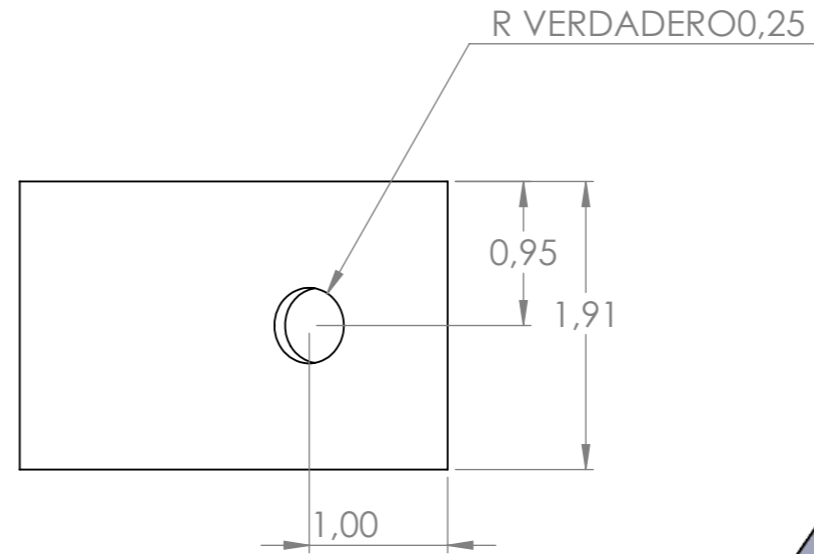
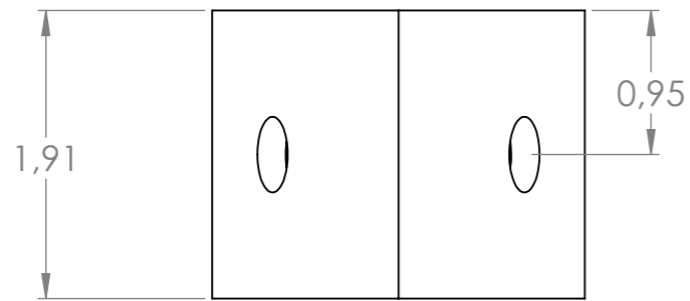
	TAPA POSTERIOR		MATERIAL: ACERO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:4	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 25/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A





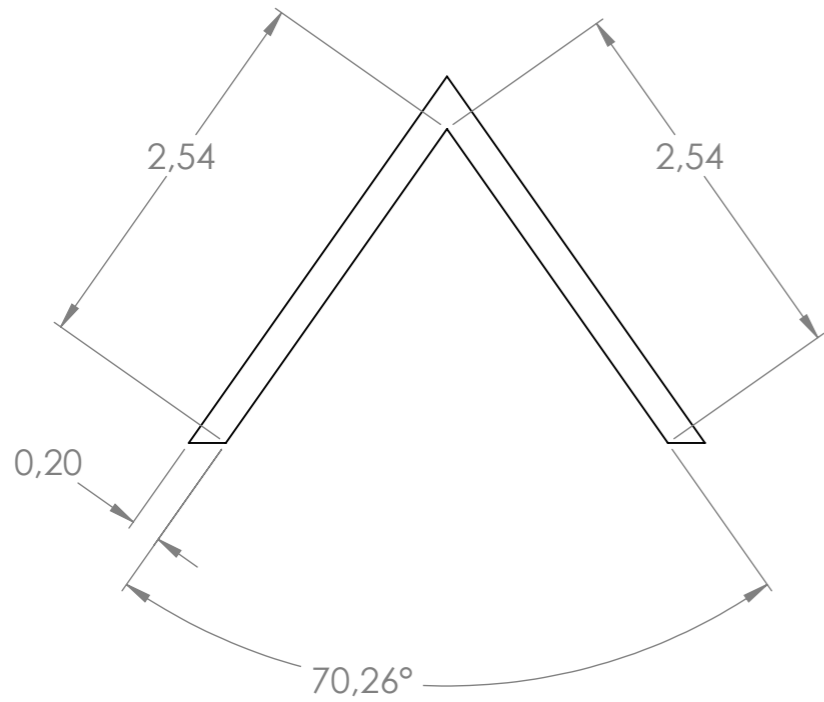
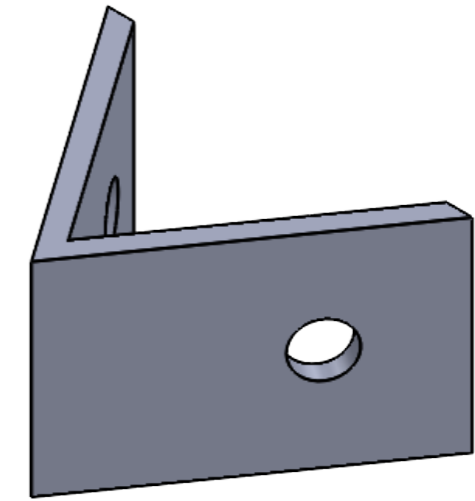
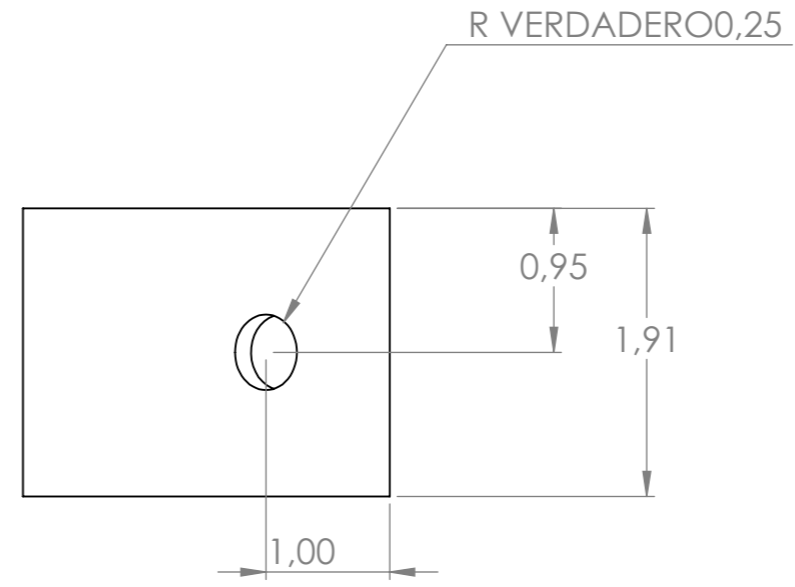
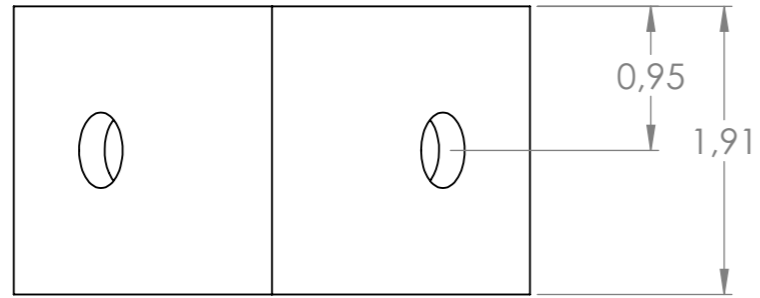
	TAPA LATERAL 2		MATERIAL: ACERO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 1:4	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 26/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A



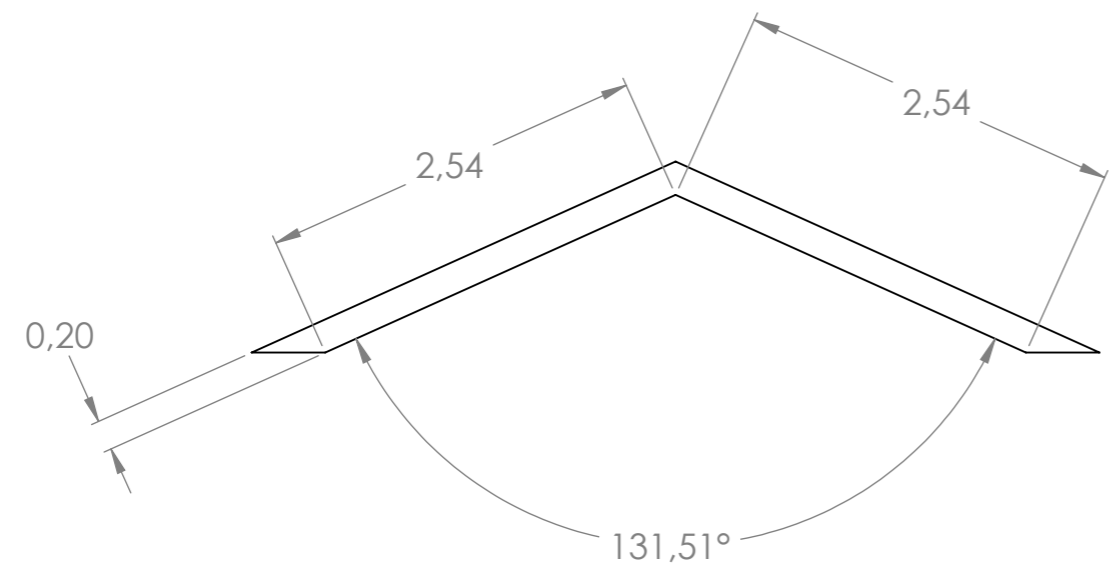
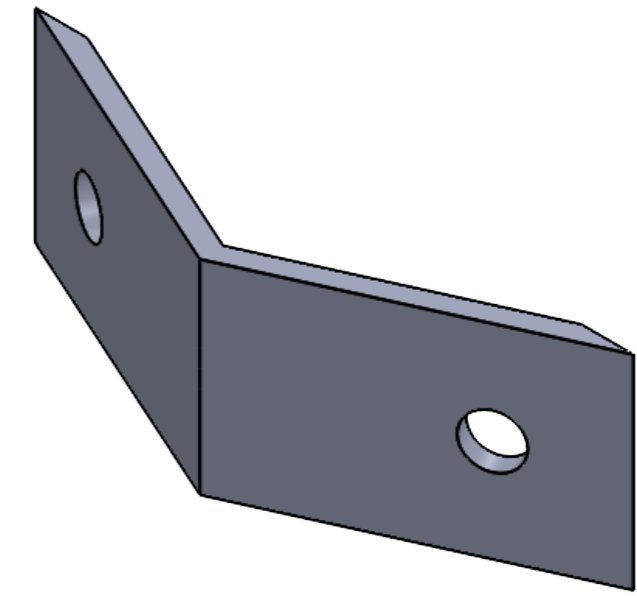
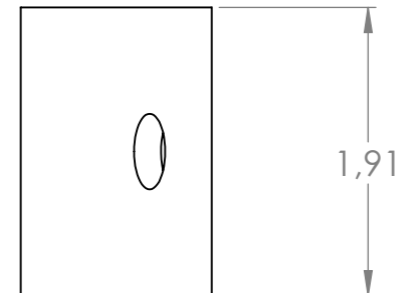
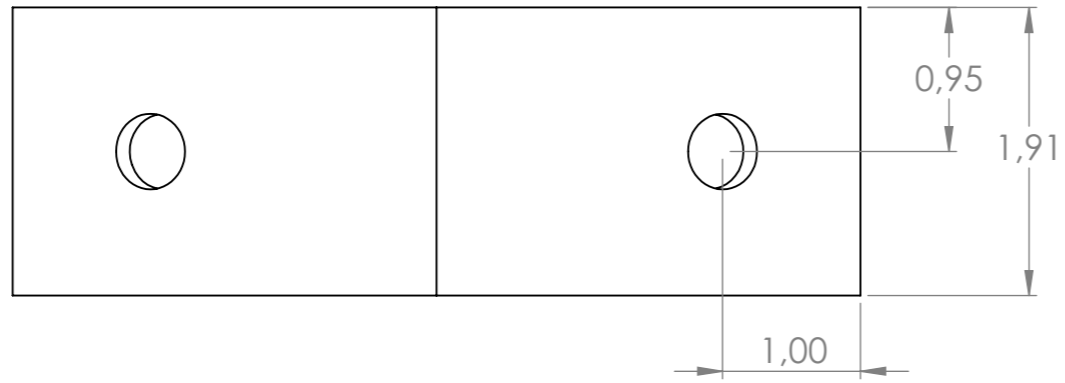
		SOPORTE DE ESQUINA EN L		MATERIAL: ACERO	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 2:1		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 27/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	




		SOPORTE DE ESQUINA EN L		MATERIAL: ACERO	
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 2:1		REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 28/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	



		SOPORTE DE ESQUINA EN L		MATERIAL: ACERO	
	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
	ESCALA: 2:1	REVISADO POR: N/A		TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 29/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	



		SOPORTE DE ESQUINA EN L		MATERIAL: ACERO	
		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		AREA: DISEÑO	UNIDADES: Cm
ESCALA: 2:1	REVISADO POR: N/A			TOLERANCIA: N/A	
FORMATO: A3	HOJA: 30/30	DIBUJADO POR: Brayan Chacón	FECHA: 14/01/2026	FECHA REV: N/A	