



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR LINEAL FRESNEL

Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Mención
Energía, de la Universidad Técnica Federico Santa María

Christian Venegas Coll

1 CONTENIDO

2	Nomenclatura	3
3	Resumen Ejecutivo	6
4	Introducción	10
5	La Radiación Solar	12
5.1	Según Lugar de Referencia	13
5.2	Según Orientación	13
5.3	Según Tipo	13
6	Ángulos Solares.....	15
7	Colectores Solares	18
8	Concentrador Lineal Fresnel (LFC).....	23
8.1	Orientación e Inclinación.....	23
8.2	Reflector Primario	24
8.3	Receptor (Reflector Secundario y Absorbedor)	26
8.4	Estructura.....	30
8.5	Motores y Movimiento	31
8.6	Rendimiento	33
8.7	Fresnel VS Parabolico	38
9	Diseño	40
9.1	Análisis Estructural.....	44
9.2	Funcionamiento y Materiales.....	48
9.3	Motor y Controlador	56
9.4	Torque	59
9.5	Precisión Angular	63
9.5.1	Caso Ideal	64
9.5.2	Caso de Diseño	68
10	Validación	71
11	Costos.....	76
12	Trabajo Futuro	78

13	Anexos.....	79
13.1	Montaje Electrónico	79
13.2	Código Programación (Arduino)	81
13.3	Planos de Cortes	91
13.4	Planos de Piezas	99
13.5	Planos de Ensamblajes.....	125
13.6	Detalle de Costos de Construcción	143
14	Referencias	144

2 NOMENCLATURA

DNI: Irradiancia directa normal
TLE: Tiempo Local Estándar
TSA: Tiempo solar aparente
PV: Panel fotovoltaico
ACS: Agua caliente sanitaria
PTC: Colector cilindro parabólico
CRS: Torre Centra
LFC: Colector lineal Fresnel
PDS: Disco Parabólico
CSP: Energía solar de concentración
CPC: Concentrador parabólico compuesto
IAM: Modificador del ángulo de incidencia
PWM: Modulación por ancho de pulso

H: Irradiación diaria
I: Irradiación horaria
G: Irradiancia
G_{CS}: Constante Solar
G_o: Radiación Extraterrestre
G_h: Radiación horizontal
G_n: Radiación normal
G_b: Radiación directa
G_d: Radiación difusa
G_r: Radiación reflejada
θ_m: Ángulo que subtiende el sol
θ_c: Ángulo medio de aceptación
β: Inclinación
Φ: Zenit
L: Latitud
λ: Longitud
λ_s: Longitud de zona horaria
E: Ecuación del tiempo
F: Factor de *E*
n: Día del año
ω: Hora solar
δ: Declinación
ρ: Incidencia
α: Altitud
Z: Azimut
R: Distancia Tierra-Sol

A_a : Área de apertura
 A_r : Área de recepción
 C : Razón de concentración
 A : Superficie
 b : Ancho de una geometría
 b_p : Distancia entre apoyo y aplicación de carga
 B : Ancho total del arreglo de espejos
 h : Altura de una geometría
 L_a : Largo de una geometría
 ΔL : Longitud adicional de receptor
 e : Espesor de una geometría
 r : radio de una geometría
 d_i : Espaciamiento entre espejo “i” y el adyacente
 P : Peso
 ρ : Densidad
 m : Masa de un elemento

H_r : Distancia entre planos de espejos y base de receptor
 H_{corr} : Corrección de H_r al desplazar el eje del espejo
 H_a : Distancia entre planos de espejos y eje del absorbedor
 x : Distancia del centro del receptor a eje de giro de espejo
 Δx : Corrimiento del eje del espejo en el eje x cuando se encuentra en posición horizontal
 Δy : Corrimiento del eje del espejo en el eje y cuando se encuentra en posición horizontal
 x_n : Corrimiento del eje del espejo en el eje horizontal al inclinar el espejo
 y_n : Corrimiento del eje del espejo en el eje vertical al inclinar el espejo
 x_{corr} : Corrección de x al desplazar el eje del espejo
 r_0 : Radio de desplazamiento del eje del espejo
 α : Ángulo del radio de desplazamiento con respecto a la superficie del espejo
 W : Ancho de espejo
 W_r : Área de apertura de receptor
 W_R : Ancho de radiación reflejada

η : Rendimiento óptico
 η_0 : Rendimiento óptico óptimo
 η_t : Rendimiento térmico
 $\dot{Q}_p$: Pérdidas térmicas
 ΔT : Diferencia de temperatura entre absorbedor y ambiente
 u_0 : Coeficiente lineal de la pérdida de calor
 u_1 : Coeficiente cuadrático de la pérdida de calor

$\bar{x}$: Ubicación del centroide en el eje x de una geometría completa
 $\bar{y}$: Ubicación del centroide en el eje y de una geometría completa

I_A : Momento de inercia de área
 $I_{A,x}$: Momento de inercia de área en base al eje x
 $I_{A,y}$: Momento de inercia de área en base al eje y
 $I_{A,xy}$: Producto de inercia
 d_x : Distancia en eje x entre centroides
 d_y : Distancia en eje y entre centroides
 v : Deflexión
 w : Carga distribuida
 E : Módulo de elasticidad
 $\theta_{v,máx}$: Pendiente máxima de deflexión
 x_{CM} : Ubicación del centro de masa en el eje x
 y_{CM} : Ubicación del centro de masa en el eje y
 I_m : Momento de inercia de masa
 τ : Torque
 α_c : Aceleración angular
 μ_e : Coeficiente de roce
 F_D : Fuerza de arrastre
 C_D : Coeficiente de arrastre
 V : Velocidad lineal
 Re : Número de Reynolds
 μ : Viscosidad dinámica
 ν : Viscosidad cinemática

3 RESUMEN EJECUTIVO

El concentrador solar tipo Fresnel es uno de los cuatro tipos de concentradores comúnmente utilizados para el aprovechamiento de la energía solar en aplicaciones a media y alta temperatura. Si bien, no es el de mayor eficiencia de conversión, su simple diseño y costos de inversión reducidos lo hacen de interés.

El objetivo general es diseñar un concentrador solar tipo Fresnel con materiales de fácil disposición en el mercado nacional, para ser utilizado como banco de pruebas para el estudio y mejoramiento de la eficiencia de esta tecnología.

Para cumplir con el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el estado del arte en cuanto a diseños de concentradores Fresnel.
- Seleccionar, dimensionar y especificar componentes adecuados para la construcción de un concentrador Fresnel.
- Realizar los planos de fabricación del equipo concentrador Fresnel.
- Desarrollar el algoritmo de control que incluya la lógica de operación de los espejos del concentrador Fresnel.
- Realizar una prueba de concepto del funcionamiento del concentrador mediante la construcción de un módulo reflector.

En base al cumplimiento de los objetivos planteados, en primer lugar, se realiza un análisis rápido de los aspectos más importantes de la radiación solar aplicables a un concentrador Fresnel. Se establece la definición, nomenclatura utilizada y la constante. Además, se establecen las distintas clasificaciones que pueden ser aplicadas a la radiación para acotar y precisar su uso. La radiación según lugar de referencia establece si ésta es medida en el interior o exterior de la atmósfera, en donde disminuye su valor al pasar por las diferentes capas de la Tierra. La radiación según orientación diferencia la cantidad de radiación captada por una superficie variando su ángulo de inclinación con respecto a la dirección de los rayos incidentes, en donde su mayor valor es obtenido cuando los rayos inciden de forma normal a la superficie. Finalmente, la radiación según tipo diferencia la radiación que proviene directamente del sol, la que se dispersa en las distintas capas atmosféricas cambiando su ángulo de incidencia y la que rebota en el suelo y es reflejada. Las dos iniciales son las de mayor magnitud.

La siguiente sección estudia las bases del movimiento solar, estableciendo los ángulos y ecuaciones necesarias para determinar con precisión la ubicación del sol en cada momento del día y durante todos los días del año. La latitud (L) y longitud (λ) son parámetros que permiten ubicar un punto en particular de la superficie terrestre. La declinación (δ) hace referencia al lugar de la órbita en que se encuentra la tierra girando alrededor del sol en un instante determinado. Los conceptos de ecuación del tiempo (E), hora solar (ω), inclinación (ρ), zenit (Φ) y azimut (Z) son utilizados para definir la posición del sol en base a un observador determinado.

Luego de entender la manera en que la radiación solar es recibida y cómo se puede identificar la posición de la fuente en cada momento, se realiza un estado del arte, a groso modo, de los métodos

de captación y formas de utilización de la energía solar. Los colectores solares pueden captar la radiación solar y convertirla inmediatamente en energía eléctrica, como los paneles fotovoltaicos, o utilizar el calor generado para temperar espacios o para el calentamiento de agua de uso doméstico. Cuando se requiere de una temperatura mayor, como en procesos industriales, se hace necesario concentrar la radiación solar en una superficie más pequeña, definiendo los colectores solares concentradores, los cuales incrementan los costos de fabricación y complejidad debido a que deben ser equipos móviles capaces de reaccionar al movimiento del sol. Los concentradores se dividen en los que concentran la radiación de forma lineal y requieren un movimiento en un solo eje, y los que concentran la radiación en un punto y requieren movimiento en dos ejes, con la ventaja de alcanzar mayores temperaturas.

En concreto, el estudio se centra en el concentrador lineal tipo Fresnel. Se realiza un estudio en detalle de cada uno de los componentes involucrados en el correcto funcionamiento del concentrador.

El componente principal del concentrador son los reflectores primarios, cuya forma ideal para concentrar la radiación en un punto es una sección particular de una parábola. Sin embargo, tanto la parábola como sección a utilizar varían a medida que cambia el ángulo de incidencia para cada uno de los espejos el arreglo, lo que produce errores ópticos para cualquier posición diferente a la de diseño. Por lo anterior, frecuentemente se utilizan espejos planos, los cuales reducen los costos de fabricación, pero aumentan el error óptico que luego es corregido con un concentrador secundario.

La orientación Norte-Sur del eje de giro de los espejos en un concentrador Fresnel entrega una mayor cantidad de energía recolectada durante el año y, debido a su gran longitud, es una orientación difícil de inclinar a menos que el terreno posea una inclinación natural. Por otro lado, la orientación Este-Oeste entrega menos energía a lo largo del año, pero de manera más estable. La inclinación en este caso es factible, pero complejiza su construcción.

La inclinación de cada espejo depende de la distancia entre el eje de giro del espejo y el centro del receptor y del ángulo de incidencia solar. Además, cuando el eje de giro coincide con el punto central del espejo, el movimiento de todos los espejos es coordinado, rotando en el mismo instante. Si el centro del espejo está desplazado, la posición de cada espejo se obtiene mediante un proceso iterativo y el movimiento se produce en distinto momento para diferentes espejos.

Existen diferentes configuraciones para el receptor secundario en un concentrador Fresnel con el único objetivo de reducir el área de incidencia de la radiación, obteniendo temperaturas más elevadas en el absorbedor. Para reducir las pérdidas térmicas se utiliza generalmente un vidrio en la base del receptor, manteniendo la radiación dentro del receptor y disminuyendo la convección del aire.

El rendimiento de un concentrador está definido por la eficiencia óptica y la eficiencia térmica. Las pérdidas ópticas más importantes a tener en cuenta son el sombreamiento y el bloqueo, efectos producidos por la incidencia de la radiación en los espejos adyacentes al de estudio, sin embargo, es importante tomar en cuenta también la radiación que pueda escaparse del receptor, el sombreamiento del receptor sobre los espejos y la calidad de reflectividad del espejo utilizado. Por

otro lado, las pérdidas térmicas aumentan a medida que aumenta la temperatura del absorbedor, por lo que es necesario reducirlas al máximo para maximizar la energía obtenida.

En comparación a un concentrador cilindro parabólico, un concentrador Fresnel posee menor eficiencia óptica debido a las pérdidas antes mencionadas. A pesar de lo anterior, el concentrador Fresnel tiene una potencia con picos térmicos más altos por unidad de área, sin embargo, la producción anual de energía es menor. En general, el concentrador Fresnel posee ventajas constructivas, las cuales se traducen en disminución de costos, y desventajas operativas, como una mayor precisión de seguimiento.

Los parámetros principales para la construcción del módulo Fresnel fueron tomados de [1], mientras que para el dimensionamiento de la estructura y componentes se aplicaron análisis de deflexión, de centros de masa y geométricos. La deflexión es importante para determinar la interferencia que pueda tener diversas partes de la estructura si es que se curva en exceso, y más importantes aún, sirve para determinar la desviación de la radiación del receptor debido a razones constructivas. Con el centro de masa es posible reducir al máximo el torque que debe aplicar el motor sobre el espejo, pudiendo reducir los altos costos en motores, pero complejizando el tracking debido al desplazamiento del centro del espejo y el eje de giro.

Por último, variados análisis geométricos son necesarios para determinar la precisión que se requiere en un motor para una configuración determinada, el momento y la cantidad de pasos que debe dar un motor para que la radiación incida en el receptor y el dimensionamiento de diversos componentes del concentrador Fresnel.

Mediante la construcción del prototipo de un módulo y un receptor plano, fue posible la verificación del modelamiento solar y del método de control utilizado para los motores.

4 INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son aquellas cuyo ritmo de utilización es menor a su ritmo de renovación, es decir, que tras ser utilizada se regeneran de manera natural o artificial y no se consumen ni se agotan en una escala humana. Entre estas fuentes de energías están: la hidráulica, la solar, la eólica y la de los océanos. Además, dependiendo de su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables la energía proveniente de la biomasa, la energía geotérmica y los biocombustibles.

El Sol es la estrella más cercana a nuestro planeta y se formó hace 5 mil millones de años. Contiene cerca del 99.86% de la masa del sistema solar y está compuesto principalmente de Hidrogeno (74%) y de Helio (24%). Las altas temperaturas de su superficie generadas por el proceso de fusión nuclear permiten la liberación y transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas. Se estima que cada segundo genera 760.000 veces la producción de energía anual a nivel mundial.

Estas ondas electromagnéticas son utilizadas como fuente de energía por los vegetales para la fotosíntesis, por la biosfera para regular la temperatura del planeta, y también por los seres humanos. Casi la totalidad de la energía que permite los procesos de nuestro planeta proviene de forma directa o indirecta del Sol. Es una de las fuentes de energía más constantes, a causa de la abundancia y la alta radiación recibida en la tierra, la cual depende de la hora del día, la inclinación de los rayos de sol y la cobertura de las nubes.

La radiación solar puede ser convertida directamente a energía eléctrica a través de celdas fotovoltaicas. Estas celdas normalmente están hechas de silicio, un elemento semiconductor que tiene la propiedad de generar pequeñas cantidades de energía eléctrica cuando recibe una cantidad importante de radiación.

Para convertir la radiación solar en energía térmica se necesita de un dispositivo denominado colector termosolar, el cual absorbe la radiación solar y la transfiere a un fluido. Los más comunes son los colectores planos, que sirven para calentar agua hasta unos 90°C y se utilizada para obtener agua caliente sanitaria.

Otro tipo de colectores (concentradores), de mayor tamaño, permiten alcanzar temperaturas más elevadas, llegando a los 500°C. Estos solo se aplican en lugares donde la radiación presenta determinadas características, como cielos muy limpios. La energía térmica producida por estos colectores es generalmente empleada para generar vapor, el cual es posteriormente utilizado en una turbina para generar electricidad.

Una de las principales barreras de estas tecnologías es que depende de la disponibilidad de radiación, la cual se recibe solamente durante el día, por lo que se requiere combinarla con otras fuentes de energía o bien, asociarla a sistemas de almacenamiento.

Chile se encuentra entre los países con más radiación solar en el mundo, siendo un país con un potencial prácticamente ilimitado desde el punto de vista del recurso. Además, las grandes extensiones de tierra desértica otorgan gran disponibilidad.

El Desierto de Atacama es el punto del planeta que recibe los más altos niveles radiación solar. Tiene un promedio anual de lluvias de 2 [mm] y de 4.000 horas de sol, con un potencial energético de 2.500 [kWh/m² año] de radiación global horizontal y de 3.500 [kWh/m² año] de radiación directa normal

La energía solar tiene el potencial de convertirse en el motor para la transformación productiva del país.

5 LA RADIACIÓN SOLAR

Se define la radiación como la emisión de energía proveniente del sol en forma de ondas electromagnéticas. Para medirla es necesario adoptar los términos de irradiación e irradiancia. La irradiación es la energía que incide en una superficie en un cierto período de tiempo, siendo sus unidades de J/m^2 o unidades equivalentes. En [2], se utiliza el símbolo H cuando se considera un período de tiempo de un día y el símbolo I cuando es de una hora. Al hablar de la energía instantánea que impacta en una superficie (potencia), el término utilizado es irradiancia (G), la cual se mide en unidades de W/m^2 o unidades equivalentes. En adelante se utilizará en general el término de radiación, especificando su forma de medición de ser necesario (instantánea, horaria, diaria, etc.).

La Constante Solar (G_{CS}) se define como la intensidad de energía recibida fuera de la atmósfera por una superficie perpendicular a la propagación de la radiación a una distancia media entre la tierra y el sol. Su valor se estima en $1367[W/m^2]$.

Debido a la gran distancia entre la Tierra y el Sol y el gran tamaño del Sol en comparación con la tierra, se considera que la radiación es emitida de un único punto y que llega de forma paralela a la superficie terrestre (A), según se muestra en la Ilustración 1.

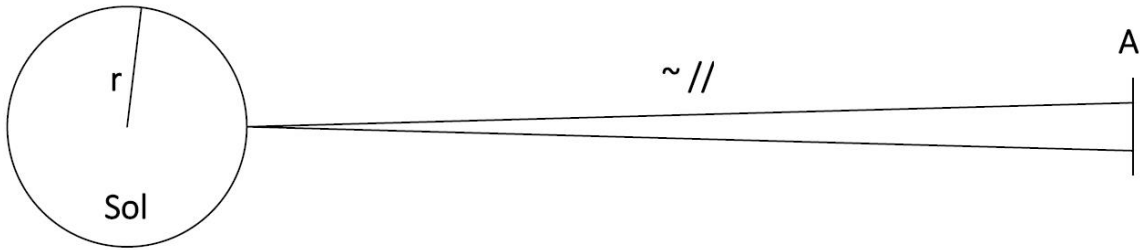


Ilustración 1: Radiación paralela proveniente del Sol.

Adicionalmente, la radiación que incide en un único punto de una superficie (A) proviene en realidad de todo el aro solar, el cual subtiende un ángulo $\theta_m = 32' \approx 0,53^\circ$, según [2].

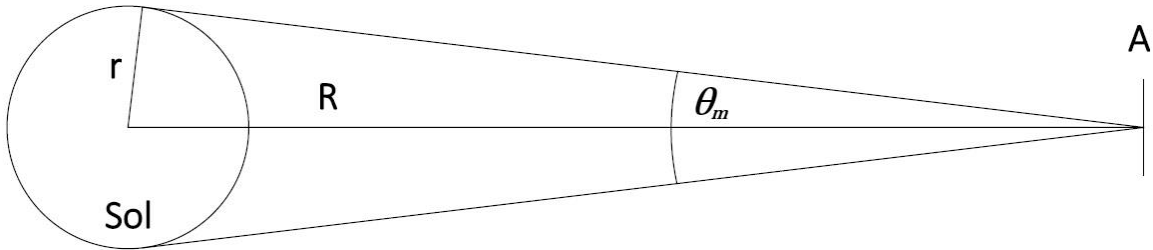


Ilustración 2: Ángulo θ_m de la radiación que incide sobre un punto.

Por otro lado, es posible establecer la radiación que incide en una superficie determinada según distintos criterios:

5.1 SEGÚN LUGAR DE REFERENCIA

La atmósfera se encarga de absorber, desviar, dispersa y reflejar distintas longitudes de onda de la radiación proveniente del sol, por lo que la radiación que incide en la superficie terrestre es siempre menor que la que se puede medir en el exterior de la tierra (radiación extraterrestre), donde la atmósfera ya no tiene influencia. Cuando se habla de la radiación extraterrestre se utiliza el subíndice o , por ejemplo, G_o .

5.2 SEGÚN ORIENTACIÓN

La radiación recibida por una superficie varía al cambiar su orientación. Se puede observar en la Ilustración 3 que la radiación que impacta en la superficie (A) en el plano horizontal terrestre es solo una fracción de la que recibiría la misma superficie si estuviera en una inclinación (β) tal que los rayos impactaran de forma normal a ella.

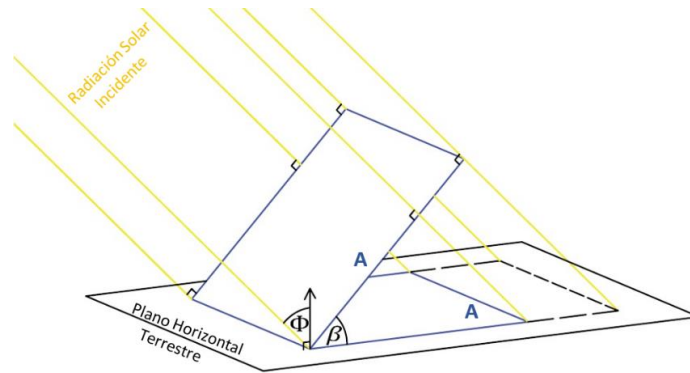


Ilustración 3: Radiación normal y horizontal.

Se utiliza el subíndice h para hacer referencia a una superficie orientada en el plano horizontal a la superficie terrestre, mientras que el subíndice n es utilizado cuando la superficie se orienta de forma normal a la radiación solar. Esta última orientación es donde se recibe mayor cantidad de radiación solar por metro cuadrado. La relación entre la radiación normal y horizontal está definida por medio del ángulo de zenit (Φ) formado entre la dirección de la radiación solar y el vector normal a la superficie terrestre.

$$G_h = G_n \cdot \cos \Phi \quad (1)$$

5.3 SEGÚN TIPO

La radiación que no ha sido dispersada por la atmósfera y que incide en una superficie en la dirección de los rayos solares se denomina Radiación Directa y es representada con el subíndice b . La radiación que interactúa con la atmosfera, cambiando su dirección, y que incide en una superficie proveniente de todas las direcciones, se denomina Radiación Difusa y es representada con el subíndice d . La Radiación Reflejada (subíndice r) se define como la radiación directa y difusa que incide en el suelo o en algún cuerpo de la superficie terrestre y se refleja en la superficie en estudio.

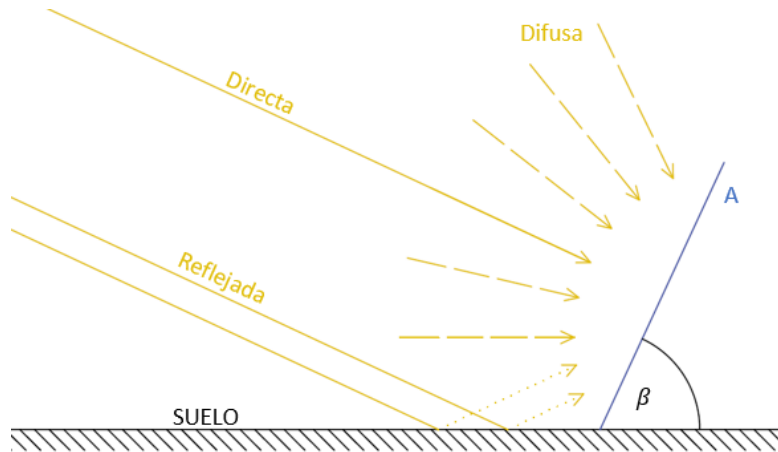


Ilustración 4: Diagrama de radiación directa, difusa y reflejada.

La Radiación Global es el total de la radiación recibida por una superficie y es la suma de las radiaciones directa, difusa y reflejada. La radiación directa es la más presente en días despejados, mientras que la difusa está más presente en días nublados. Por lo general, la radiación reflejada es despreciable en comparación con las otras dos.

De acuerdo con las definiciones anterior, es posible definir la irradiancia directa normal (*DNI* – Direct Normal Irradiance) como la cantidad de radiación solar recibida por unidad de área por una superficie que siempre se mantiene perpendicular (o normal) a los rayos que vienen en línea recta desde la dirección del sol en su posición actual en el cielo. Normalmente, se puede maximizar la cantidad de radiación recibida anualmente por una superficie manteniéndola normal a la radiación entrante. Esta cantidad es de particular interés para las instalaciones solares térmicas de concentración y las instalaciones que rastrean la posición del sol.

6 ÁNGULOS SOLARES

Para definir la posición de un observador en la superficie de la tierra es necesario establecer dos ángulos de medida: la latitud y la longitud.

La latitud (L) es la ubicación angular hacia el Norte (positivo) o hacia el Sur (negativo) del ecuador terrestre. Su rango de valores va entre 90° y -90° . La línea formada por todos los puntos con un mismo valor de latitud se denomina paralelo. La línea del ecuador, lo trópicos y los círculos polares son paralelos establecidos dados los efectos de la luz solar sobre el planeta. Para poder definir la longitud (λ) se hace uso de los llamados meridianos. Éstos son semicircunferencias que van de polo a polo alrededor de todo el planeta. Se estableció el meridiano de Greenwich como el de meridiano base o cero. De este modo, la longitud se define como la distancia angular entre el meridiano base y el punto seleccionado medido a lo largo del paralelo al que pertenece dicho punto. Se considerará un valor positivo hacia el este y negativo hacia el oeste. El rango por tanto va entre 180° y -180° . Considerando que la tierra gira en torno a su eje en 24 horas, es posible establecer que cada zona horaria corresponde a 15° de rotación del planeta ($360^\circ/24 [h]$).

Es evidente que la posición aparente del sol en el cielo en un momento en particular es diferente para distintos espectadores alrededor de la tierra y depende tanto de la latitud, como de la longitud, mientras que el sistema horario solo depende de la longitud. En base a esto, la definición del tiempo pretende establecer el comportamiento del sol a lo largo del día, de modo de saber en qué momento aparece y desaparece, diferenciar la mañana de la tarde, etc.

El Tiempo Local Estándar (TLE) es la hora que una persona puede observar en su reloj y le permite organizar sus actividades en base a la disponibilidad de luz natural. Sin embargo, esta hora no representa con exactitud el comportamiento del sol, ya que no es práctico que todos tengan horarios distintos según su ubicación particular, la cual cambiaría al desplazarse de un lugar a otro durante el día. Por ejemplo, al medio día del reloj, el sol no se encuentra necesariamente en su posición más alta. El Tiempo Solar Aparente (TSA) mide el tiempo donde realmente se encuentra el sol para un punto determinado de la tierra, y para obtenerlo se deben realizar 2 correcciones sobre el TLE . La primera relacionada con la longitud real (λ) en comparación con la longitud de la zona horaria utilizada (λ_s) o meridiano en que se basa el TLE , considerando que el sol tarda 4 minutos en recorrer 1° de longitud. La segunda corrección es dada por la Ecuación del Tiempo (E) la cual toma en cuenta las perturbaciones en la tasa de rotación de la tierra como la variación en la velocidad del movimiento de traslación terrestre alrededor del Sol y la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de su órbita. En [2] se entrega la ecuación para corregir TLE , a la cual se le realizan las modificaciones adecuadas según el convenio de signos a utilizar, obteniendo:

$$TSA = TLE + \frac{E}{60} - \frac{4 \cdot (\lambda_s - \lambda)}{60} \quad (2)$$

Donde TSA y TLE están en horas, E está en minutos y λ_s y λ se encuentran en grados. Es común que la zona horaria se exprese en horas y como número entero, por lo que se realiza la conversión a grados considerando los $15^\circ/hora$ establecidos anteriormente.

Diversas expresiones para la ecuación del tiempo se han establecido a lo largo del tiempo, las que varían en precisión. Se utilizará la que muestra [2], la cual fue formulada por Spencer en el año 1971 en el documento “Fourier Series Representation of the Position of the Sun.” utilizando series de Fourier [3] y que presenta un error máximo de 0,143°, lo que equivale a unos 35 segundos:

$$E = 229.2 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos F - 0.032077 \cdot \sin F - 0.014615 \cdot \cos(2 \cdot F) - 0.04089 \cdot \sin(2 \cdot F)) \quad (3)$$

En el mismo documento se presenta el factor F , donde n es el día del año ($1 < n < 365$) pudiendo adoptar valores decimales:

$$F = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (4)$$

Las relaciones geométricas entre un plano fijo o móvil posicionado respecto a la tierra y la radiación solar, puede describirse en términos de varios ángulos con un conjunto de convenciones de signos:

- Hora Solar (ω): es el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la Tierra sobre su eje a 15° por hora. Se considera en la mañana es negativo y en la tarde positivo, siendo cero en la posición más alta del sol. En otras palabras, es el TSA expresado angularmente según la ecuación (5).

$$\omega = (TSA - 12) \cdot 15 \quad (5)$$

- Declinación (δ): se define como la posición angular del sol en el mediodía solar (es decir, con el sol frente al meridiano local) con respecto al plano del ecuador. El rango va entre los 23,45° (hacia el Norte) y -23,45° (hacia el Sur). La ecuación utilizada es la que muestra [2], obtenida nuevamente de Spencer en 1971 ($error < 0.035^\circ$) [3], donde el factor F es el determinado por la ecuación (4):

$$\delta = \frac{180}{\pi} \cdot (0.006918 - 0.399912 \cdot \cos F + 0.070257 \cdot \sin F - 0.006758 \cdot \cos(2F) + 0.000907 \cdot \sin(2F) - 0.002697 \cdot \cos(3F) + 0.00148 \cdot \sin(3F)) \quad (6)$$

- Incidencia (ρ): El ángulo de incidencia (ρ) es el que se forma entre la dirección de la radiación solar directa y la normal a una superficie en particular. Para una superficie horizontal este ángulo corresponde al zenit. El ángulo de incidencia se puede descomponer en el plano transversal y longitudinal. El ángulo de incidencia transversal (ρ_t) es el que se proyecta en el plano este-oeste cuya normal es horizontal, por lo que se relaciona con el movimiento a lo largo del día. El ángulo de incidencia longitudinal (ρ_l) es el medido sobre el plano Norte-Sur cuya normal es horizontal, por lo que se relaciona con la variación del sol a lo largo del año.
- Zenit (Φ): es el que se forma entre la dirección de la radiación solar y la vertical, es decir, el ángulo de incidencia sobre una superficie horizontal. En general se utilizan valores entre 0° cuando el sol está directamente en la vertical (se dice que está en el zenit) y 90° cuando el sol está en el horizonte. Una expresión para este ángulo está dada en [2] como un caso particular para el ángulo de incidencia.

$$\cos \Phi = \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin L \cdot \sin \delta \quad (7)$$

- Altitud (α): el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, es decir, el complemento del zenit.
- Azimut Solar (Z): es el ángulo formado por la proyección de la radiación solar en el plano horizontal con un eje de referencia. Para el hemisferio sur, el eje de referencia es la dirección Norte y en el hemisferio norte la referencia es la dirección Sur. Se considera 0° en el eje de referencia y su rango es entre 180° y -180° , siendo positivo hacia el oeste y negativo hacia el este. Se adapta la ecuación dada en [2] para utilizarla en el hemisferio Sur, obteniéndose:

$$Z = \text{sign}(\omega) \cdot \left| 180 - \cos^{-1} \left(\frac{\cos \Phi \cdot \sin L - \sin \delta}{\sin \Phi \cdot \cos L} \right) \right| \quad (8)$$

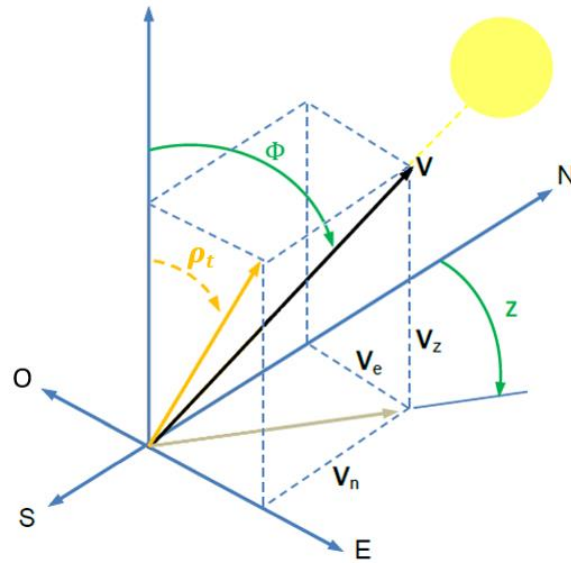


Ilustración 5: zenit (Φ), azimut (Z) y ángulo de incidencia transversal (ρ_t). (Adaptación de [1])

7 COLECTORES SOLARES

El colector solar es un dispositivo capaz de recibir la energía solar en forma de radiación y convertirla en otro tipo de energía. En general se utilizan líquidos con buenas propiedades para absorber, transportar y almacenar de forma térmica la energía proveniente del sol (fluido caloportador). Otro método de colección de energía solar son los Paneles Fotovoltaicos (*PV*), los cuales realizan la transformación de la radiación solar en energía eléctrica.

A nivel doméstico los colectores solares térmicos son utilizados principalmente para agua caliente sanitaria (*ACS*) y para el calentamiento y enfriamiento de espacios. A nivel industrial, son utilizados para la generación de energía eléctrica, generación de calor para procesos y desalinización de agua.

En los colectores solares se distinguen dos áreas que definen el funcionamiento de éste. El “área de apertura” (A_a) es la máxima área proyectada en un plano que recibe la radiación solar directamente en un colector. Por ejemplo, en un colector de tubos al vacío el área de apertura se calcula multiplicando el diámetro interior del tubo de vidrio transparente, la cantidad de tubos y el largo de estos. En el caso de un colector cilindro parabólico (*PTC*), el área de apertura es calculada multiplicando el ancho de la parábola por su largo. El A_a es la superficie estándar a utilizar cuando se citan valores de eficiencia. Por otro lado, el “área de recepción” o absorción (A_r) es el área donde converge la radiación y en donde se encuentra el material que recibe la energía solar para convertirla en energía útil. Se define entonces, la “razón de concentración” (C) como la relación entre el área de apertura y el área de recepción.

En [2] se analiza la máxima razón de concentración para colectores lineales y circulares, basado en la segunda ley de la termodinámica, obteniendo:

$$C_{circular,m\acute{a}x} = \frac{1}{\sin^2 \frac{\theta_m}{2}} = 45000 \quad C_{lineal,m\acute{a}x} = \frac{1}{\sin \frac{\theta_m}{2}} = 212 \quad (9)$$

Según las definiciones anteriores se pueden definir dos tipos de colectores solares.

- **Colector Solar No Concentrador:** Es cuando el área de apertura es igual al área de recepción. En este caso la radiación solar sobre el receptor es igual a la radiación natural del sol en un área igual a la de recepción. Por ejemplo, en los diferentes tipos de colectores para la obtención de agua caliente sanitaria (*ACS*) comúnmente instalados en los techos de las casas y edificios, el área de apertura es físicamente la misma que la de recepción.



Ilustración 6: Colector de Tubos de Vacío con Heat Pipe en su interior. [4]

- **Colector Solar Concentrador:** Es cuando el área de apertura es mayor al área de recepción. En este caso la radiación solar sobre el receptor es mayor a la radiación natural del sol en un área igual a la de recepción. En esta tecnología termo solar por lo general los receptores son espejos utilizados para concentrar la radiación solar en el absorbedor. El receptor puede ser un tubo cuya función es contener al fluido que se desea calentar (fluido caloportador), el cual es transportado al consumidor. Por ejemplo, en los colectores de disco parabólico (Ilustración 7), el área de apertura es el área proyectada en el plano perpendicular a los rayos solares de toda la superficie de espejos, mientras que el área de recepción es una sección del motor Stirling ubicado frente a los espejos.

Según [2], muchos diseños han sido establecidos para la concentración de colectores. Los concentradores pueden ser reflectores o refractores, cilíndricos o superficies de revolución, continuos o segmentados, convexos, planos o cóncavos y pueden ser cubiertos o descubiertos. Además, son posibles muchos modos de seguimiento. La relación de concentración puede variar en varios órdenes de magnitud. Con esta amplia gama de diseños, es difícil desarrollar análisis generales aplicables a todos los concentradores. De este modo, los concentradores se tratan en dos grupos: colectores sin imágenes (nonimaging) con baja relación de concentración y colectores de imágenes lineales con relaciones de concentración intermedias. También hay algunas consideraciones básicas de concentradores tridimensionales que pueden operar en el extremo superior de la escala de razón de concentración.



Ilustración 7: Colector de Disco Parabólico con motor Stirling en su foco. [5]

El colector lineal Fresnel es una tecnología termo solar que genera calor mediante la concentración de la luz solar en un tubo receptor, desde donde un fluido caloportador lo transporta al consumidor. Este consumidor puede ser una turbina para generar electricidad o un proceso industrial.

Las tecnologías de concentración y no concentración poseen características distintas. Por un lado, los colectores solares no concentradores se caracterizan por ser estructuras fijas (permanecen sin movimiento a lo largo del día), lo que se traduce en una fabricación simple y de bajo costo, haciéndolo ideal para el uso doméstico. Estos equipos utilizan todos los tipos de radiación mostrados en la ilustración 4 (directa, difusa y reflejada), energía suficiente para calentar fluidos a bajas temperaturas, lo que se traduce en bajas pérdidas térmicas en el sistema. Estas temperaturas son suficientes para calentar espacios o generar agua caliente sanitaria (ACS).

Por otro lado, debido al movimiento solar aparente (es la tierra la que se mueve, no el sol), los colectores solares concentradores deben redirigir a cada instante la radiación solar hacia el receptor, por lo que se debe conocer perfectamente la dirección de la radiación a lo largo del día. Sin embargo, la radiación difusa y reflejada dependen de factores externos, por lo que se trabaja solo en base a la radiación directa. El seguimiento solar (tracking) hace que estos equipos sean más complejos y costosos, obteniendo temperaturas mucho más altas, lo que permite generar calor para procesos industriales o incluirlos en un ciclo termodinámico para la generación de energía eléctrica. Las altas temperaturas obtenidas en el fluido caloportador y la recepción indirecta de la radiación por parte de éste, generan un aumento en las pérdidas térmicas del sistema.

Dentro de los colectores solares concentradores se pueden identificar 4 tecnologías: Cilindro Parabólico (*PTC* - Parabolic Trough Collectors), Torre Central (*CRS* – Central Receiver Systems), Colector Lineal Fresnel (*LFC* – Linear Fresnel Collectors), Disco Parabólico (*PDS* – Parabolic Dish Systems).

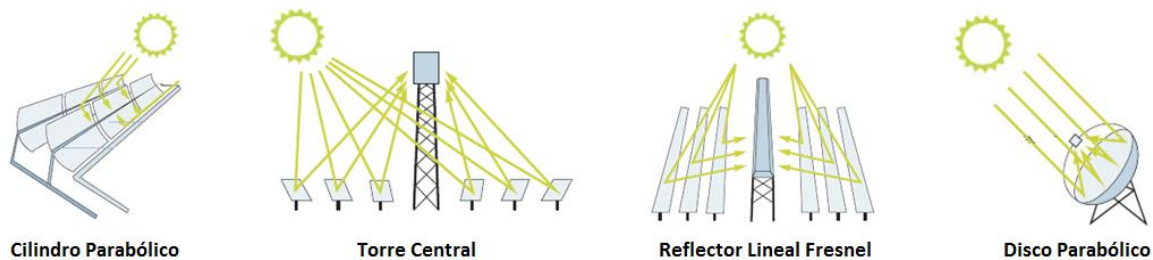


Ilustración 8: Tipos de tecnologías de concentración solar. [6]

Los concentradores de torre central y disco parabólico requieren un sistema de seguimiento en dos ejes independientes y son de foco puntual, es decir, la radiación solar recibida por el área de apertura es redirigida a un punto (o superficie) en común, alcanzando grandes temperaturas. Los concentradores cilindro parabólico y colector lineal Fresnel requieren un sistema de seguimiento de un solo eje y son de foco lineal, es decir, la radiación solar se redirige a lo largo de una superficie y en donde las temperaturas alcanzadas son menores que para el foco puntual considerando una misma área de apertura. En el concentrador de cilindro parabólico y disco parabólico el receptor cambia de posición junto con los espejos.

La energía térmica generada va a depender principalmente de la energía solar disponible, del tamaño del concentrador solar y de las pérdidas del sistema. Estas pérdidas definen la eficiencia y se producen porque la radiación es bloqueada o desviada antes de llegar al receptor y la que consigue hacerlo sufre de pérdidas térmicas causadas por conducción, convección y radiación con los elementos de su entorno.

Cualquiera de las cuatro tecnologías puede ser utilizadas para la generación de energía eléctrica a través de un ciclo termodinámico, lo que se conoce como Energía Solar de Concentración (*CSP* – Concentrated Solar Power). En la tecnología *CSP* se incrementan las pérdidas térmicas debido a los componentes adicionales agregados en el proceso, como pueden ser turbinas, condensadores, bombas, tuberías y roce mecánico. Por esta razón la eficiencia de este nuevo sistema queda determinada por la eficiencia del ciclo de vapor y la eficiencia del colector utilizado para recoger la radiación solar.

Según el artículo [6], en los ciclos de extracción de calor, la eficiencia de Carnot del bloque de potencia (los componentes de la central eléctrica que utilizan un fluido caliente para generar electricidad) aumenta con la temperatura del fluido caliente, sin embargo, las pérdidas térmicas del receptor solar aumentan con la cuarta potencia de su temperatura superficial. Por lo tanto, las ganancias de eficiencia del bloque de potencia desde una temperatura más alta pueden ser más que anulada por el aumento de las pérdidas térmicas del receptor debido a la temperatura más alta. Esta es la razón por la cual la eficiencia general del sistema alcanza un máximo a medida que aumenta la temperatura del fluido caliente.

La máxima eficiencia puede aumentarse y desplazarse hacia temperaturas más altas cuando se consiguen razones de concentración (C) de la radiación solar más altas en los colectores de la planta *CSP*. Lo anterior se explica ya que las pérdidas térmicas permanecen constantes en la misma superficie del receptor, mientras que la energía solar producida aumenta. Esta es la razón por la cual

los sistemas CSP con relaciones de concentración más altas pueden lograr mayores eficiencias del sistema y tener un mayor potencial futuro (Ilustración 9).

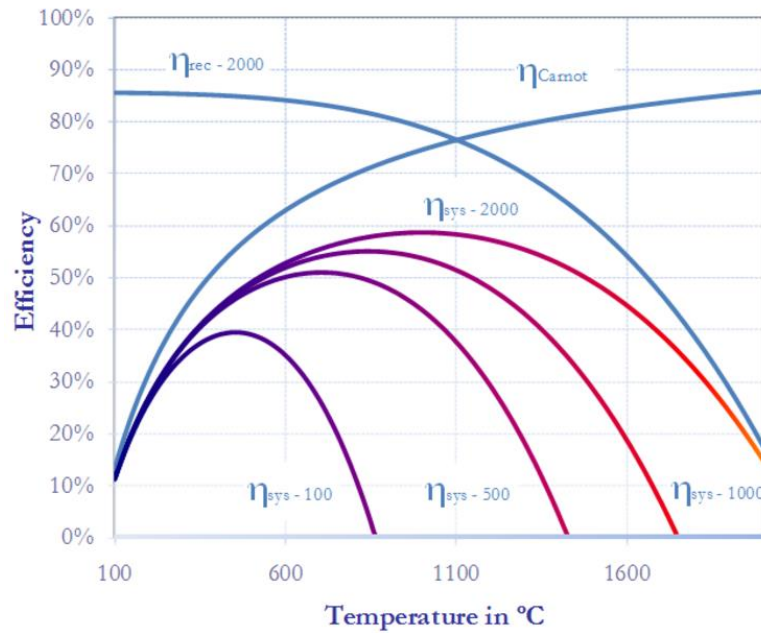


Ilustración 9: Comportamiento de la eficiencia de un colector con $C = 2000$ (η_{rec}), de Carnot (η_{Carnot}), del sistema completo con $C = 100$ ($\eta_{sys-100}$), $C = 500$ ($\eta_{sys-500}$), $C = 1000$ ($\eta_{sys-1000}$) y $C = 2000$ ($\eta_{sys-2000}$) en función de la temperatura del fluido caloportador. [6]

Una de las ventajas de la generación eléctrica a través de colectores fotovoltaicos (PV) es que, a partir de la radiación solar, generan directamente la energía eléctrica sin verse afectado por componentes externos que generen pérdidas de energía o eficiencia.

8 CONCENTRADOR LINEAL FRESNEL (LFC)

Un Concentrador Lineal Fresnel, también encontrado en la literatura como colector lineal Fresnel o reflector lineal Fresnel, es una estructura modular que se compone de un conjunto indispensable de partes que hacen posible la concentración de la radiación solar.

En primer lugar, se encuentran los “reflectores primarios”, también llamados “espejos” o “heliostatos”. Estos reflectores y la posición y geometría del concentrador son los que definen el área de apertura y la energía máxima que se puede captar del sol. Por otro lado, se encuentran los “motores” y el “sistema de seguimiento” que se encargan de orientar los heliostatos en función de la posición del sol. Uno de los elementos más importantes es el “receptor”, el cual se encarga de recibir la radiación de los reflectores primarios para transformarla en calor. Está constituido por el “reflector secundario”, que consiste en una superficie reflectiva que redirige y concentra la radiación de los heliostatos en una superficie más pequeña, el “absorbedor”. El absorbedor es un tubo que capta la radiación y calienta un “fluido caloportador” que circula en su interior. Por último, un elemento no menos importante es la “estructura de soporte” en donde se apoyan tanto los reflectores primarios, los motores y el receptor.

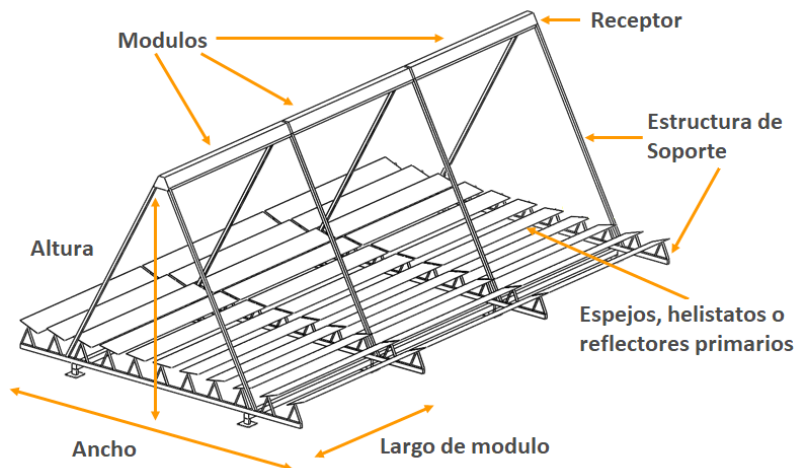


Ilustración 10: Componentes principales de un Concentrador Lineal Fresnel. (Adaptación de [7])

8.1 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN

Los campos solares modernos se orientan en la dirección Norte-Sur, es decir, el eje de giro de los espejos es paralelo al eje Norte-Sur, o en otras palabras, posee seguimiento Este-Oeste. Hay estudios que demuestran que la orientación de Norte-Sur conduce a una mayor energía anual recolectada, aunque la orientación Este-Oeste permite una generación mensual menos variable (Ilustración 11). Esto se debe a que los campos solares con orientación Este-Oeste recogen más energía en la temporada de invierno debido a que la componente longitudinal de la radiación incidente es más baja [11], radiación que se escapa por el extremo longitudinal de los receptores en los concentradores con orientación Norte-Sur.

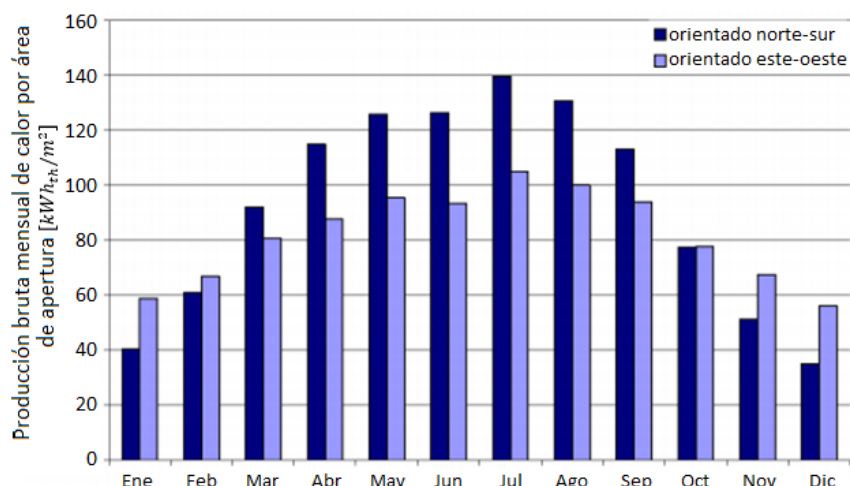


Ilustración 11: Producción mensual de calor para distintas orientaciones (hemisferio norte) [12].

La inclinación de los campos Norte-Sur reduce las pérdidas por los extremos, sin embargo, solo es posible cuando se tiene una inclinación natural del terreno, ya que, dependiendo del largo del colector, unos pocos grados de inclinación puede significar una elevación de varios metros en uno de sus extremos. Por otro lado, los campos de orientación Este-Oeste pueden inclinarse hacia el Sur en el hemisferio norte o hacia el Norte en el hemisferio sur más fácilmente, debido a que el ancho de los colectores es mucho menor que su largo, lo que se traduce en obtener una menor altura en uno de los extremos del concentrador para un mismo ángulo de inclinación. Se debe considerar que un concentrador inclinado significa un diseño más complejo y mayores costos en el soporte de cada heliostato, ya que el peso se distribuye en distintas direcciones.

Con el fin de obtener las ventajas de ambas orientaciones, se ha sugerido el uso de un *LFC* que gira con el sol de modo que la luz incidente no tiene componente longitudinal en ningún momento. Obviamente, esto maximizaría la energía recolectada a lo largo del año con una generación de energía diaria muy regular. Sin embargo, se debe considerar que se requeriría energía adicional para su funcionamiento, los elementos móviles disminuirían la precisión de los espejos e incrementarían los costos, probablemente superiores a los de los PTC.

8.2 REFLECTOR PRIMARIO

La tecnología de los LFCs recibe su nombre de la lente de Fresnel, que fue desarrollada por el físico francés Augustin-Jean Fresnel para los faros en el siglo XVIII. El principio de esta lente es la segmentación de la superficie continua de una lente plano-convexa, lo que permite una reducción sustancial del peso y volumen de la lente, a costa de una reducción en la calidad de formación de imágenes. El objetivo de esta lente es tomar la luz proveniente de un foco puntual y proyectarla paralelamente (Ilustración 12).

Para la aplicación de este principio en un LFC, se divide un colector cilindro parabólico en segmentos, cuyos centros se posicionan en un mismo plano. El objetivo en este caso es captar la luz solar incidente (paralela) para reflejarla en el punto focal.

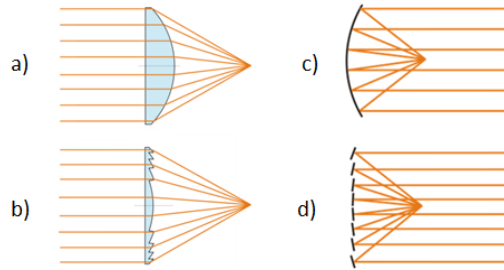


Ilustración 12: Lente Fresnel (b) que aproxima las características de una lente plano-convexa (a) y un espejo Fresnel (d) que aproxima las características de un espejo cilindro parabólico (c). [8]

En el diseño de un LFC ideal, cada uno de los segmentos pertenece a una parábola distinta, cuya distancia focal aumenta a medida que el segmento se aleja del punto focal (Ilustración 13 (a)). Sin embargo, a medida que el sol cambia de posición, la forma ideal de cada heliostato debería cambiar para lograr mantener la radiación concentrada en un mismo punto focal. Dado lo anterior, cada reflector tendría que ser capaz de adoptar la forma de un segmento de parábolas con diferentes distancias focales y a distintas distancias del eje óptico o eje de simetría a lo largo del día (Ilustración 13 (b)).

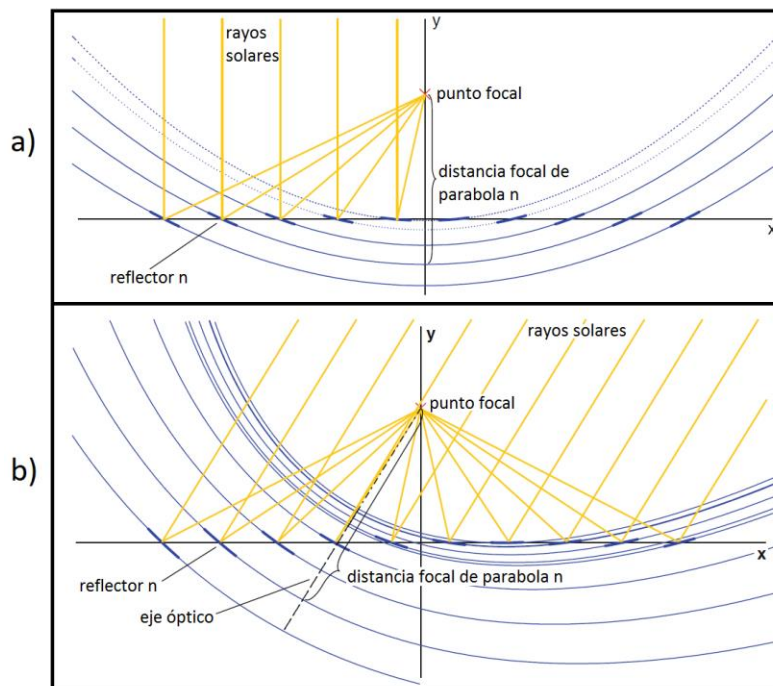


Ilustración 13: Reflectores primarios Fresnel ideales para una radiación perpendicular (a) y para incidencias atípicas (b). [9]

En la práctica, cuando se construye un concentrador lineal Fresnel, es necesario sacrificar el diseño geométrico ideal para que los esfuerzos de realización sean razonables. Por ejemplo, no es razonable cambiar la forma de los reflectores para diferentes inclinaciones del sol. Sin embargo, una forma fija conducirá a un error óptico, llamado astigmatismo, para cualquier ángulo de incidencia distinto del ángulo de diseño. En otras palabras, el punto focal se transforma en un área focal. Esto ocurriría de todos modos, debido a imperfecciones de material y montaje. Por lo tanto, el arte de la

ingeniería es encontrar el equilibrio óptimo de esfuerzo para la construcción, el material y el rendimiento global.

Dado que el astigmatismo es prácticamente inevitable y el costo de fabricación de espejos curvos es más elevado, es común la utilización de espejos planos (o con pequeñas curvaturas) para reflejar la luz y se opta por un segundo sistema de reflexión para optimizar la radiación que llega al absorbedor.

Los concentradores Fresnel de última generación están equipados con espejos de vidrio monolítico, laminados de vidrio-vidrio u hojas de aluminio. La elección del material del reflector tiene un fuerte impacto sobre el diseño de la estructura trasera de los espejos primarios. [10]

Los espejos primarios se posicionan sobre una estructura que debe cumplir con una serie de características planteadas en [10]:

- Soportar el peso de los espejos.
- Compensar el torque que resulta de la rotación de largas filas acopladas de espejos primarios.
- Soportar las fuerzas del viento en los espejos primarios.
- En el caso de espejos de vidrio: compensar las diferentes dilataciones térmicas del vidrio y del metal.
- En el caso de vidrio plano: compensar la fuerza de doblado del vidrio plano.

Según [10], las estructuras que predominan para soportar los espejos primarios son las estructuras con láminas de metal (Ilustración 14-a), estructuras de marco soldado (Ilustración 14-b) y los diseños de un solo tubo de torque (Ilustración 14-c).

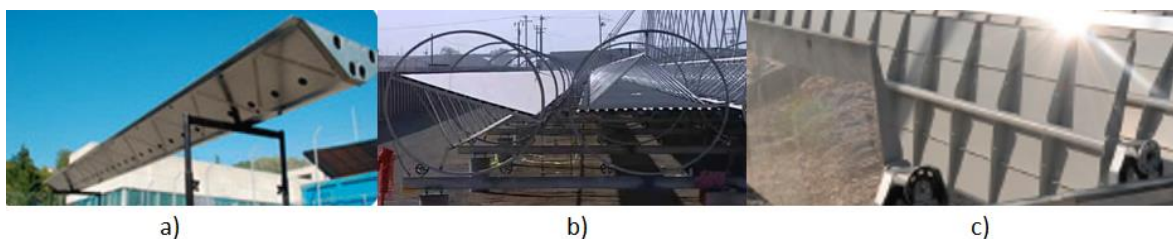


Ilustración 14: Estructuras de soporte de espejos primarios. (Adaptación de [10])

8.3 RECEPTOR (REFLECTOR SECUNDARIO Y ABSORBEDOR)

En [10] se define el receptor como la parte del colector que convierte la luz acumulada en calor. Su principal componente es el absorbedor, por el cual circula un fluido de transferencia de calor para llevar el calor a la aplicación. En algunos diseños, el receptor cuenta con reflectores secundarios, aislamiento en su parte superior y una cubierta de vidrio en la parte inferior. La altura del receptor (H_r) depende de propiedades como el ancho total del arreglo de reflectores primarios, la precisión de la reflexión, la resolución del seguimiento, las pérdidas del sistema, etc.

Los reflectores primarios reciben la radiación solar paralela y la reflejan de la misma manera, por lo que es necesario que el receptor logre captar toda la radiación reflejada. Dado que el área de

los rayos paralelos es mayor a la sección del tubo absorbedor, es común que se utilice un reflector secundario que funcione como concentrador. En [13] se estudia el uso de concentradores sin imagen (nonimaging) para LFCs. La óptica sin imagen ha evolucionado desde la óptica geométrica y se utilizó para detectar la radiación de Cerenkov en un reactor de fisión en los años sesenta.

Según [2], los concentradores sin imagen no producen imágenes claramente definidas del sol sobre el absorbedor, sino que distribuyen la radiación de todas las partes del disco solar sobre todas las partes del absorbedor. Estos concentradores poseen baja relación de concentración. Por otro lado, los concentradores de formación de imágenes son análogos a los lentes de cámara en que forman imágenes sobre el absorbedor. Estos concentradores poseen relaciones de concentración intermedias.

Los concentradores sin imagen tienen la gran ventaja de reflejar al receptor toda la radiación incidente en la apertura W_r en un amplio rango angular. Los límites de este rango definen el “ángulo de aceptación” del concentrador. Como toda radiación incidente dentro del ángulo de aceptación se refleja al receptor, la radiación difusa y reflejada dentro de estos ángulos es también entrada útil para el colector.

Los Concentradores Parabólicos Compuestos (CPC) son un ejemplo de concentradores sin imagen. El concepto básico se muestra en la Ilustración 15-a, donde cada lado del CPC es una parábola y solamente el foco y el eje de la parábola derecha están indicados. Cada parábola se extiende hasta que su superficie es paralela al eje de simetría del CPC. El ángulo entre el eje del CPC y la línea que conecta el foco de una de las parábolas con el borde opuesto de la apertura es el ángulo medio de aceptación (θ_c). Si el reflector es perfecto, cualquier radiación que entre en la apertura en ángulos entre $\pm\theta_c$ será reflejada a un receptor en la base del concentrador.

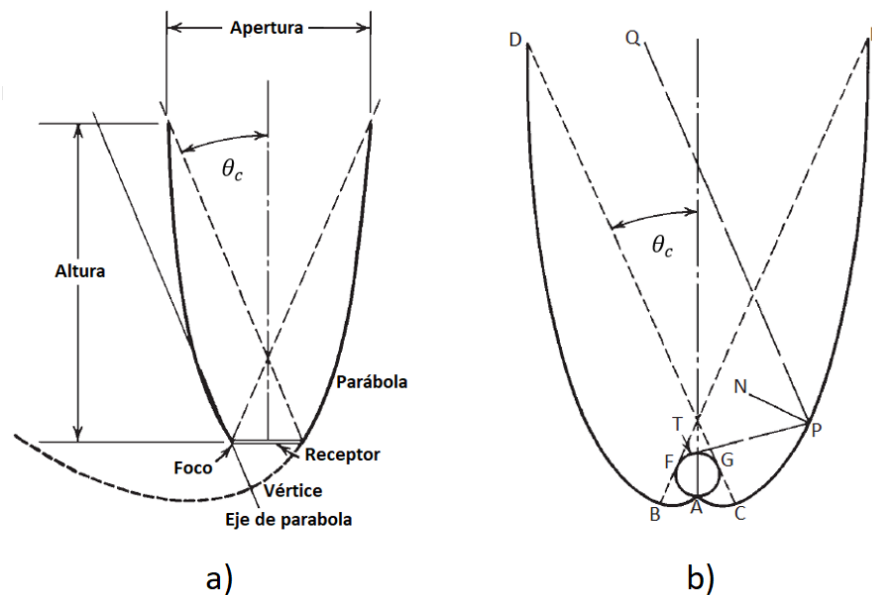


Ilustración 15: Construcción de un Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) para un receptor plano (a) y tubular (b). (Adaptación de [2])

Estos concentradores tienen una relación de concentración que depende de θ_c . Para un sistema bidimensional ideal, la relación es:

$$C = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (10)$$

En un *LFC* se utiliza un receptor tubular, por lo que el método constructivo del concentrador *CPC* cambia (Ilustración 15-b). Las piezas *AB* y *AC* del reflector son convolutas de las partes *AF* y *AG* del absorbedor. El requisito para el resto del reflector es que en cualquier punto *P*, la normal al reflector (*NP*) debe biseccionar el ángulo entre la tangente al absorbedor (*PT*) y la línea *QP*, que forma el ángulo θ_c con respecto al eje del *CPC*.

Los extremos superiores de los reflectores *CPC* contribuyen poco a la radiación que llega al absorbedor y pueden ser truncado para reducir su altura disminuyendo el área y el peso del reflector, sacrificando en parte su rendimiento. De esta manera se puede obtener un reflector secundario con una forma similar a la de la Ilustración 16-a. Para simplificar el diseño y fabricación del reflector secundario, se pueden utilizar diversas formas, por ejemplo, la de la Ilustración 16-b y c.

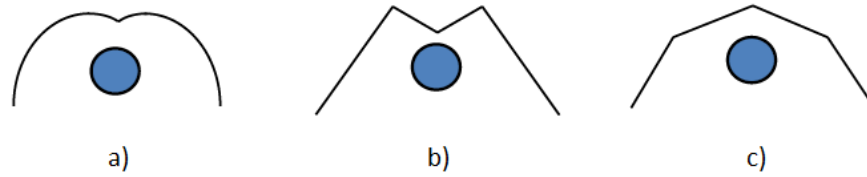


Ilustración 16: Tipos de reflectores secundarios. CPC (a), M (b) y Pico (c). [1]

De este modo, es posible construir colectores concentradores que pueden funcionar anual o estacionalmente con requisitos mínimos o nulos de seguimiento.

Por otro lado, existen fabricantes que solucionan la diferencia entre el área en que los reflectores primarios proyectan la radiación y el área del tubo absorbedor utilizando múltiples tubos en una estructura trapezoidal, donde el fluido térmico circula de uno a otro a medida que se calienta cada vez más (Ilustración 17-c). El ancho del arreglo de tubos se debe aproximar a la proyección de la radiación desde los reflectores primarios. En un diseño de este tipo es prácticamente innecesaria la utilización de un reflector secundario que redirija la radiación al receptor.

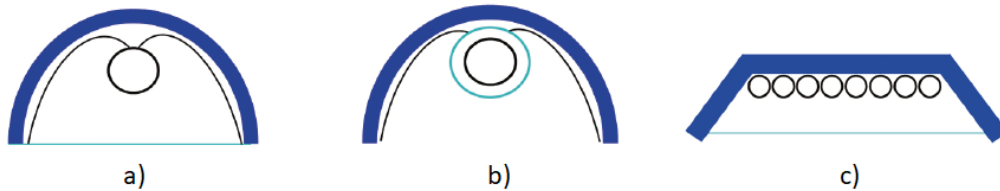


Ilustración 17: a) Receptor CPC de un tubo, con reflector secundario y cubierta de vidrio inferior. b) Receptor CPC de un tubo con cobertura de vidrio al vacío y con reflector secundario. c) Receptor trapezoidal, sin reflector secundario y cubierta de vidrio inferior. [10]

Es común utilizar cubiertas de vidrio para evitar la salida de la radiación que ya ha ingresado al receptor y para reducir las pérdidas térmicas por convección.

Para el absorbedor se utiliza un material conductor térmico de modo de maximizar la transferencia de calor al fluido térmico. La superficie del tubo debe ser selectiva, optimizando la relación entre la energía absorbida y la emitida. Por ejemplo, una superficie en particular podría

absorber generalmente el 96% de la radiación incidente y emitir solamente el 7% a través de la radiación infrarroja. El cromo negro depositado electroquímicamente se utiliza generalmente por su amplio rendimiento y capacidad para soportar altas temperaturas.

Es importante considerar la distribución de temperatura en el tubo absorbedor debido a que los reflectores primarios hacen incidir la radiación principalmente en la parte inferior del tubo, lo que causa esfuerzos térmicos desiguales en su contorno. Un ejemplo del flujo de radiación recibida en un tubo se presenta en [14].

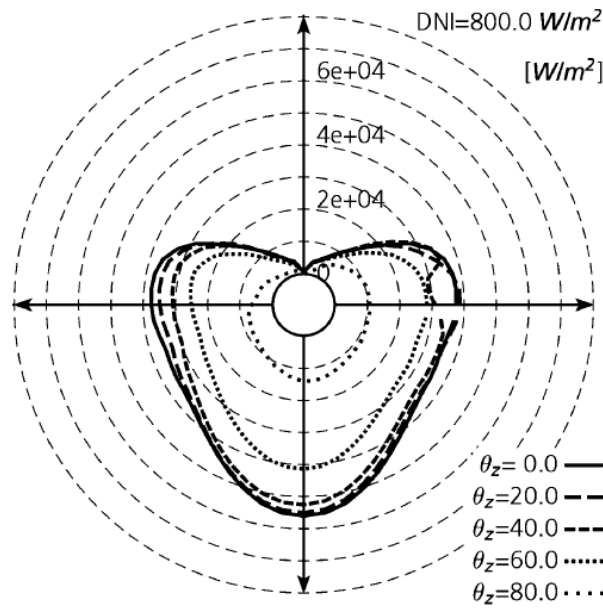


Ilustración 18: Distribución del flujo de calor en la superficie exterior del tubo absorbedor. [14]

El absorbedor se coloca sobre rodillos para compensar la expansión térmica debido a las altas temperaturas durante el funcionamiento. Por ejemplo, en el caso del acero, la expansión térmica longitudinal a altas temperaturas de funcionamiento asciende aproximadamente a 0,6%, es decir, 6 [m] en 1000 [m] de receptor. [8]

Como fluido térmico se utiliza agua, sales fundidas o aceites térmicos, el cual, dependiendo de sus propiedades, puede o no cambiara de fase durante el tiempo en que recorre el absorbedor. Un separador de vapor puede colocarse en la salida para recoger el vapor y desviar el agua de nuevo a la entrada del concentrador. [15]

Para las aplicaciones de calor para los procesos industriales, los concentradores Fresnel – al igual que otros colectores de concentración – se operan a temperaturas más bajas (generalmente < 250°C), según los requisitos del cliente con respecto a la temperatura de operación se selecciona el fluido caloportador. Mientras que el agua a presión generalmente se usa como portador de calor para temperaturas de hasta aproximadamente 220°C, el aceite térmico se prefiere para las temperaturas superiores a 250°C. Por otro lado, el vapor se usa como portador de calor especialmente en las plantas en que ya se encuentra instalada una red de vapor y donde las instalaciones solares se agregan para ahorrar en los costos de combustible. [10]

8.4 ESTRUCTURA

La estructura general del concentrador se debe diseñar de tal manera que cumpla con una serie de requisitos. Es necesario que la estructura sea capaz de sujetar los espejos, los soportes de éstos, los motores para los fines de seguimiento, el receptor, etc. Además, debe ir fija al suelo para contrarrestar las fuerzas producidas por el viento. El diseño de la estructura a utilizar dependerá de una serie de parámetros distintos para cada proyecto dependiendo del lugar donde sea montada y del uso que se le dará al concentrador.

Por ejemplo, la empresa alemana “Industrial Solar” fabrica concentradores de baja altura, estructuras delgadas, bajo peso y fácil montaje para instalarlos incluso en los techos de las industrias. Esta empresa se especializa en generación de calor para los procesos industriales y para los proyectos de refrigeración solar. Otro ejemplo es la empresa “CSP-F” que fabrica concentradores de tal modo de darle un uso adicional al suelo, como puede ser la ganadería.



Ilustración 19: Diseño de concentrador de Industrial Solar (izquierda) [7] y de CSP-F (derecha) [16].

En cuanto a la estructura de soporte del receptor, en [10] se presentan tres tipos de diseño: La estructura con poste (Ilustración 20-izquierda), en que una vara central soporta el receptor siendo estabilizada por cables de acero. Esta estructura es la más liviana de los tres tipos de estructura. Luego existe la estructura tipo A (Ilustración 20-centro), hecha por vigas rígidas de acero, al igual que el tercer tipo de diseño que es la estructura rectangular (Ilustración 20-derecha). Las últimas dos requieren más material, pero son más fáciles de instalar que la estructura con poste.



Ilustración 20: Estructuras de soporte de receptor. [10]

8.5 MOTORES Y MOVIMIENTO

Un efecto interesante del principio de seguimiento solar para un LFC es que, si todos los ejes de los heliostatos comparten el mismo plano, el seguimiento progresivo de los espejos es idéntico. Esto significa que el acople mecánico de los espejos permite utilizar solo un motor para el seguimiento del arreglo completo [10]. La posibilidad de mover grandes áreas de espejos con un solo motor es una opción menos costosa frente a la utilización de un motor por cada fila. Sin embargo, esta última hace más flexible el control y posicionamiento, permitiendo trabajar con distintos números de espejos sin la necesidad de desmontar ningún mecanismo de acoplamiento y pudiendo posicionarlos en inclinaciones iguales en caso de mantenimiento, tormenta limpieza, etc. En términos generales, esta alternativa permite un rango de giro de 360° para cada fila individualmente.

Es posible determinar la inclinación (β) de cada espejo a través del ángulo de incidencia transversal de los rayos solares (en el plano horizontal) y de la geometría de ese espejo para un seguimiento este-oeste.

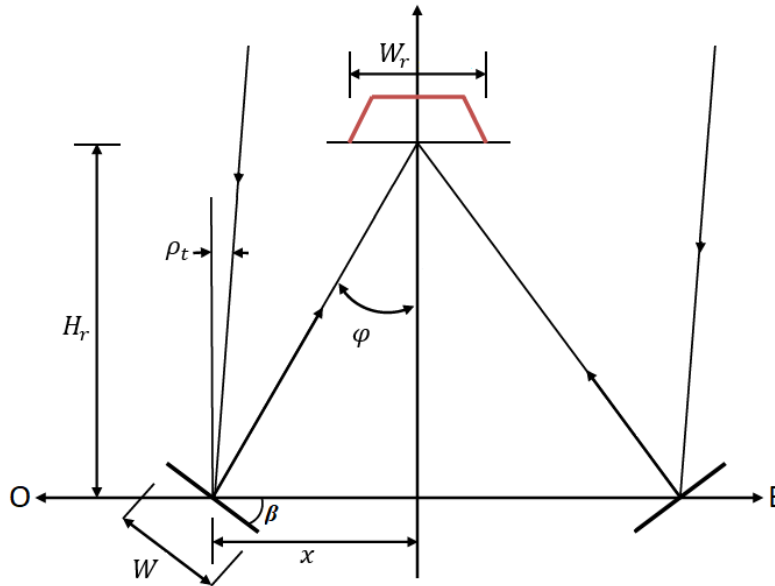


Ilustración 21: Ángulos principales para el seguimiento solar. (Adaptación de [1])

$$\beta = \frac{\varphi - \rho_t}{2} \quad (11)$$

Donde x es la distancia del centro del receptor al eje de giro de cada espejo y H_r es la distancia entre el plano de los espejos y la base del receptor. Además, se establece el ancho de cada espejo (W) y el área de apertura del receptor (W_r). Se considera el ángulo de incidencia en el plano transversal (ρ_t) positivo hacia el Oeste y negativo hacia el Este de la normal al plano horizontal, mientras que el ángulo φ se considera positivo para los espejos de la izquierda y negativo para los de la derecha. Con lo anterior, la inclinación (β) de cada espejo es positiva en sentido de las manecillas del reloj y negativa en contra, tomando la posición horizontal como la neutral.

Los parámetros de la ecuación (11) se obtienen por trigonometría a partir de la Ilustración 21 para φ y de la Ilustración 5 para ρ_t y ρ_l :

$$\varphi = \arctan \frac{x}{H_r} \quad (12)$$

$$\rho_t = \arctan \frac{\sin \Phi \cdot \sin Z}{\cos \Phi} \quad (13)$$

$$\rho_l = \arctan \frac{\sin \Phi \cdot \cos Z}{\cos \Phi} \quad (14)$$

Es importante notar que las ecuaciones anteriores para el cálculo de la posición de los espejos son válidas para cuando el espejo se encuentra centrado en el eje de giro, sin embargo, esto no siempre es así dado que el heliostato queda desbalanceado, provocando un torque constante sobre el motor. Para el resto de los casos, cuando el eje se encuentra desplazado, se aplican correcciones por medio de iteraciones para poder obtener la inclinación real que debe tener un espejo con un ángulo de incidencia determinado. Este concepto es presentado en [3]:

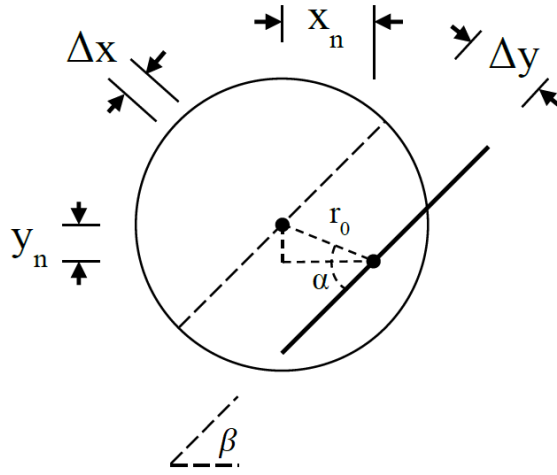


Ilustración 22: Desplazamiento del eje de giro del espejo. (Adaptación de [1])

Cuando el espejo se encuentra en posición horizontal se establece el corrimiento del eje como Δx y Δy , los cuales definen a su vez el desplazamiento del eje (r_0) y el ángulo con respecto a la superficie del espejo (α). Sin embargo, al momento de rotar, el corrimiento del eje varía con respecto al plano horizontal y vertical, haciendo que el espejo cambie su altura y su distancia horizontal al receptor. Es posible establecer el desplazamiento horizontal (x_n) y vertical (y_n) en cada momento del giro del espejo por medio de las siguientes ecuaciones.

$$x_n = r_0 \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad (15)$$

$$y_n = r_0 \cdot \sin(\alpha - \beta) \quad (16)$$

Estos nuevos parámetros modifican la ecuación (12), corrigiendo los valores de x y H_r de la siguiente manera:

$$\varphi = \arctan \frac{x + x_n}{H_r - y_n} = \arctan \frac{x_{corr}}{H_{corr}} \quad (17)$$

Es posible utilizar este concepto para posicionar los espejos de tal manera que temprano en la mañana los espejos del lado Este estén más bajos que el plano horizontal base y los espejos del lado Oeste del arreglo suban levemente, disminuyendo perdidas por bloqueo o sombreado. Esta posición de los espejos sirve igualmente para el atardecer, en donde los espejos del lado Oeste Bajan, mientras que los del lado Este suben su nivel. Se debe tener en cuenta que, si se utilizan arreglos en paralelo, el aumento de nivel de los espejos puede bloquear la radiación dirigida a otros arreglos cuando el sol se encuentra cerca del horizonte.

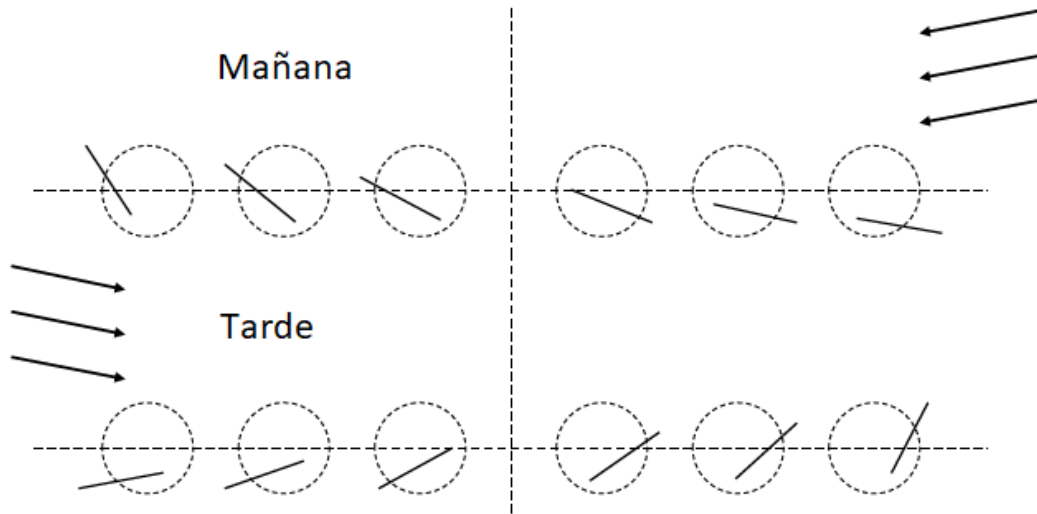


Ilustración 23: Cambio en elevación al desplazar el eje de giro de forma variable para cada espejo. (Adaptación de [1])

8.6 RENDIMIENTO

El rendimiento o eficiencia de un concentrador puede definirse como el porcentaje de la radiación solar captada que se transforma en calor en el absorbedor. La radiación captada puede sufrir de pérdidas ópticas, cuando los rayos no inciden finalmente en el absorbedor o pérdidas térmicas, cuando la energía que logra llegar al absorbedor se disipa por algún método de transferencia de calor.

Para definir el rendimiento óptico (η) de un *LFC* es importante definir primero el área de apertura (A_a) para conocer cuál es la radiación disponible de un determinado colector. Según [9], el área de apertura se define como la suma de las proyecciones A_i de sus reflectores primarios en su posición horizontal, como se muestra en la Ilustración 24.

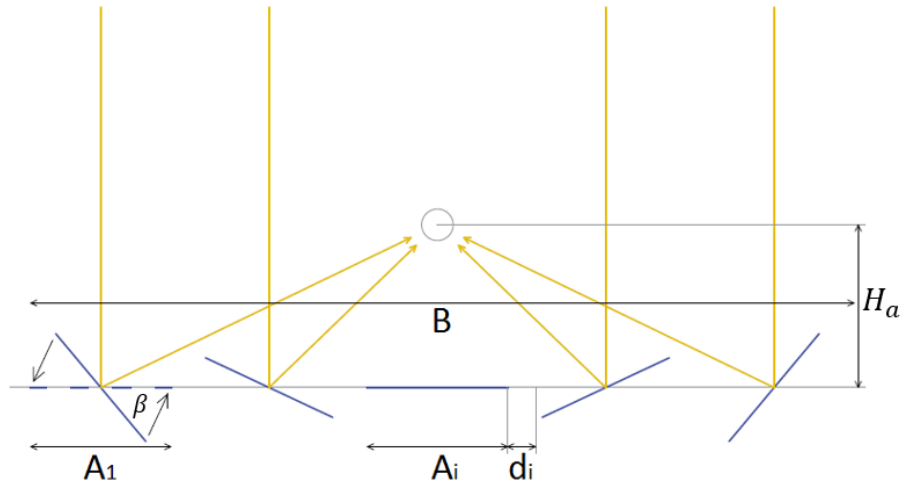


Ilustración 24: Ancho del colector B , altura del colector h , área de apertura $A_a = \sum A_i$ y espaciamiento entre espejos d_i .

Las pérdidas ópticas son generadas por diversos factores. Uno de ellos es debido a que el área de apertura de cada espejo no es perpendicular a los rayos incidentes y por lo tanto el área efectiva es disminuida por el coseno del ángulo incidente de cada reflector (sección 5.2). [9]

Otros factores que generan pérdidas en el rendimiento óptico (η) son dados en [1]:

- Sombreamiento: Es cuando un espejo adyacente impide que la radiación solar incida en el espejo en estudio, disminuyendo la radiación reflejada al receptor (Ilustración 25-a).
- Bloqueo: Es producido cuando la radiación reflejada por un espejo hacia el receptor es interceptada por un espejo adyacente (Ilustración 25-b).
- Derrame: Se produce cuando la radiación reflejada por los espejos primarios se desvía del recepto transversalmente. Los efectos del ángulo θ_m producido por el sol y la resolución del motor seleccionado contribuyen a este tipo de pérdidas.
- Especular: Debido a inconsistencias o deformaciones en la superficie de los espejos.
- Transmisividad: Producto de las impurezas en el vidrio o cristal que recubre la capa reflectiva de los espejos.
- Seguimiento: Debido a las tolerancias mecánicas y de fabricación.
- Sombreamiento del Receptor: Cuando la radiación incide sobre el receptor secundario, impidiendo que llegue a los receptores primarios.
- Pérdidas Extremas: Son importante principalmente en concentradores de corta longitud y son producidas cuando el ángulo de incidencia longitudinal desvía los rayos fuera del receptor por uno de sus extremos longitudinales.

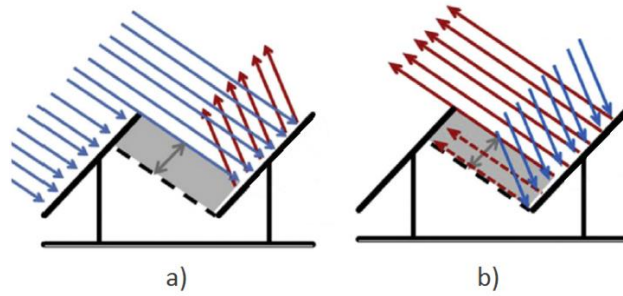


Ilustración 25: Pérdidas ópticas por sombreamiento (a) y por bloqueo (b). (Adaptación de [17])

Las pérdidas más importantes producidas en estos concentradores son por sombreamiento y bloqueo, sobre todo en los espejos más alejados del centro del arreglo. Estas pérdidas se pueden atenuar aumentando la separación entre los espejos, sin embargo, esto aumenta el ancho total del arreglo y las pérdidas por derrame. El reflector lineal Fresnel compacto (*CLFR*) logra disminuir las pérdidas mencionadas, mejorando la eficiencia del sistema, y a la vez reducir el ancho total del colector, permitiendo posicionar los espejos más cerca unos de otros, reduciendo material y costos de adquisición y preparación de la tierra. Estas ventajas se logran posicionando múltiples receptores permitiendo que los espejos alternen su inclinación (Ilustración 26).

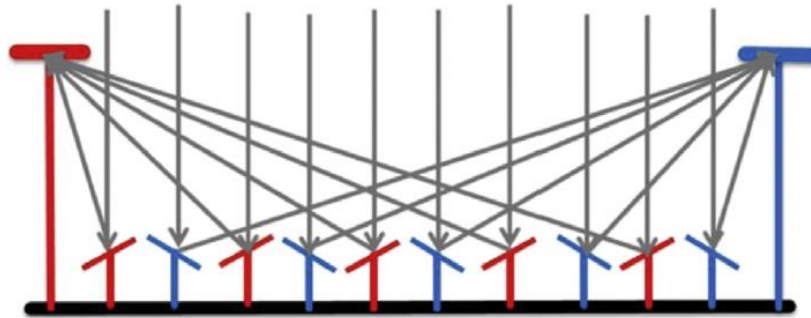


Ilustración 26: Utilización de un reflector lineal Fresnel compacto (*CLFR*). (Adaptación de [17])

En el diseño de un *CLFR* se utilizan arreglos de espejos a ambos lados de cada receptor, es decir, el receptor izquierdo recibe además de la radiación proveniente de su lado derecho, una radiación idéntica a la que impacta desde el lado izquierdo del receptor derecho. Esto es equivalente a decir que el flujo de radiación que choca con cada receptor es la suma de los que inciden sobre ambos receptores cuando se simula una matriz de espejo [17].

La eficiencia óptica (η) de un concentrador Fresnel depende del ángulo de incidencia (ρ) de la radiación solar directa. La eficiencia óptica óptima (η_0) se obtiene bajo una incidencia normal o perpendicular al plano horizontal (con el sol en el zenit) y bajo condiciones ideales (por ej., estando totalmente limpios los reflectores primarios, los reflectores secundarios y el tubo receptor de vidrio) [10]. Valores típicos para la η_0 se encuentran entre 55% y 65% [10], dependiendo de la configuración del *LFC* (dimensiones, diseño, materiales, posición, etc.). Por ejemplo, [18] obtiene un valor de 61% para el estudio de un concentrador en particular.

Se pueden encontrar valores de η para diversos ángulos de incidencia distintos al normal. De esta forma se puede mostrar cómo se comporta el concentrador a lo largo del día (plano transversal) y del año (plano longitudinal). Según [9], la dependencia angular del rendimiento óptico se describe mediante el modificador del ángulo de incidencia (IAM - Incidence Angle Modifier) biaxial, tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal de manera independiente. El IAM se define como la proporción entre la eficiencia óptica a un cierto ángulo de incidencia (η) y el rendimiento óptico óptimo (η_0), según la ecuación dada por [18]:

$$IAM = \frac{\eta}{\eta_0} \quad (18)$$

El modificador del ángulo de incidencia transversal (IAM_t) se define como el IAM cuando el ángulo de incidencia solo posee componente transversal y su componente longitudinal es nula. El IAM_t mide el cambio en el rendimiento óptico a medida que el ángulo del sol cambia a través del día. De la misma forma, el modificador del ángulo de incidencia longitudinal (IAM_l) se define como el IAM cuando el ángulo de incidencia posee solamente componente longitudinal, siendo su componente transversal nula. El IAM_l mide el cambio del rendimiento óptico a medida que el ángulo del sol cambia a través del año. [19]

Diferentes autores han publicado diferentes comportamientos del IAM en función del ángulo de incidencia en base al diseño de un LFC con características específicas. Algunos ejemplos se muestran en la Ilustración 27.

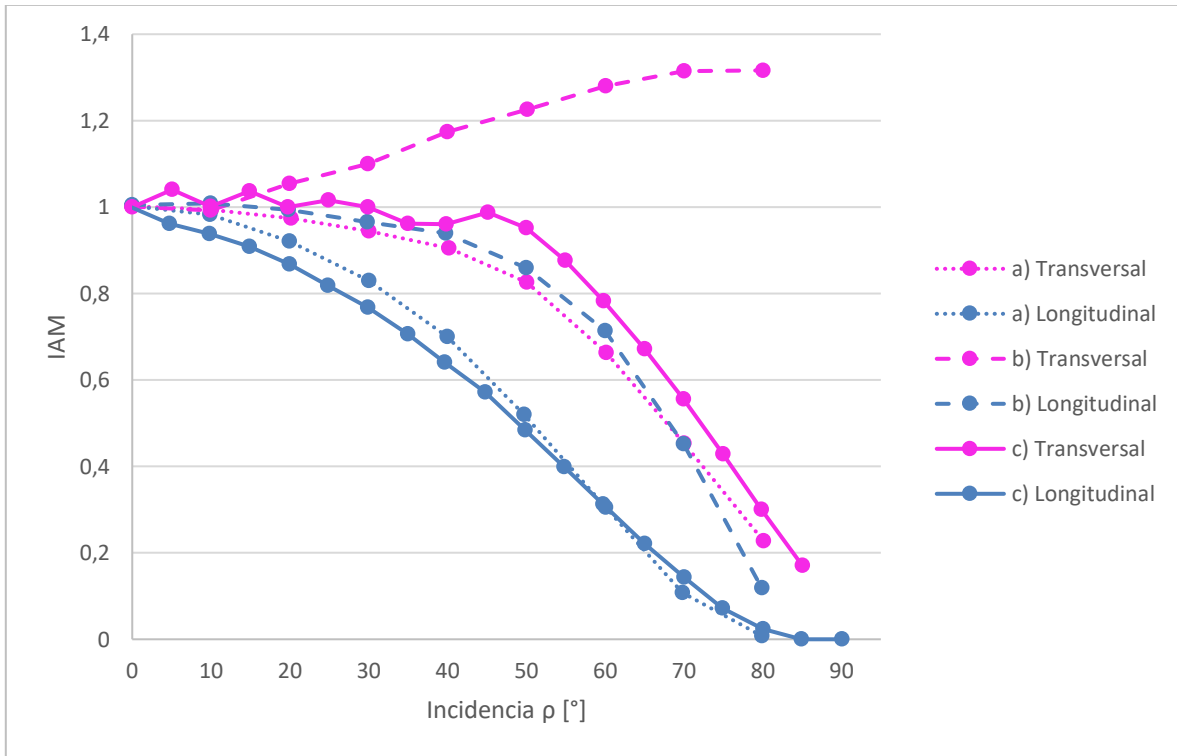


Ilustración 27: Comportamiento del Modificador del Ángulo de Incidencia (IAM) en el plano transversal (t) y longitudinal (l) en función del ángulo de incidencia presentado en diferentes estudios: a) [9], b) [18], c) [10].

En la ilustración anterior, uno de los IAM_t alcanza valores bastante altos para ángulos de incidencia altos. Esto se debe, según [18], principalmente al hecho de que para altos ángulos de incidencia se pierden menos radiación en los espacios entre los espejos y los espejos vecinos se bloquean menos la radiación que se dirige al receptor. Además, el IAM_t está básicamente determinado por el cristal de apertura del receptor secundario.

Por otro lado, la forma de zigzag que muestra en IAM_t del segundo estudio, se debe a la sombra del receptor secundario que se mueve, uno a uno, sobre los espejos primarios y los espacios entre éstos, según explica [10].

La eficiencia térmica es otro factor importante: mientras menor la pérdida térmica ($\dot{Q}_P$), mejor el rendimiento total del sistema. Las pérdidas térmicas en un colector solar son producidas por los mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Según [10], típicamente la eficiencia térmica alcanza entre el 50% y el 65% bajo una radiación ideal. Además, las pérdidas térmicas pueden describirse por una dependencia parabólica de la diferencia de temperatura entre la temperatura del absorbedor y la del ambiente (ΔT):

$$\dot{Q}_P = u_0 \cdot A_a \cdot \Delta T + u_1 \cdot A_a \cdot \Delta T^2 \quad (19)$$

Donde A_a es el área de apertura y u_0 y u_1 son los coeficientes lineales y cuadráticos de la pérdida de calor, aplicados a fin de estimar las pérdidas reales de calor.

Con estas pérdidas de calor, la eficiencia térmica (η_t) bajo una radiación perpendicular puede mostrarse en curvas características (Ilustración 28). Puesto que la pérdida de calor no depende de la radiación, pero la potencia del colector sí depende linealmente de ella, la influencia negativa de la pérdida de calor sobre la eficiencia es proporcionalmente inversa a la radiación (G).

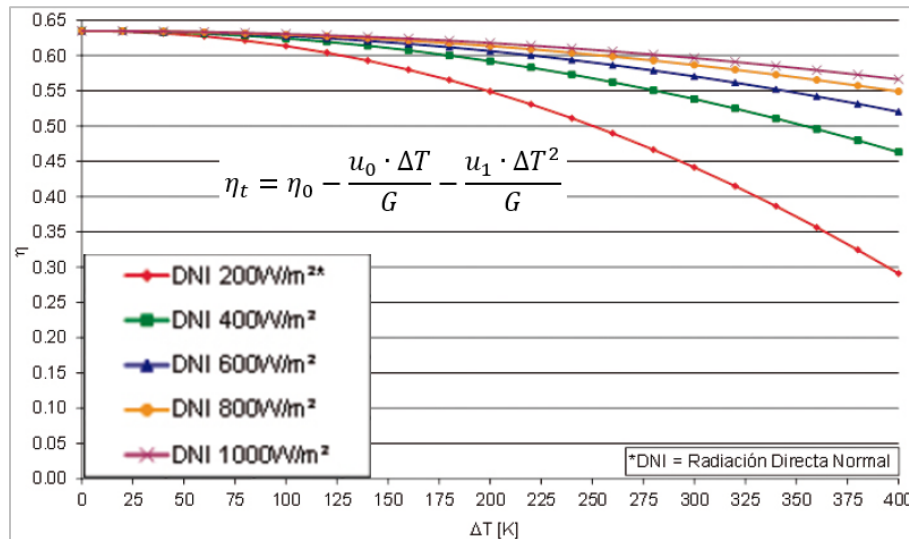


Ilustración 28: Curva característica de un Concentrador Lineal Fresnel. (Adaptación de [10])

8.7 FRESNEL VS PARABOLICO

El concentrador lineal Fresnel es un colector con un importante potencial de reducción de costos, principalmente por los espejos más económicos y las ventajas estructurales. De acuerdo con los supuestos sobre el rendimiento óptico y térmico y sobre los costos de operación y mantenimiento, los costos de la inversión (según la apertura) de un campo de concentradores lineales Fresnel tienen que situarse entre el 28% y el 79% del costo de un campo de colectores parabólicos, para alcanzar el umbral de rentabilidad. Un valor medio razonable es el 55%. [10]

En la discusión sobre los pros y los contras de las diferentes tecnologías de colectores, es importante distinguir entre objetivos comerciales y técnicos. A continuación, se analizan las características técnicas de los concentradores Fresnel, suponiendo un diseño comercialmente razonable. En comparación con los colectores parabólicos, en [9] se establece que las características más importantes de un concentrador Fresnel son las siguientes:

- Receptor fijo: Con un receptor estacionario, no hay necesidad de mangueras flexibles o juntas de bola para conectar el absorbedor. Sin embargo, el receptor se moverá debido a la expansión térmica. El movimiento máximo depende de la temperatura máxima de funcionamiento y de la longitud total del receptor. Este movimiento diario puede ser fácilmente de varios metros, con un receptor de varios cientos de metros de largo. Sin embargo, los respectivos compensadores son equipos industriales estándar.

- Iluminación desde abajo: El receptor está siempre iluminado desde abajo, sin importar el ángulo del sol. Esto significa que el estrés térmico del receptor no cambia a lo largo del día. En particular, no hay estrés térmico que conduzca a una flexión lateral del receptor. La iluminación desde abajo es una ventaja importante para la generación directa de vapor, al menos para aquellos patrones de flujo donde el enfriamiento constante de la parte superior del tubo no puede ser garantizado (flujo estratificado o slug).

- Baja carga de viento: La baja carga del viento se considera una ventaja porque conduce directamente a estructuras mecánicas más delgadas y más ligeras, con menos influencia del viento durante el funcionamiento y menos daños debido a las altas velocidades del viento.

- Alto uso del suelo: El diseño óptimo de un concentrador Fresnel ajusta cuidadosamente todos los parámetros geométricos como la altura del receptor, las distancias entre los espejos, el tamaño de los espejos, el número de espejos, etc. El diseño resultante tiene una potencia con picos térmicos más altos por unidad de área en comparación con una planta cilindro parabólico, por un factor de aproximadamente 1,5.

- Limpieza de espejos: Este es uno de los factores más importantes para el rendimiento y el costo de la operación y mantenimiento. El hecho que los espejos primarios sean básicamente planos y la posibilidad de colocar horizontalmente todos los reflectores primarios ofrecen la ventaja de una superficie fácilmente accesible que también puede ser limpiada por robots con muy poco consumo de agua.

Por supuesto también algunas desventajas de los concentradores de Fresnel necesitan ser consideradas:

- Bajo rendimiento óptico: El sombreado y bloqueo de los reflectores primarios conduce a un rendimiento óptico reducido por área de apertura.

- Mayor precisión de seguimiento necesaria: El movimiento del haz reflejado de un heliostato es el doble del movimiento angular del helióstato. Esto significa que, para la misma razón de concentración, el concentrador Fresnel necesita ser controlado con el doble de precisión que un concentrador cilindro parabólico y así, la forma del reflector necesita ser consecuentemente precisa.

- Menor producción anual de energía: La producción anual de energía por capacidad instalada es menor, lo que compensa en parte el efecto de una mayor capacidad por superficie.

En resumen, las ventajas técnicas antes mencionadas se traducen en beneficios comerciales que necesitan compensar los inconvenientes comerciales que resultan de desventajas técnicas. Por lo tanto, es un procedimiento de optimización multidimensional que conduce, en última instancia, a una tecnología altamente competitiva.

9 DISEÑO

Para desarrollar el diseño del concentrador Fresnel, se debe tener en cuenta, en primer lugar, los objetivos que se desean lograr. Dentro de estos objetivos se plantea que el concentrador debe ser de bajo costo, utilizando materiales disponibles en el comercio local. Por otro lado, el uso que se le dará al concentrador es de banco de pruebas, lo que significa que debe ser versátil, dando la posibilidad de evaluar la variación de la energía generada al modificar parámetros de diseño o características del concentrador. Sin embargo, antes de analizar las posibilidades constructivas, se debe establecer la ubicación y la orientación del concentrador Fresnel.

En la sede de Viña del Mar de la Universidad Técnica Federico Santa María, se encuentra el Laboratorio de Energías Renovables, lugar donde se llevará a cabo el proyecto. Sus coordenadas son:

Latitud:

$$L = -33,0397^\circ \quad (20)$$

Longitud:

$$\lambda = -71,4858^\circ \quad (21)$$

Dado que la mayoría de los concentradores solares en operación posee una orientación Norte-Sur debido a la mayor energía anual recolectada, la orientación que se considera para el diseño del concentrador es Norte-Sur, lo que implica un seguimiento Este-Oeste. Adicionalmente, el concentrador no poseerá inclinación debido a los problemas técnicos y constructivos planteados anteriormente (sección 8.3).

En base al objetivo de la tesis, las restricciones, o los parámetros de diseño, dejan un amplio margen de trabajo. Por esta razón, se tomó como referencia en primer lugar los parámetros de diseño establecidos por [1], en donde se optimiza el diseño de un *LFC* por medio de simulaciones numéricas en a través del programa Matlab para maximizar la energía térmica obtenida. En este estudio se decidió desarrollar una herramienta de simulación que pueda modelar cualquier diseño particular de un colector *LFC* y calcular su rendimiento esperado. Se utilizó un modelo simplificado de traza de rayos, como los que se encuentran comúnmente en la literatura, optando por el método de modelado de un absorbedor horizontal. Esto se debe a que los haces reflejados son modelados hasta que alcanzan la superficie horizontal por debajo de lo que sería la entrada al concentrador secundario. Esto permite evaluar la relación de rendimiento y concentración del colector separadamente del rendimiento del concentrador secundario.

Las variables de entrada para la simulación fueron:

- Número de espejos
- Ancho de cada espejo
- Altura del receptor
- Ancho del receptor

- Espaciamiento entre cada espejo
- Incremento en el espaciamiento entre espejos
- Desplazamiento del eje del espejo (Offset Pivot)

Es importante notar que los parámetros para la simulación (incluyendo la *DNI*) son tomados en la ciudad de Stellenbosch, Sudáfrica. Esta ciudad se encuentra a una latitud bastante cercana a la de Viña del Mar, Valparaíso, Chile ($L_{Stellenbosch} \approx -33,95$), mientras que la longitud es corregida en el *TSA*, por lo que es posible validar el comportamiento angular del sol, y, en consecuencia, los resultados de las simulaciones.

En [1] se realiza un análisis de sensibilidad en donde se cambia una variable, mientras que el resto permanece constante, comparando el cambio relativo en la producción de energía térmica durante un día de verano. El diseño se encuentra limitado por un ancho máximo de 4 metros y una altura del receptor de 3 metros. La Ilustración 29 muestra los parámetros de diseño escogidos inicialmente en base a los resultados de las simulaciones, maximizando la energía captada:

Parámetro	Valor
Ancho de Espejo Primario	0,2 [m]
Numero de Espejos	16
Altura del Receptor	2 [m]
Ancho del Receptor	0,3 [m]
Espaciamiento entre Espejos	1 [cm]
Ancho del Arreglo	4 [m]
Largo del Arreglo	3 [m]

Ilustración 29: Parámetros de diseño escogidos optimizados por simulaciones numéricas. (Adaptación de [1])

El análisis de sensibilidad indica que con el ancho máximo del arreglo, la energía producida por espejos de diferentes tamaños (entre 20, 25, 30, 35, 40 y 50 [cm]) es prácticamente la misma considerando un espaciamiento entre espejos de 1 [cm], sin embargo, se eligió un ancho de espejos de 0,2 [m] debido a que espejos más pequeños producen menores pérdidas de energía por bloqueo, reducen la carga del viento del arreglo, permiten utilizar un receptor con un ancho menor y tienen requisitos más bajos para la altura del receptor entre todos los espejos analizados. Además, una reducción del ancho y altura del receptor minimizan el sombreado producido por éste sobre los espejos primarios. En términos de reducción de rendimiento, en el caso que algún espejo se rompa o si falla un motor, el espejo de 0,2 [m] es la mejor opción, ya que la pérdida de rendimiento será la más baja dentro de las opciones analizadas.

La producción de energía aumenta rápidamente con los primeros espejos que se agregan, sin embargo, esta tasa de aumento en la energía se reduce rápidamente con los espejos más alejados del receptor debido a la divergencia de los rayos reflejados. Para un arreglo de espejos muy ancho, agregar espejos no tiene un notable efecto en la producción de energía, pero si en el ancho total del arreglo.

Si se considera el uso de 16 espejos, uno al lado de otro, se cubre un ancho total de 3,2 [m] de los 4 disponibles. La diferencia (0,8 [m]) se utiliza para el espaciamiento entre cada espejo, en donde un aumento de este conlleva a una disminución de las pérdidas por bloqueo. En concreto, los

análisis futuros se realizan con un espaciamiento de 50 [mm], lo que se traduce en una distancia de 250 [mm] entre los centros de los espejos. El centro del receptor queda posicionado en medio de dos espejos.

La altura del receptor tiene efectos importantes en la producción de energía. A medida que aumenta la altura del receptor, la producción de energía térmica se aproxima a un valor máximo y luego se reduce gradualmente. Este comportamiento es porque una vez que la altura del receptor varía por encima de su óptimo, el haz reflejado continúa divergiendo hasta que el ancho de la apertura del receptor no recibe todo el flujo y se produce derrame. [1]

Un punto interesante es la proporción entre el ancho y el largo del concentrador. Hoy en día, los concentradores solares Fresnel en operación poseen un largo mucho más grande que su ancho, por lo que, si se desea un modelo a escala, se debe mantener esta proporción aproximada. Sin embargo, las dimensiones del concentrador desarrollado en esta tesis poseen una proporción inversa; el ancho es mayor que su largo (4 metros de ancho del arreglo de espejos y 3 metros de largo de cada espejo). Esto se debe a que, si bien el concentrador efectivamente es a escala de los construidos en la actualidad, solo se diseña un módulo el cual luego se replica variadas veces hasta lograr el largo final deseado, tal y como muestra la Ilustración 10. De este modo, en base a los resultados obtenidos de la operación del banco de prueba se podrá determinar la cantidad de módulos a adicionar para lograr generar la temperatura requerida en el fluido caloportador.

Dado que el concentrador a diseñar es un módulo que se monta en línea con otros idénticos, es necesario hacerse cargo de un inconveniente en particular. Debido a las “Pérdidas Extremas” (sección 8.6) los rayos reflejados en los espejos primarios tienden a incidir fuera del receptor. Este fenómeno es irrelevante en un montaje de módulos en serie, ya que los rayos reflejados que se escapan de un módulo son captados por el receptor del módulo siguiente, tal como se muestra en la Ilustración 30.

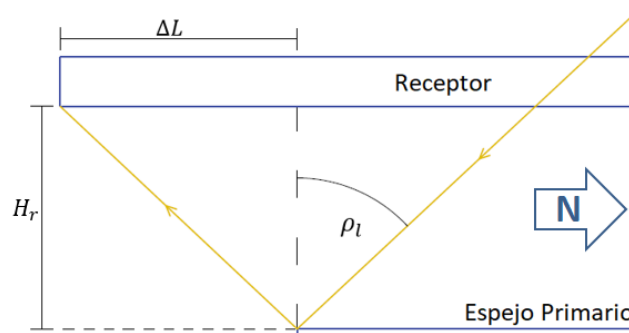


Ilustración 30: Longitud adicional de receptor.

Para cuantificar esta pérdida, se realizó una simulación que muestra el corrimiento longitudinal de los rayos reflejados al nivel del receptor para 3 días particulares del año: solsticio de verano, equinoccio de primavera y solsticio de invierno, donde se considera una desviación hacia el Sur como positiva y hacia el Norte como negativa. La curva correspondiente al solsticio de verano presenta un valor máximo de 0,34 [m] de desviación hacia el Sur, mientras que el equinoccio de primavera y el solsticio de invierno presentan un valor mínimo de desviación de la radiación hacia el Sur de 1,33 y 3,02 [m], respectivamente, los que se obtienen a medio día solar. Es muy importante

tener en cuenta este comportamiento para el diseño de la longitud del receptor de un concentrador Fresnel, valor que dependerá principalmente de las dimensiones del concentrador y de los objetivos que planteados para la operación.

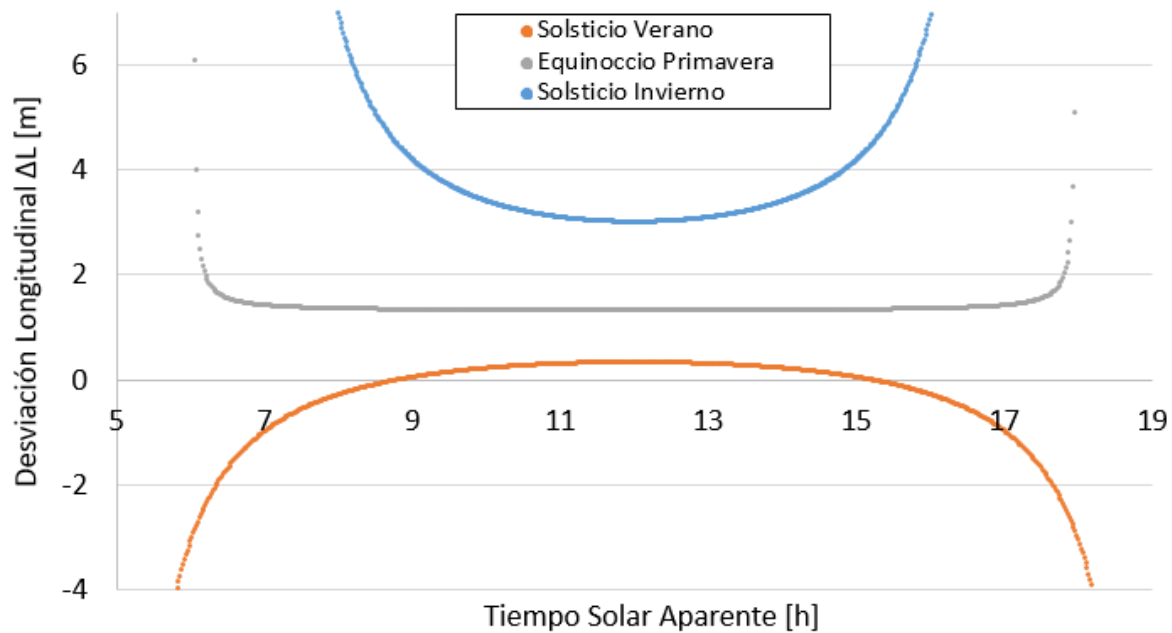


Ilustración 31: Desviación longitudinal de la radiación solar a la altura del receptor.

Con el fin de sacar provecho la mayor captación de energía entre los meses de septiembre y marzo (marzo y septiembre en hemisferio norte) que entrega la orientación Norte-Sur, se diseña el concentrador para que los rayos reflejados en los espejos primarios incidan completamente dentro del receptor cuando el sol está en su posición más alta en los equinoccios (22 de septiembre y 20 de marzo). Para esto, se considera el ángulo de incidencia longitudinal (ρ_l) cuando el sol está en su zenit en los equinoccios, obteniendo una longitud adicional (ΔL) que debe tener el receptor con respecto al largo de los espejos primarios, analizando la trayectoria de los rayos que inciden en los extremos de los espejos primarios.

Por lo tanto, para la ubicación específica del proyecto y para el momento en que el sol se encuentra en su posición más alta ($\text{hora solar } (\omega) = \text{azimut } (Z) = \text{ángulo de incidencia transversal } (\rho_t) = 0$), se obtiene el ángulo ρ_l mayor de ambos equinoccios utilizando las ecuaciones (4), (6), (7) y (14), para obtener finalmente por trigonometría, que el largo adicional debe ser $\Delta L = 1,33[m]$ dado para el 22 de septiembre. El resultado anterior es válido para la altura máxima del receptor $H_r = 2[m]$, la cual se considera como el caso crítico, ya que, para alturas menores, la situación será más favorable, dado que la radiación reflejada impactará completamente en el receptor durante más días en el año.

Es importante notar que para este banco de pruebas solo se considera una longitud adicional del receptor hacia el Sur, debido que la radiación que se desvía por este lado es la de mayor densidad energética, correspondiendo al momento en que el sol se encuentra más alto. Por otro lado, la radiación desviada hacia el Norte ocurre solo en la madrugada y el atardecer, que corresponde a los

momentos de menor densidad energética debido a que la radiación se dispersa debido al mayor espesor de capa atmosférica que debe atravesar y a la inclinación desfavorable de los espejos (sección 5.2).

En términos general, el diseño del banco de pruebas se realiza orientado a obtener concentradores livianos y económicos, capaces de generar calor para procesos o enfriamiento de espacios, dejando fuera la generación de energía eléctrica. Por lo tanto, los parámetros de diseño a tomar en cuenta son:

- Estructura liviana para tener un fácil montaje y bajo uso de material, lo que se ve reflejado en menores costos.
- Espejos primarios cercanos al suelo para disminuir las fuerzas producidas por el viento.
- Receptor a pequeña altura lo que facilita el montaje, operación y mantenimiento.
- Arreglo de espejos compactos para optimizar el uso del suelo.

El bajo peso y tamaño lo hace muy versátil, pudiendo instalarse en espacios que no fueron contruidos para contener estructuras de este tipo, como en techos de fábricas.

9.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La reflexión primaria está formada por espejos, los que redirigen los rayos del sol incidentes hacia el receptor y el reflector secundario ubicados en la parte superior, y una estructura de soporte que le entrega apoyo a los espejos, evitando que se quiebren por la deformación producida al mantenerse en posición horizontal. El soporte incluye también los ejes, los cuales van apoyados sobre bujes en la estructura principal, lo que permite girar los espejos con facilidad.

Cada espejo de la reflexión primaria cuenta con un largo de alrededor de 3 metros, lo que significa que la deformación por deflexión debido a su propio peso debe ser considerada. Una deflexión implica un cambio en la pendiente del espejo en función de su largo, lo que se traduce en una desviación de la radiación reflejada, por lo que es necesario diseñar el sistema tomando en cuenta la posible deflexión. Si la deflexión es muy grande, se debe considerar la utilización de un apoyo intermedio en los espejos para reducirla. Afortunadamente, una deflexión en el soporte del espejo causa desviaciones de los rayos hacia el centro del receptor, por lo que este fenómeno no incrementa las pérdidas extremas.

Para el análisis de deflexión es necesario introducir previamente los conceptos de “centroide” e “inercia de área”.

El Centroide es una propiedad de una geometría plana que depende solamente de su forma y es independiente de su masa o densidad. Una recta que pase por el centroide en una figura, la dividirá en dos segmentos de igual momento de área con respecto a la recta en cuestión. Para un rectángulo, por ejemplo, la ubicación del centroide se encuentra en su centro de simetría, esto es en la mitad de su ancho y de su altura. La ubicación del centroide relativo a un punto de la geometría ($\bar{X}$, $\bar{Y}$) para una figura más compleja se determina según las ecuaciones (22) y (23) dadas por [20].

$$\bar{X} = \frac{\sum \bar{x}_i \cdot A_{s,i}}{\sum A_{s,i}} \quad (22)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum \bar{y}_i \cdot A_{s,i}}{\sum A_{s,i}} \quad (23)$$

Donde

$\bar{x}_i, \bar{y}_i$ = la posición del centroide de la geometría simple

$A_{s,i}$ = el área correspondiente de la geometría simple

El Segundo Momento o Momento de Inercia de Área (I_A) es una propiedad geométrica de la sección transversal de elementos estructurales. Físicamente el segundo momento de inercia está relacionado con las tensiones y deformaciones máximas que aparecen por flexión en un elemento estructural y, por tanto, junto con las propiedades del material determina la resistencia máxima de un elemento estructural bajo flexión [20]. El momento de inercia de área se calcula con respecto a un eje en particular, por lo que cambia su valor si el eje escogido cambia su ángulo (eje x , y y cualquiera intermedio) o posición (eje paralelo al eje x , por ejemplo).

El momento de inercia para un rectángulo ($I_{A,r}$) de ancho b y altura h y para un círculo (I_c) de radio r , con respecto al eje horizontal de sus respectivos centroides, se calcula según [20] de la siguiente forma:

$$I_{A,r} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad (24)$$

$$I_{A,c} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot r^4 \quad (25)$$

Donde π es la constante irracional determinada por la relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro (3,1415926...).

Si se desea calcular el momento de inercia con respecto a un eje que no pasa por el centroide, se debe utilizar el “Teorema de los Ejes Paralelos”. Por ejemplo, si se desea obtener el momento de inercia (I_A) para un eje paralelo al eje horizontal “ x ”, se tiene:

$$I_A = \bar{I}_{A,x'} + A \cdot d_y^2 \quad (26)$$

Donde

$\bar{I}_{A,x'}$ = el momento de inercia de la sección analizada considerando el eje de su propio centroide (x')

d_y = la distancia en el eje “ y ” entre el eje “ x ” del centroide de la geometría y el eje en donde se desea conocer el momento de inercia.

Si la sección transversal a analizar tiene una geometría muy compleja, se puede dividir en varias geometrías más simples, en donde se pueden sumar o restar sus momentos de inercia ($I_{A,i}$) para obtener el de la geometría principal, siempre y cuando sean calculados con respecto a un mismo eje:

$$I_A = \sum I_{A,i} \quad (27)$$

Donde

$I_{A,i}$ = momento de inercia de cada geometría simple en el eje del centroide de la geometría principal

Por otro lado, considerando la posición o rotación de la geometría el momento de inercia cambia. Por esta razón, es posible tener un momento de inercia máximo ($I_{A,máx}$) y mínimo ($I_{A,mín}$), los cuales son importantes a considerar dado que en la estructura del concentrador existen elementos móviles. En particular, el soporte del espejo gira a lo largo del día en función del movimiento solar. Para identificar el momento de inercia máximo y mínimo se utiliza la ecuación (28).

$$I_{\begin{smallmatrix} máx \\ mín \end{smallmatrix}} = \frac{I_{A,x} + I_{A,y}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{I_{A,x} - I_{A,y}}{2}\right)^2 + I_{A,xy}^2} \quad (28)$$

Donde $I_{A,x}$ es el momento de inercia calculado en base al eje x de la geometría y $I_{A,y}$ es el momento de inercia obtenido teniendo el eje y como referencia. El Producto de Inercia ($I_{A,xy}$) es obtenido con respecto a los ejes centroidales de una geometría según:

$$I_{A,xy} = \int x \cdot y \cdot dA \quad (29)$$

Si la geometría es simétrica con respecto a alguno de estos ejes entonces el producto de inercia $I_{A,xy} = 0$.

Para calcular el producto de inercia de una sub geometría con centroide distinto al de la geometría total, es necesario aplicar un análogo al teorema de ejes paralelos, pero en dos coordenadas.

$$I_{A,xy} = \bar{I}_{A,x'y'} + A \cdot d_x \cdot d_y \quad (30)$$

Donde $\bar{I}_{x'y'}$ es el producto de inercia de una geometría con respecto a su centroide, A es la sección de la geometría analizada y d_x y d_y son las distancias de los ejes respectivos del centroide de la geometría analizada y el de la geometría total.

De lo anterior se deduce que el momento de inercia de área de un cuadrado y de un círculo son constantes a medida que la geometría rota. Para un rectángulo, la inercia mínima y máxima son las con respecto a los ejes x e y (horizontal y vertical).

El análisis de la deflexión se realiza tomando en cuenta dos problemas fundamentales: una viga simplemente apoyada y una viga empotrada en los extremos. En la Ilustración 32 se observa cómo se produce la deflexión de la estructura, de manera exagerada, en los dos casos de estudio.

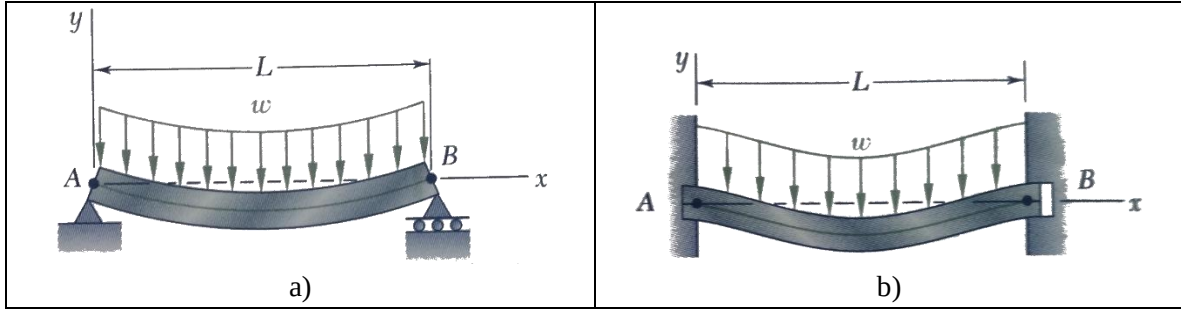


Ilustración 32: Aplicación de carga uniformemente distribuida y deflexión de la viga. En a) se muestra para una viga simplemente apoyada y en b) para una viga empotrada en ambos extremos. [21]

La curva elástica entrega la deflexión (v) en cualquier punto (x) de la estructura. A partir de la curva elástica para una carga homogéneamente distribuida es posible determinar la deflexión máxima ($v_{máx}$) producida en medio de la estructura según las ecuaciones entregadas por [22]:

- Simplemente Apoyada

$$v_{máx} = \frac{-5 \cdot w \cdot L_a^4}{384 \cdot E \cdot I_A} \quad (31)$$

- Empotrada

$$v_{máx} = \frac{-w \cdot L_a^4}{384 \cdot E \cdot I_A} \quad (32)$$

Donde

w : valor de la carga distribuida (*peso/longitud*)

L_a : el largo de la barra, que equivale a la distancia entre los apoyos

E : el módulo de elasticidad del material

Para una misma carga distribuida, la deflexión para una viga simplemente apoyada es 5 veces más grande que para una empotrada en ambos extremos, debido a que esta última restringe su giro en los extremos, disminuyendo la deformación. Es por esta razón que se opta por considerar para el diseño el caso más crítico, el cual corresponde a una viga simplemente apoyada, para el cual se define también su pendiente máxima ($\theta_{v,máx}$) como:

$$\theta_{máx} = \frac{-w \cdot L_a^3}{24 \cdot E \cdot I_A} \quad (33)$$

Modificando los valores de la carga distribuida y del módulo de elasticidad, es posible analizar el comportamiento de distintos materiales a la deflexión y a la pendiente. Por otro lado, modificando el momento de inercia se puede analizar el comportamiento de la deflexión y la pendiente modificando la forma y dimensión de la sección transversal de la estructura.

Por otro lado, en [22] se entrega también la curva elástica para una carga puntual aplicada sobre una estructura simplemente apoyada:

$$v = \frac{-P \cdot b_p \cdot x}{6 \cdot E \cdot I_A \cdot L_a} \cdot (L_a^2 - b_p^2 - x^2) \quad (34)$$

Donde

P : es el peso o magnitud de la carga

b_p : es la distancia desde el apoyo al punto de aplicación de la carga puntual

Cuando existen distintos tipos de carga, la deflexión en un punto es la suma de los aportes de la deflexión de cada una de las cargas en ese punto.

9.2 FUNCIONAMIENTO Y MATERIALES

El trabajo realizado en adelante toma en cuenta la fabricación con materiales fácilmente conseguibles en el mercado nacional. Las dimensiones y características fueron obtenidos a través de catálogos o cotizaciones.

El alto óptimo del receptor (H_r), considerando el ancho de los espejos y los esfuerzos ejercidos por el viento, es de 2 [m] mientras que el ancho (W_r) es de 0,3 [m]. Es necesario que el ancho del receptor sea mayor que el de los espejos debido a que los rayos divergen antes de alcanzar el receptor por causa del ángulo que subtiende el sol (sección 4) y por la variación de la superficie producida al inclinar el espejo (sección 5.2). Estos efectos se potencian en los espejos más alejados del centro del concentrador.

Dado que el diseño del banco de pruebas de un concentrador Fresnel debe flexibilizar ciertos parámetros para analizar los cambios en la producción de energía, se utilizará un sistema telescópico que permite regular la altura del receptor entre 1, 1,5 y 2 metros con respecto al nivel base de los espejos primarios, y de esta manera estudiar los efectos causados en la producción de energía al variar esta altura. Para montar el mecanismo, se utiliza un sistema que consiste en 2 perfiles tubulares para los pilares de distintas dimensiones, introduciendo uno dentro de otro. El pilar externo solo posee una perforación y el interno posee varias perforaciones en donde se introduce un pasador para fijarlo al nivel de trabajo (Ilustración 33). La estructura del pilar externo está compuesta por dos perfiles tubulares unidos con refuerzos que le entregan rigidez a la estructura. Es en los perfiles internos donde se apoyan finalmente las vigas que sostienen el receptor (espejo secundario y absorbedor).

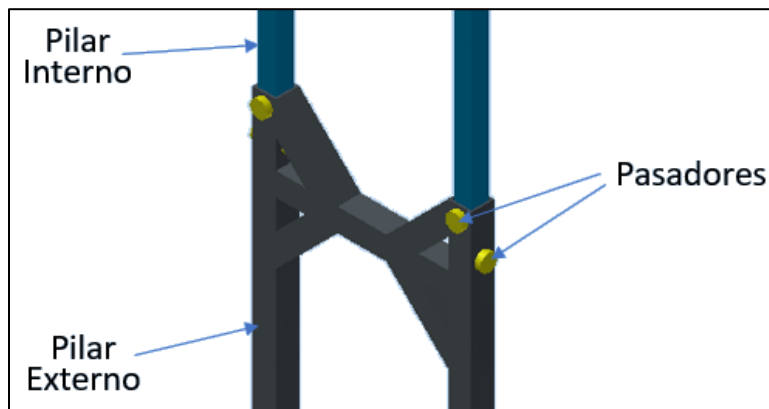


Ilustración 33: Sistema de regulación de la altura del receptor.

Las simulaciones echas por [1] sobre el concentrador secundario son realizadas con un modelo de seguimiento de rayo, tomando en cuenta diversas configuraciones y dimensiones del absorbedor aplicados en los distintos tipos de concentradores secundarios vistos en la sección 8.3. El rendimiento geométrico del sistema es calculado sumando el número de rayos que golpeó el absorbedor en comparación con el número total que ingresaron al concentrador secundario, mientras que el rendimiento de flujo toma en cuenta las pérdidas generadas en cada una de las reflexiones del rayo en el concentrador secundario.

Como es de esperar, los resultados muestran que el concentrador secundario tipo *CPC* obtuvo el mayor rendimiento geométrico, llegando a un 98,58% utilizando 2 absorbedores de 60,3 [mm] de diámetro y a 97,56% utilizando solo un absorbedor de 87,99 [mm] de diámetro.

Si bien el *CPC* presenta el mejor rendimiento, también es la superficie de concentrador secundario más difícil (y costosa) de fabricar debido a la complejidad de su forma parabólica, por lo que, con el fin de reducir los costos, se toman en cuenta las superficies con perfiles planos. En este sentido, la superficie de tipo M tuvo mejores resultados que el tipo de pico, pero hubo aspectos ventajosos de ambos que se hicieron evidentes en el análisis de sensibilidad. La superficie del pico era beneficiosa para los rayos procedentes de espejos directamente debajo del receptor y el tipo M era apropiado para los rayos procedentes de espejos en el borde del conjunto. Estas características se combinaron en un concepto llamado “pico extendido”. Esto permitió que la forma del concentrador secundario se aproximara a una forma parabólica compuesta con segmentos de espejo planos, obteniendo un rendimiento geométrico de 92,40% al utilizar un absorbedor de 88,9 [mm] de diámetro.

La superficie de pico extendido tiene una inclinación de 70° respecto a la horizontal para el primer plano, luego 50° y finalmente 5°. La inclinación de 70° corresponde al ángulo de aceptación del receptor más 15° adicionales. Esto significa que los rayos de cualquiera de los espejos se reflejarán más profundamente en el receptor [1]. Para el diseño del receptor se considera dejar una aislación de 3 [cm] de espesor. El modelo se muestra en la Ilustración 34, el cual se compone de dos secciones: dos estructuras exteriores simétricas que posee una aleta en la parte inferior para el apoyo del vidrio y una estructura interior que genera la forma de pico extendido como concentrador secundario.

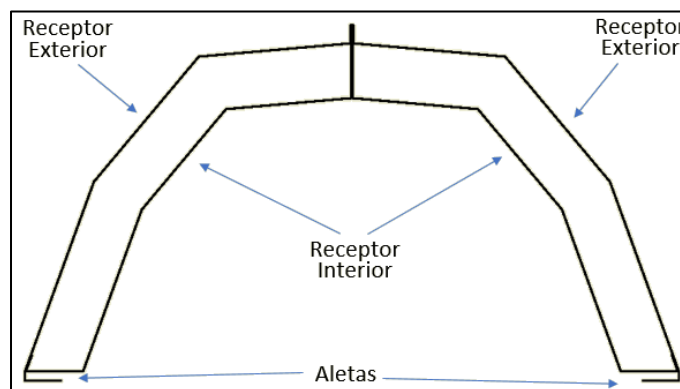


Ilustración 34: Diseño de receptor tipo Pico Extendido.

El concentrador secundario seleccionado se fabrica a partir de una lámina de metálica delgada, la cual generará una inercia alta para poder sostener el peso de todos los componentes del receptor y generar poca deflexión. Se seleccionó un material de [23] priorizando el bajo peso de la plancha, optando por una plancha de acero galvanizada de 0,5 [mm] de espesor. Entre medio de las dos estructuras del receptor se posicionan una serie de refuerzos del mismo material unido con ángulos para mantener la forma y rigidez del concentrador secundario al aplicarle cargas. Además, al interior del concentrador se posicionan soportes para la cañería donde circula el fluido caloportador. El receptor se diseña de forma modular con un largo de 500 [mm] cada uno. Para unir los módulos se utiliza una pieza del mismo material y forma que el receptor. El módulo final posee un largo de 531 [mm] para completar el largo total del receptor de 4531[mm], agregándole 0,5 [mm] por cada extremo que corresponden a las tapas que cierran y mantienen el calor en el receptor. Los extremos del receptor se apoyan en el sistema de pilares telescópicos vistos anteriormente.

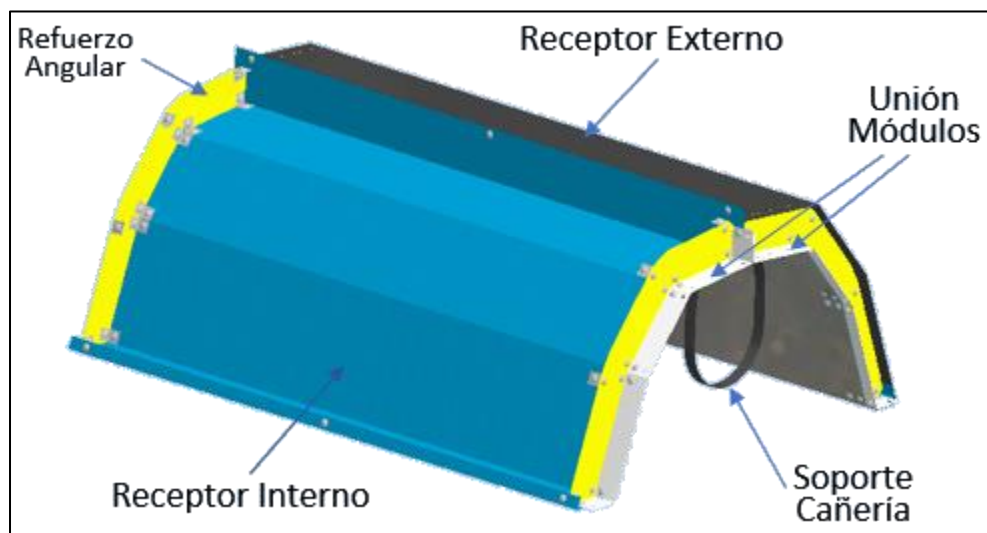


Ilustración 35: Componentes del Módulo Receptor.

Para la construcción de todos los componentes del receptor se requiere una superficie aproximada de 6 [m^2], por lo que el peso del concentrador, considerando la densidad superficial obtenida de catálogo, es menor a 24 [kg].

Dentro de las dos estructuras metálicas se coloca un aislante térmico para disminuir las pérdidas de energía a través del receptor. El volumen disponible para aislación es de 0,015 [m^3], donde es posible colocar menos de 5 [kg] de un aislante como la lana mineral (considerando la densidad del producto encontrada en el mercado).

En las aletas del receptor exterior se coloca un vidrio para disminuir pérdidas térmicas y mantener la radiación en el interior del concentrador secundario. Como se busca disminuir el peso del receptor, se selecciona un vidrio de 3 [mm] de espesor, el cual tiene un peso de 11,9 [kg] considerando los 4,471 [m] de longitud que debe cubrir por debajo del receptor.

Dentro del receptor en forma de pico extendido se posiciona una cañería de cobre, la cual es dimensionada a partir del catálogo entregado por [24]. En primer lugar, los fabricantes proporcionan tubos de cobre en cuatro tipos estandarizados: K, L, M y DWV. Las letras indican el espesor relativo

de la pared de la tubería desde la más gruesa hasta la más delgada. El espesor de la pared real depende del tamaño de la tubería. A mayor espesor, mayor capacidad de presión tiene la cañería. Para el concentrador Fresnel diseñado, no se espera generar grandes presiones, lo que posibilita la utilización de una cañería tipo M, siendo la de menor espesor considerando la fácil adquisición debido a su disponibilidad. Además, un menor espesor de pared se traduce en una transferencia de calor más directa al fluido térmico.

El diámetro de la cañería a utilizar, se basó en la oferta encontrada en el mercado ([24]), escogiendo la más cercana a los 88,9 [mm] utilizados en la simulación. En base a lo anterior, se selecciona una cañería de 3 pulgadas (79,38 [mm] de diámetro externo), cuyo espesor de pared es de 1,83 [mm] y su peso, considerando un largo de receptor de 4,531 [m], es de unos 18 [kg], mientras que el peso del fluido que circula en su interior (agua) es de 20,4 [kg]. Se utilizan las propiedades de la aleación de cobre DHP obtenidas de [25].

El conjunto del receptor, que incluye la estructura metálica (23,4 [kg]), aislante (9 [kg]), la cañería (18 [kg]), el fluido 20,4 [kg] y el vidrio (11,9 [kg]), tiene un peso aproximado de 82,7 [kg]. Tanto el aislante como el vidrio distribuyen su carga homogéneamente en la estructura metálica y la deflexión, considerando también el peso propio de esta estructura, es de 0,88 [mm] en medio de los soportes, obtenida utilizando la ecuación (31).

Por otro lado, considerando todo el peso de la cañería y el fluido calo portador aplicado como una carga puntual en el centro de la estructura metálica, se obtiene una deflexión de 1,22 [mm] aplicando la ecuación (34). Sin embargo, la deflexión por una carga puntual es un caso extremo, ya que si se consideran apoyos en ambos extremos el peso aplicado en el centro se reduce inmediatamente a la mitad, disminuyendo en gran medida la deflexión máxima, ya que las cargas aplicadas en los extremos no producen deflexión debido a que se encuentran justo sobre los apoyos. En el caso diseñado se utilizan 18 soportes de apoyo para la cañería a lo largo del receptor, por lo que la deflexión se asemeja más a una producida por una carga distribuida, obteniendo un valor de 0,76 [mm] utilizando la ecuación (31).

Utilizando superposición de las cargas distribuidas en el punto medio del receptor, se obtiene una deflexión total menor a los 2 [mm]. Como se mencionó anteriormente, la deflexión en esta dirección no genera grandes pérdidas ópticas como las producidas por deformaciones en la dirección Este-Oeste.

Uno de los parámetros variables en el banco de pruebas es el espaciamiento entre cada uno de los espejos primarios. Para conseguirlo, primero se realiza una estructura modular formada por un espejo, su soporte y sus ejes de apoyo. Estos módulos son montados sobre un sistema de rieles que le permiten apoyar los ejes de giro del módulo, acoplar el motor que genera el movimiento y establecer la distancia entre módulos, fijando manualmente la posición requerida de cada uno (Ilustración 36). De esta manera, además de utilizar espejos con un espaciamiento determinado, se pueden utilizar distintos espaciamientos para cada módulo dependiendo de su distancia con el centro del arreglo.

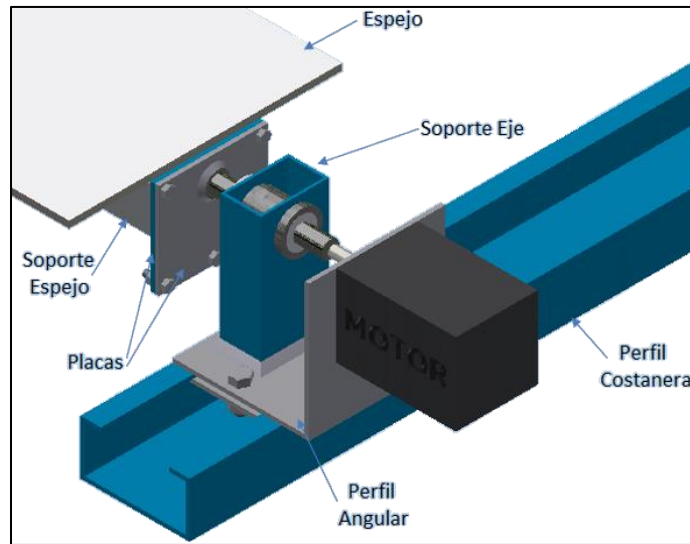


Ilustración 36: Sistema de montaje de espejos modulares y rieles móviles.

Para un montaje sencillo, el espejo y su soporte se encuentran unidos al eje por dos placas idénticas las cuales se unen entre sí por medio de 5 pernos distribuidos en el perímetro de las placas. La primera placa se acoplada al soporte del espejo y la segunda se acoplada al eje. Este sistema permite montar y desmontar fácilmente los módulos en el caso de tener que agregar o quitar espejos, por ejemplo, en medio del arreglo, sin tener que desmontarlos todos para poder introducirlos en la posición central.

El eje se monta sobre un buje de polímero, el cual va montado a su vez dentro de un cilindro perforado (Ilustración 36) con el objetivo de entregarle una superficie continua de apoyo para evitar el desgaste irregular. El dimensionamiento del eje se realiza, por tanto, a partir de la fácil adquisición y disponibilidad del cilindro de apoyo del buje. Para el cilindro se selecciona el acero al carbono perforado de menores dimensiones disponible en el catálogo obtenido en [26], el cual se tornea solo para llegar a su medida final de 23 [mm] de diámetro interno. Luego, para un buje de polímero dimensionado del mismo catálogo, se considera un espesor de pared de 5 [mm], quedando un espacio interno para el eje de 13 [mm].

El cilindro perforado se monta en el soporte del eje (Ilustración 36) el cual se fabrica a partir de un perfil tubular rectangular. Este soporte es soldado a un perfil angular, el cual cumple la función de fijar la posición del espejo (espaciamento) presionando las aletas de un perfil costanera (riel) por medio de la placa que corre en su interior. Además, permite el acoplamiento del motor con el eje del módulo, lo que genera el movimiento del espejo.

Para conseguir posicionar libremente cada módulo, fue necesario optar por la utilización de un motor por cada espejo. Esta alternativa es más costosa que utilizar un motor más grande para mover todos los espejos conjuntamente, sin embargo, le entrega valiosas ventajas. En primer lugar, el sistema de acoplamiento del motor y el módulo es directo, y por lo tanto, mucho más sencillo de diseñar, ya que se evita la construcción de un sistema que controle todos los módulos a la vez en una posición determinada. En segundo lugar, entrega la posibilidad de fácilmente colocar todos los espejos en un ángulo de inclinación independiente para, por ejemplo, limpiarlos, protegerlos del

viento y precipitaciones o para realizar el mantenimiento. Por último, el sistema de un motor por módulo permite que, si falla un motor o se rompe alguna pieza del sistema, el concentrador siga funcionando con los espejos restantes, sin verse afectada en gran medida la producción de energía.

Adicionalmente, el diseño del concentrador usando módulos y motores individuales, permite que se puedan montar espejos de diferentes anchos al seleccionado, siendo necesario para esto solamente construir el módulo del ancho requerido y montarlo en los rieles ya establecidos.

El elemento más importante en un concentrador Fresnel es el espejo primario. Un espejo se crea a partir de la reflexión de la luz sobre un material metálico como el aluminio o la plata. Los espejos llamados de plateado frontal, o de primera superficie, se realiza en la cara expuesta a la luz, la que llega y se refleja, el sustrato o soporte no necesita ser transparente. Por otro lado, están los espejos de plateado posterior, o de segunda superficie, en estos la luz debe atravesar el soporte de vidrio, reflejarse y volver a atravesar el cristal. Estos últimos son los más comunes y el soporte sí requiere ser transparente, protegiendo la frágil capa reflectora de la corrosión y rasguños. La calidad del espejo dependerá altamente de cuán limpio y claro sea el soporte.

Las dimensiones generales del espejo fueron entregadas en la sección anterior (20 [cm] de ancho y 3 [m] de largo), sin embargo, se deben tomar en cuenta otras características importantes para su correcto funcionamiento.

	Valor	Unidad	Referencia
Densidad	2500	kg/m ³	[27]
Ancho	20	Cm	
Largo	3	m	
Espesor	5	mm	
Módulo de Elasticidad	70000	Mpa	[27]
Masa	7,5	Kg	
Deflexión	177	mm	Ecuación (31)

Ilustración 37: Características de espejo primario.

Con el procedimiento expuesto en la sección 9.1, es posible obtener que la deflexión teórica de un espejo primario apoyado en sus extremos es de 177 [mm]. Esta deflexión es muy grande para la precisión que se necesita en un *LFC*, por lo que se opta por la utilización de un soporte para evitar la deflexión excesiva del espejo y darle estabilidad.

En este punto está la opción de colocar un soporte circular o uno cuadrado, dado que ambas geometrías mantienen su inercia al rotar, y por tanto su deflexión. Posiblemente, un soporte circular facilita el acople del sistema de rotación del espejo, pero hace complejo el montaje del espejo sobre el soporte. Por otro lado, para un soporte cuadrado se necesita un sistema más complejo de rotación, sin embargo, el acoplamiento del espejo con el soporte se realiza fácilmente. Esta última fue la opción escogida dado que facilita el montaje del espejo y el soporte cuadrado, donde el espejo es adherido a una de las caras. En este soporte es soldada una placa, en la que posteriormente se acopla con la placa idéntica que posee el eje de apoyo (Ilustración 38).

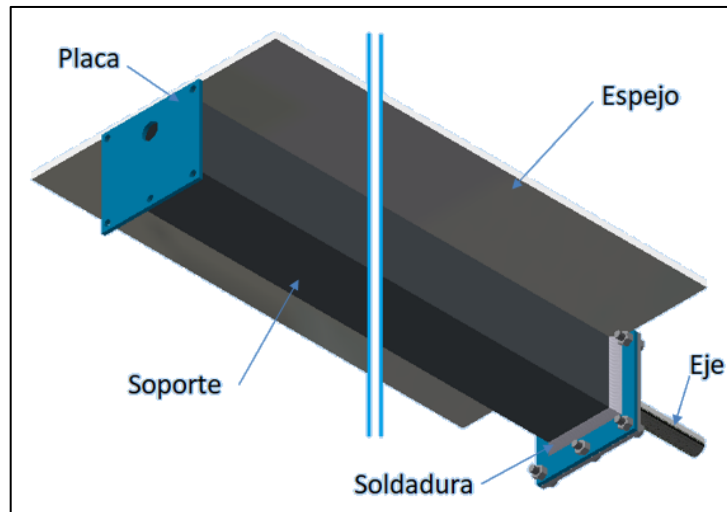


Ilustración 38: Montaje espejo, soporte, placa y eje.

Para dimensionar los perfiles de acero, se hace uso de los catálogos entregados por [23]. Las calidades utilizadas son A270ES, A240ES, SAE 1010 y SAE 1008. El peso por metro de longitud para cada uno de los perfiles es entregado en el catálogo en unidades de $[kgf/m]$. Para cada uno de los perfiles tubulares rectangulares el valor de la densidad (ρ) cambia, por lo que se calcula un valor promedio para evaluar posteriormente la deflexión bajo las mismas condiciones. Se determina que el valor de densidad a utilizar es de $7405[kg/m^3]$.

Se seleccionó un perfil tubular cuadrado de $5 \times 5 [cm]$ con un espesor de $2 [mm]$ para el soporte del espejo, lo que reduce la deflexión inicial de $177 [mm]$ (solo con el espejo) a menos de $2 [mm]$. Esta deflexión es bastante más aceptable y no se traduce en pérdidas ópticas dado que una deflexión en el plano Norte-Sur desvía los rayos hacia el centro del largo del receptor. Se debe considerar que al girar el espejo la distancia entre el módulo con el espejo y la estructura inferior del concentrador (Ilustración 39) es variable y su valor mínimo es de unos $18,5 [mm]$, por lo que dada la deflexión obtenida, no hay riesgo de que estas estructuras se interfieran.

Para dimensionar el perfil costanera, utilizado como riel para los módulos (Ilustración 36), se establecen 3 apoyos de la estructura en el piso, separados por $1,45[m]$ cada uno. En esta distancia son posicionados 6 de los módulos de espejos, cuyo peso es de $7,5 [kg]$ por cada espejo y $8,6 [kg]$ por cada uno de los soportes, sin embargo, el peso se divide a la mitad ya que se distribuye en dos rieles (uno en cada extremo). Considerando que los módulos se distancian homogéneamente unos de otros y los pesos son iguales, se aproxima el comportamiento de la curva elástica a una carga homogéneamente distribuida (ecuación (31)), obteniéndose una deflexión máxima en medio de los apoyos de $0,84 [mm]$ y una pendiente máxima de $0,11^\circ$ (ecuación (33)) para un perfil costanera de $8 [cm]$ de ancho, $4 [cm]$ de alto y con un espesor de $3 [mm]$.

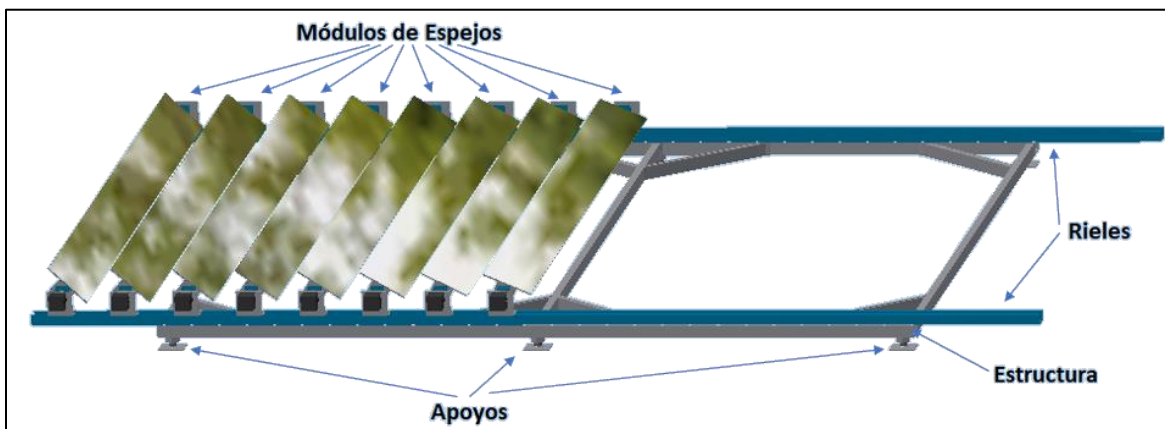


Ilustración 39: Montaje de los módulos, los rieles, la estructura y los apoyos.

Sin embargo, la deformación de los rayos en el eje Este-Oeste, sí desvía la radiación hacia afuera del receptor, por lo que es necesario en este caso disminuir al máximo la deflexión producida. Para esto se opta por utilizar una “estructura de refuerzo” en la base del perfil costanera, lo que permite, a la vez, distanciar ambos rieles que soportan a los módulos de espejos manteniendo la rectitud de los ángulos gracias a los refuerzos de la estructura (Ilustración 39). La estructura se dimensiona en base a un perfil rectangular, cuyas medidas son de 10 [cm] de ancho, 5 [cm] de alto y 4 [mm] de espesor. Esto reduce la deflexión máxima entre apoyos a 0,26 [mm], lo que se traduce en una pendiente máxima de 0,03°, un valor aceptable considerando la precisión de seguimiento, tema que será tratado más adelante.

Se puede apreciar el montaje final del concentrador en la Ilustración 40, incluyendo los 16 módulos, el receptor a 2 [m] de altura respecto al nivel base (horizontal) de los espejos y los motores individuales por cada módulo, mientras que el receptor posee un largo adicional a los espejos para captar la radiación más intensa de medio día que se desplaza hacia el Sur. El diseño realizado posee un área de apertura de 9,6 [m²], valor importante al momento de calcular la eficiencia y producción de energía.

Es posible obtener, con un cálculo a grosso modo, la cantidad de agua que podrá calentar el concentrador Fresnel diseñado. En primer lugar, se toma en cuenta que la potencia promedio anual recibida a medio día en la región de Valparaíso es de unos 532,7[W/m²]. Por otro lado, se considera una eficiencia óptica y térmica media de 60% y 58%, respectivamente, obteniendo una eficiencia del concentrador de 35%. Con esta eficiencia y considerando el área de apertura que posee el concentrador, es posible determinar la potencia promedio para medio día de 1780[W], lo que equivale al comportamiento aproximado de un hervidor de agua de uso doméstico, es decir, se estima que el concentrador Fresnel diseñado calentará agua a una velocidad similar a la de un hervidor de agua doméstico.

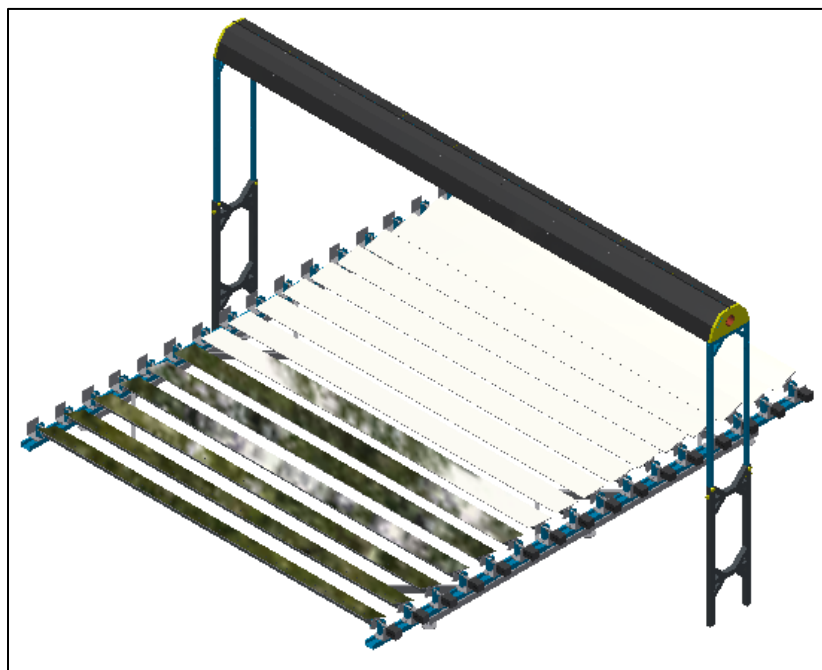


Ilustración 40: Esquema general del colector solar Fresnel.

9.3 MOTOR Y CONTROLADOR

Para el movimiento de los espejos se utiliza un motor por cada espejo, tal y como se expone en la sección anterior. En el mercado actual se pueden encontrar básicamente tres tipos diferentes de motores: de corriente continua, servo y paso a paso. [28]

Motor de Corriente Continua: Un motor de corriente continua es un dispositivo que se rige por las ecuaciones de Maxwell, las cuales establecen que cuando se hace circular una corriente por un conductor que está inmerso en un campo magnético, este se ve sometido a una fuerza mecánica (electromotriz) que se puede usar como principio básico de funcionamiento de un motor eléctrico. La fuerza obtenida es proporcional a la intensidad del campo magnético y a el número de espiras que son recorridas por la corriente. Este tipo de motores no son útiles para un concentrador solar ya que al alimentarlo es difícil saber cuánto se ha movido exactamente, porque no tenemos en principio ningún mecanismo de realimentación que nos informe. Es posible incluir un sistema de realimentación (por ejemplo, sensor efecto hall o encoder), sin embargo, esto complejiza el sistema y hace difícil corregir la posición.

Motor Servo: Los servos son también motores de corriente continua en conjunto con una caja reductora y un circuito de control. Está diseñado para que se muevan un ángulo fijo en respuesta a una señal de control, y se mantengan fijos en esa posición. Normalmente los servos funcionan sobre 5V y el control se realiza mediante una señal de control *PWM* (Modulación por Ancho de Pulso), en la que el ancho el pulso indica el ángulo que deseamos adopte el eje. Habitualmente el margen de operación de los servos es entre 0° y 180°, y a pesar de que se puedan encontrar con dificultad modelos comerciales de 360°, esta característica limita su adquisición y la operación del concentrador solar que pretende ser operado sin limitaciones de ángulos.

Motor Paso a Paso: En un motor paso a paso se monta un sistema de varias bobinas que garantizan que solo se mueve la distancia (paso) entre las bobinas contiguas. Convierte en digital el movimiento del motor, ya que se controla el movimiento que puede hacer saltando entre posiciones discretas, alimentando las bobinas contiguas cuando queremos mantener el giro, y al dejar de hacerlo, el motor se detiene fulminantemente y se conoce con precisión su posición. Este motor cuenta con algunas características que pueden o no ser ventajosas para usarlo en un concentrador solar:

- Puede girar continuamente y sin limitantes angulares.
- El control digital se simplifica mucho utilizando algún controlador fabricado para este tipo de motores.
- Posee un máximo par motor a bajas revoluciones.
- Para mantener el motor fijo en una posición hay que mantener excitada al menos una de las bobinas, lo que se traduce en un consumo de energía igual o mayor a cuando está en movimiento.
- No se sabe en qué posición está cuando arranca, por lo que requiere de un final de carrera para saber dónde está la posición cero.

El sistema de control de los motores estará conformado básicamente por una placa Arduino, una plataforma de interacción con el usuario en donde se pueda establecer la fecha y hora, y un sistema de control del motor que incluye al motor, un controlador y un sensor final de carrera para cada motor.

Arduino es una plataforma de código abierto, basada en una sencilla placa con entradas y salidas analógicas y digitales. Posee un entorno de desarrollo basado en el lenguaje Processing/Wiring. Se compone de un micro controlador Atmel AVR que viene pre programado con una secuencia de arranque, por lo que no necesita un programador externo.

El lenguaje del Arduino es una versión reducida y mucho más sencilla de manejar que el lenguaje C. El objetivo de este lenguaje es que puedas programar de una manera intuitiva concentrándote en lo que quieres hacer más que en la manera de hacerlo.

Trabajar con un Arduino consiste fundamentalmente en interactuar con los diferentes puertos de entrada y salida que posee. A fin de evitar al programador la complejidad de programar estos puertos (ya sean analógicos, digitales o de cualquier otro tipo) el lenguaje de Arduino usa una serie de librerías. Estas librerías permiten programar los pines digitales como puertos de entrada o salida, leer entradas analógicas, controlar servos o encender y apagar motores, ya sea trabajando de manera autónoma o a través de un programa corriendo en un computador (por ejemplo, Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data, SuperCollider). La mayor parte de estas librerías de base forman parte de una macro librería llamada Wiring.

En los anexos se muestra el montaje total y simplificado de los componentes controlados por la placa Arduino Mega. En la Ilustración 41 se aprecia el detalle de todas las conexiones que lleva la placa utilizada. Los cables negros representan las conexiones a tierra, mientras que los cables rojos representan las salidas de 5V hacia los diferentes usos. En la fila superior, las conexiones en los pines 3 y 4 representan las señales a los pulsadores (P1 y P2) utilizados para la interacción con la pantalla LCD en donde puede ser posible configurar la fecha, hora, huso horario, altura de los espejos al receptor y el espaciamiento entre espejos, etc. Los pines 14, 15, 16, 17, 18 y 19 son utilizados para el

control de la pantalla LCD. La pantalla utilizada da la posibilidad de mostrar 16 caracteres en cada una de sus 2 filas. Además, la conexión agrega un potenciómetro (resistencia variable) para regular el contraste.

La posición en la que se encuentra un motor paso a paso es desconocida para el controlador. Por lo tanto, en la puesta en marcha, es necesario girar todos los espejos hasta una posición conocida para luego calcular el movimiento de cada espejo en base a este ángulo. El pin 5 recibe la señal alternadamente de los 16 finales de carrera (Limit Switch - LS) de los módulos. El cambio de recepción de señal entre un final de carrera y otro es realizado por un multiplexor, aparato capaz de discriminar una señal en particular de entre múltiples opciones. El multiplexor utilizado posee 16 entradas y una salida, pero se puede utilizar también en sentido inverso. Para seleccionar una de las 16 entradas posibles, se hace uso de 4 señales que determinan el número de puerta en binario. Estas 4 señales son las que entregan los pines 6, 7, 8 y 9 de la placa Arduino Mega. Con la utilización del multiplexor se hace posible manejar 16 señales distintas solo con 5 pines de la placa.

Fue seleccionado un motor paso a paso Nema 23, lo que determina básicamente el tamaño de su cara frontal, mientras que la profundidad del motor está más relacionada con el torque que puede ejercer. Para utilizarlo, se debe tener el control tanto de los pasos que debe dar como del sentido de giro, lo que depende básicamente de la secuencia con que se alimenten sus bobinas. Por otro lado, dada la poca corriente que puede suministrar la placa Arduino en sus pines, estos motores requieren de una alimentación externa superior a la requerida por la placa. En este punto se hace bastante compleja la administración de los flujos de corrientes elevadas en diferentes bobinas con una secuencia determinada según la necesidad de cada momento. Por esta razón se hace uso de un controlador externo (driver) en cada uno de los motores, los que se encargan de todo el flujo de corriente a partir de solo dos señales entregadas desde Arduino: una define el sentido de giro del motor mientras que la otra, en forma de pulso, establece el momento en que debe dar un paso.

El motor seleccionado es un motor bifásico, modelo 57HS56-2804 SG15, y según su hoja técnica, entrega una resolución de $1,8^\circ$ por cada paso, se alimenta de una corriente de $2,8 [A]$ a $2,52 [V]$, lo que se traduce en una potencia de alrededor de $7 [W]$ (similar al consumo de una ampolleta LED). Posee un torque de retención de $1,24 [Nm]$ y su masa es de $0,68 [kg]$. Adicionalmente, este motor cuenta con una caja reductora de velocidad acoplada, la cual posee una razón de 1: 15, lo que se traduce en una disminución del paso del motor a $0,12^\circ$ por paso, lo que implica un aumento del par motor o torque teórico a $18,5 [Nm]$.

Al trabajar con los motores se determinó que la razón de reducción no era exactamente la indicada en la hoja técnica, siendo la real de 1: 14,7973, con la cual se obtiene una resolución del motor de $0,12164^\circ$ por paso. En el documento se trabajará con los valores entregados en la hoja técnica, mientras que los valores reales serán utilizados al momento de programar el control de movimiento de los motores.

Al mismo tiempo, es posible reducir el paso electrónicamente por medio del controlador del motor (microstepping) en razones de 1: 2, 1: 4 y 1: 8, obteniendo una resolución mínima de $0,015^\circ$ por paso, pero con una disminución en el torque aplicado.

En un concentrador Fresnel, todos los motores deben girar en el mismo sentido durante la operación, por lo que se utiliza solamente el pin 21 para enviar la señal de giro a los 16 controladores, siempre y cuando la corriente total no supere la que puede ser entregada por un pin de Arduino. En cuanto a la señal para dar un paso, es posible que se necesite en diferentes momentos para cada uno de los motores, por lo que se utilizan los pines pares que se encuentran entre el 22 y 52 de la placa.

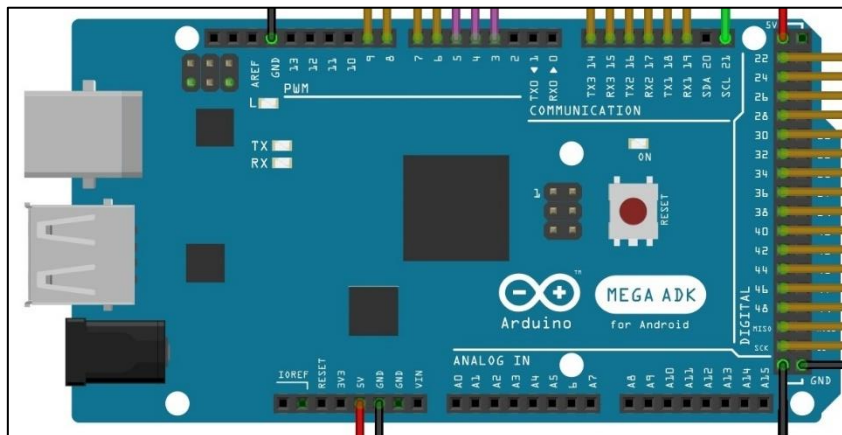


Ilustración 41: Conexiones a placa controladora Arduino Mega.

9.4 TORQUE

El objetivo en esta sección es identificar los fenómenos que afectan en el torque necesario que debe aplicar el motor para lograr mover uno de los módulos.

En busca de disminuir al máximo el torque generado sobre el eje del motor, se deben considerar cuatro aspectos importantes para poder determinar si el torque del motor seleccionado es adecuado para el concentrador Fresnel diseñado: peso propio de la estructura, la inercia para iniciar y detener el movimiento de un cuerpo, la fricción que se produce con el buje y el viento que impacta en la superficie del espejo.

En primer lugar, la geometría y la masa del elemento que se desea girar realizan un torque sobre el eje de giro debido a su propio peso, forzando a la estructura a una posición de equilibrio. Para cualquier posición distinta de esta, el motor deberá contrarrestar el torque de la estructura. Para disminuir al máximo el torque generado por el peso propio de una estructura, se debe posicionar el eje de giro en el centro de masa del conjunto espejo-soporte. De esta manera, el sistema estará equilibrado para cualquier posición angular en que se encuentre.

El centro de masa, a diferencia del centroide, toma en cuenta las diferencias de densidad de los distintos elementos que componen una geometría. Sin embargo, si la densidad de todos los elementos es la misma, el centro de masa coincide con el centroide o centro geométrico. La posición del centro de masa se calcula con respecto a un punto de referencia. Para calcularlo se utilizan las siguientes ecuaciones dadas por [29].

$$x_{CM} = \frac{\sum \bar{x}_i \cdot m_i}{\sum m_i} \quad (35)$$

$$y_{CM} = \frac{\sum \bar{y}_i \cdot m_i}{\sum m_i} \quad (36)$$

Donde x_i e y_i corresponden a las posiciones del centro geométrico (o centroide) de un elemento de masa homogéneamente distribuida m_i .

Por medio de las ecuaciones (35) y (36) se determina que el centro de masa del conjunto espejo-soporte se encuentra a 37,87 [mm] medidos desde la base del soporte y sobre el eje de simetría vertical. Esto genera una distancia entre el eje de giro y la base del espejo (donde se produce la reflexión) de 12,13[mm] La ubicación del eje de giro desplazado del centro del espejo tiene implicancias en el movimiento de los espejos y en el método de control que se utiliza, las cuales se verán más adelante.

Ubicar el eje de giro justo en su centro de masa se traduce en que para cualquier plano que pasa por este punto, los momentos de las masas a un lado del plano son iguales a los momentos de las masas del otro lado, eliminando cualquier torque aplicado por el peso de la misma estructura que se desea girar. Si el eje del motor no se alinea completamente con el centro de masa, se generarán fuerzas desfavorables mientras la estructura se encuentra en reposo, ya que estarán aplicadas permanentemente sobre el motor. Cuando la estructura se encuentre en movimiento, estas fuerzas pueden pasar a ser tanto favorables como desfavorables, dependiendo del sentido de giro y la dirección en la que se encuentre cargada la estructura.

En segundo lugar, se debe considerar el momento de inercia de masa (I_m) del cuerpo, el cual es una medida de la resistencia a adquirir una aceleración angular. El momento de inercia se calcula con respecto a un eje de referencia y se traduce en que el tiempo requerido para que un sistema alcance una velocidad de rotación dada es proporcional a la masa y al cuadrado de la distancia al eje de giro.

$$I_m = \int r^2 dm \quad (37)$$

Donde

m : representa la masa de cada elemento.

r : es la distancia del centro de masa del elemento al eje de referencia.

La tendencia de una fuerza a dar vuelta un objeto en torno a cierto eje se mide mediante una cantidad llamada momento de torsión o torque (τ). Para determinar el torque aplicado a un cuerpo debido al momento de inercia, se plantea una ecuación análoga a la segunda ley de Newton para un movimiento rectilíneo, la cual está dada por [29].

$$\sum \tau = I_m \cdot \alpha_c \quad (38)$$

Donde α_c es la aceleración angular.

Es decir, el momento de torsión neto que actúa sobre la partícula es proporcional a su aceleración angular y la constante de proporcionalidad es el momento de inercia de masa.

En particular, para el diseño del concentrador Fresnel, se considera despreciable el torque debido al momento de inercia de la ecuación (38), ya que, si bien el momento de inercia es calculable dada la geometría simple del conjunto soporte-eje, la aceleración requerida es prácticamente nula debido al poco movimiento rotacional que se genera por cada paso y al gran tiempo disponible para realizar la rotación.

En tercer lugar, se debe considerar la fricción producida por el contacto del eje del módulo con el buje de apoyo. La fricción será perjudicial mientras la estructura se encuentre en movimiento y será beneficioso cuando la estructura se encuentre en reposo.

Los cojinetes de apoyo proporcionan soporte lateral al eje, en los que, considerando un coeficiente de rozamiento pequeño, se puede realizar una aproximación para calcular el momento del par o torque (τ) que se debe vencer para girar el eje sobre buje. [30]

$$\tau = \mu_e \cdot P \cdot r \quad (39)$$

Donde P representa el peso aplicado sobre el eje y r su radio.

Fue seleccionado el Technyl como material para la fabricación del buje. El Technyl es una poliamida de características termoplásticas que difiere de los plásticos de uso corriente por sus excelentes propiedades mecánicas, dieléctricas, técnicas y químicas. Según la ficha técnica obtenida de [31], se obtiene un valor del coeficiente de fricción estático (μ_e) con el acero entre 0,31 y 0,74. Además, el peso del espejo se obtiene de la Ilustración 37 e incluyendo el del soporte, la carga axial aplicada en cada eje es de 78,6 [N]. Por último, considerando que el diámetro del eje es de 13 [mm] y utilizando la ecuación (39), se obtiene un torque máximo a vencer por fricción de 0,32 [N m]. Este valor es bastante pequeño considerando los 18,5 [N m] disponibles en el motor.

Por último, se debe considerar el efecto que produce el viento sobre la estructura. Al no ser un elemento necesariamente constante, es importante que el motor logre mantener la posición del módulo o pueda girarlo en presencia de él.

El siguiente análisis de mecánica de fluidos para el viento es obtenido de [32]. La fuerza ejercida por el viento sobre una estructura está determinada por un factor que relaciona las propiedades del fluido que aplica la fuerza de arrastre (F_D) y la superficie en la que impacta el fluido. Este factor es el “coeficiente de arrastre” (C_D) o “drag”.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (40)$$

En la obtención de C_D se toma en cuenta la fuerza de arrastre (F_D), la densidad del fluido (ρ), la velocidad del fluido (V) y el área efectiva de la superficie donde impacta el fluido (A).

Aunque la presión sobre la superficie trasera de la placa es esencialmente constante, su magnitud no puede ser determinada analíticamente. En consecuencia, se recurre a experimentos para

determinar la fuerza de arrastre. El coeficiente de arrastre para una placa finita normal al flujo depende de la relación entre el largo del espejo y el espesor (L_a/e) y del número de Reynolds (Re). Para un número de Reynolds basado en el espesor (Re_e) mayores que 1000, el coeficiente de arrastre es esencialmente independiente del número de Reynolds. Además, cuando $L_a/e \approx \infty$ entonces $C_D \approx 2,05$.

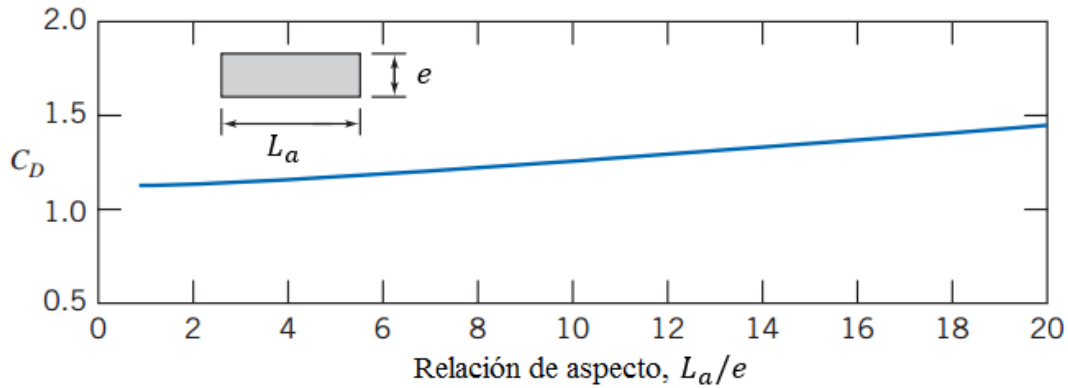


Ilustración 42: Variación del coeficiente de arrastre con la relación de aspecto para una placa plana normal al fluido con $Re_e > 1000$. [32]

El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Además, es un criterio por el cual se puede determinar el régimen de flujo. Los flujos con grandes Re generalmente son turbulentos. Flujos donde las fuerzas de inercia son pequeñas en comparación a las fuerzas viscosas son característicamente flujos laminares. En general se obtiene de la siguiente expresión.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L_c}{\mu} = \frac{V \cdot L_c}{\nu} \quad (41)$$

Donde

L_c : es una longitud característica descriptiva de la geometría del campo de flujo, que en este caso será la altura o espesor de la placa delgada.

μ : es la viscosidad dinámica del fluido

ν : es la viscosidad cinemática del fluido

Tomando en cuenta lo anterior, se determina el torque efectuado sobre los espejos debido al viento, considerando el caso más desfavorable:

- El viento impacta de forma perpendicular al espejo, maximizando la superficie efectiva.
- El viento impacta solo en la mitad del espejo (10 de los 20 [cm] de ancho), suponiendo que la otra mitad es bloqueada por los espejos contiguos. Si el viento impacta en toda la superficie, la fuerza de arrastre generado en una mitad se compensa con la fuerza generada en la otra mitad, anulando el torque producido.
- La racha máxima de viento medido en la estación del Aeródromo de Rodelillo en la ciudad de Viña del Mar, Valparaíso, Chile es de 55,6 [km/h] para el año 2016. [33]

Las propiedades del aire a 20 °C son entregadas por [32]:

- Densidad: $\rho = 1,21 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
- Viscosidad dinámica: $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \right]$
- Viscosidad cinemática: $\nu = 1,50 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

Por medio de la ecuación (41) se puede determinar que el número de Reynolds tiene un valor de 18584, lo que valida la utilización de la Ilustración 42 para determinar el coeficiente de arrastre (C_D). Al tomar una relación de aspecto de 600 (3 [m] / 5 [mm]), se puede extrapolar C_D a un valor cercano 2 (cuando la relación de aspecto tiende a infinito). Mediante la ecuación (40) es posible determinar que la fuerza de arrastre (F_D) tiene un valor de 173,2 [N], la cual, aplicada en el centro de la mitad del espejo, genera un torque (τ) de 8,7 [N m].

Considerando, por tanto, el torque máximo producido por fricción y viento, es posible corroborar la elección del motor dado que puede soportar un torque mayor al que se pudiese ejercer sobre él.

9.5 PRECISIÓN ANGULAR

Existen dos métodos para realizar el seguimiento solar: a través de las ecuaciones de movimiento solar, las cuales se programan previamente y conllevan un error que podrían ser importantes si no se toman las consideraciones adecuadas, o a través del análisis instantáneo y real de la dirección de los rayos solares por medio de algún sistema de sensores. Esta última alternativa aumenta los costos del sistema y disminuye la simplicidad de la electrónica que se pretende plantear en este banco de pruebas. Por lo tanto, la opción a desarrollar en adelante es la utilización de las ecuaciones establecidas en la sección 4.

Como se dio a conocer en la sección 8.7, una de las desventajas del concentrador solar Fresnel frente al concentrador cilindro parabólico es que requiere de una mayor precisión de seguimiento para lograr concentrar la radiación en el receptor. Esto se debe a que la posición angular de un concentrador PTC se rige netamente por el ángulo de incidencia transversal del sol, mientras que la posición angular de los espejos en un concentrador Fresnel se rige, además, por la posición del espejo en el arreglo, según muestra la ecuación (11). Se toma el día 22 de septiembre (equinoccio de primavera) para realizar una simulación con Visual Basic (Excel) del comportamiento angular, desde la salida hasta la puesta del sol, para dos de los espejos del concentrador Fresnel diseñado (central y externo del lado Este del arreglo) y para un concentrador PTC (Ilustración 43). Resulta que mientras un concentrador PTC debe recorrer unos 180° durante un día de operación, los espejos de un Fresnel recorren un rango de 90° en el mismo tiempo. Es decir, para un mismo cambio en el tiempo, el concentrador Fresnel debe tener un cambio angular más pequeño.

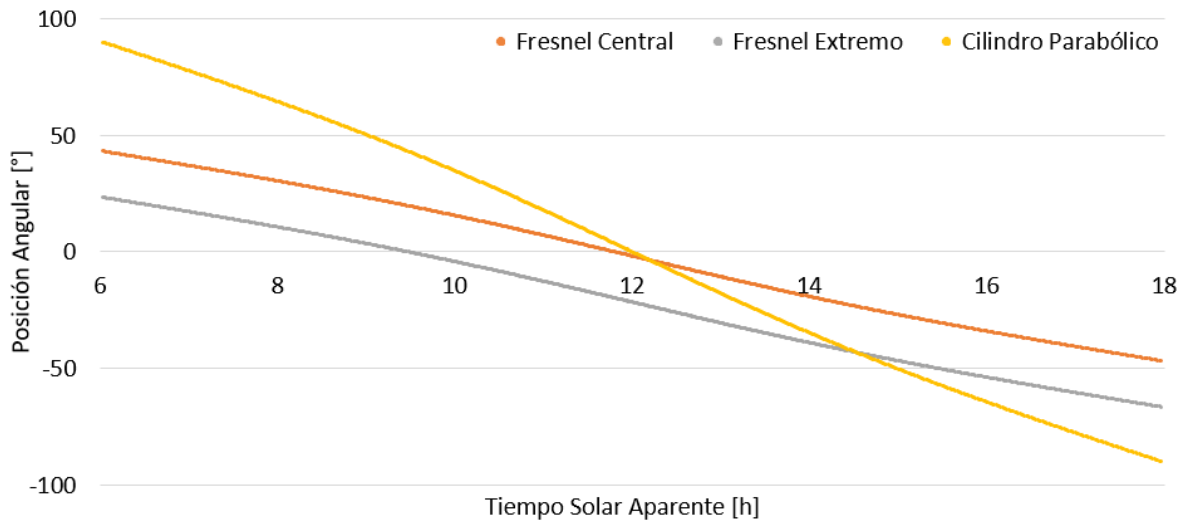


Ilustración 43: Simulación de movimiento angular de un concentrador Fresnel (ideal) y un concentrador Cilindro Parabólico.

9.5.1 CASO IDEAL

Para simplificar los cálculos, en un principio se establece el caso ideal considerando que no existe desplazamiento del eje de giro en los espejos. Es decir, que los espejos giran en torno a su centro de masa. Sin embargo, en el diseño realizado el eje de giro se encuentra desplazado al centro de masa del conjunto espejo-soporte para disminuir el torque sobre el motor.

El receptor fue diseñado con un ancho de apertura (W_r) de 300 [mm], mientras que el ancho de cada espejo (W) es solo de 200 [mm]. Si se toma en cuenta la inclinación del espejo, el “ancho de radiación reflejada” (W_R) en el receptor puede ser mayor o menor a W dependiendo de la posición del espejo y del momento del día (Ilustración 44). Por medio de un análisis geométrico se determinó que el ancho máximo de la radiación reflejada por un espejo sobre el receptor está dado cuando los rayos incidentes se alinean con los reflejados. Hay que notar que en este instante el receptor sombreará completamente el espejo analizado.

Por ejemplo, para el diseño realizado se obtuvo un ancho máximo en los espejos más externos, debido al mayor ángulo que forman con el receptor, obteniendo un ancho de la reflexión de 274 [mm] (esto se relaciona con lo visto en la sección 5.2). Por lo tanto, la holgura disponible en el receptor para la desviación de la radiación por otros factores es de 26 [mm].

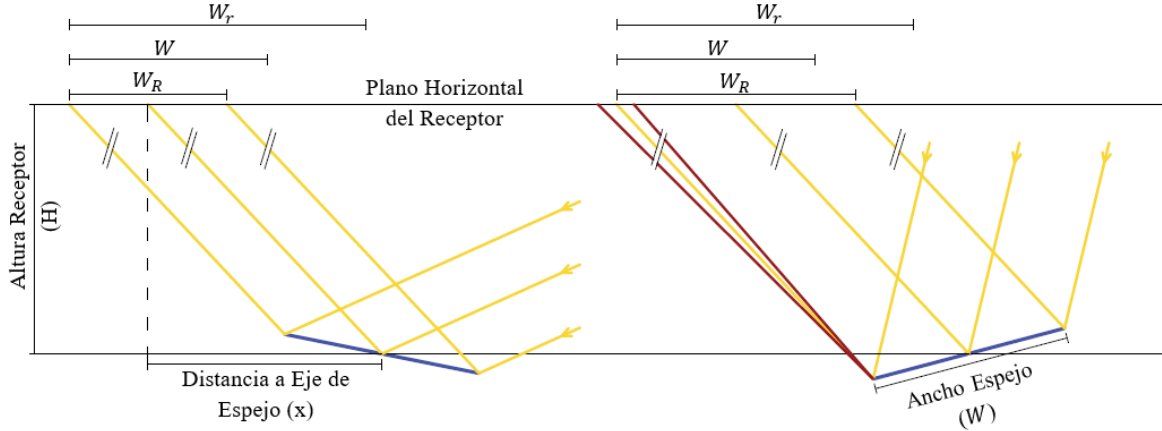


Ilustración 44: Variación del ancho de la radiación reflejada según el momento del día. En rojo se muestra el efecto del ángulo que subtiende el sol.

El cálculo para determinar la sección de la radiación reflejada (W_R) en cada momento incluye el ancho del espejo (W), la inclinación del espejo (β) y el ángulo de incidencia transversal de la radiación solar (ρ_t).

$$W_R = \frac{W \cdot \tan(90 + \rho_t + \beta)}{(\tan(90 + \rho_t + \beta) + \tan \beta) \cdot \cos \beta} \quad (42)$$

Si bien el ancho máximo planteado no es factible, ya que en ese momento el receptor bloquea la radiación solar incidente, se toma este valor de referencia para analizar los efectos producidos por el giro del motor y por el movimiento del sol.

Por otro lado, la divergencia de la radiación causada por el ángulo que subtiende el sol (sección 4) también tiene mayores efectos en los espejos más lejanos al receptor, y se traduce en un aumento de la sección requerida de unos 18 [mm] en cada extremo. Sin embargo, la densidad energética perdida por esta causa es despreciable, ya que es solo una fracción de la radiación que incide en los últimos 18 [mm] de los extremos de los espejos.

A lo largo del día, la radiación reflejada en el receptor se desplaza de forma continua debido al movimiento solar en dirección Este, la cual se compensa por un movimiento discreto en dirección Oeste causado por el giro por pasos del motor, lo que impide que la radiación reflejada escape del receptor. Para obtener la distancia que se desplaza el reflejo de la radiación al dar un paso del motor, se realiza el procedimiento planteado a continuación:

Procedimiento 1

1. Calcular ρ_t de las ecuaciones planteadas en la sección 4.
2. Calcular φ para cada uno de los espejos según la ecuación (12).
3. Obtener la inclinación de cada espejo (β) por medio de la ecuación (11).
4. Sumarle a β el movimiento angular del motor (por ejemplo, 0,12°).
5. Recalcular φ considerando la nueva inclinación.
6. Despejar la nueva posición horizontal de cada espejo (x) de la ecuación (12).

La distancia que se desplaza la radiación reflejada en el receptor depende de la posición del espejo, siendo mayor en los espejos más alejados del centro del arreglo. El desplazamiento es de unos 15,8 [mm] para los espejos externos y 8,4 [mm] para los internos o centrales, utilizando una resolución del motor de 0,12° por paso. El desplazamiento es medido con respecto al rayo que se refleja desde el centro del espejo y es independiente de la posición del sol. Al mismo tiempo, el cambio en la inclinación del espejo produce variaciones despreciables de W_R .

Considerando que el movimiento del motor puede desplazar hasta aproximadamente 16 [mm] la reflexión de la radiación en el receptor, se busca que el movimiento del espejo se produzca cuando la radiación reflejada por el centro del espejo esté a una distancia de 8 [mm] del centro del receptor para minimizar el desfase entre ellos.

En conclusión, considerando que el máximo ancho de la radiación reflejada es de 274 [mm] y que un motor con resolución de 0,12° por paso genera un desfase máximo de 16 [mm], se obtiene que el ancho mínimo requerido para el receptor es de 290 [mm], por lo que con los 300 [mm] planteados en el diseño es suficiente y deja espacio para contrarrestar errores generados en la construcción del concentrador y desviaciones provocadas por θ_m y errores en las ecuaciones que modelan el movimiento solar (menores a 2,6 [mm] por lado). De igual forma, se hace innecesaria la disminución electrónica de la resolución del motor, manteniendo el torque máximo.

Sin embargo, saber cuánto se desvía la radiación reflejada en el receptor sirve solo para el proceso de diseño del concentrador. En el caso de la operación, el dato que importa es cuándo se debe realizar el movimiento del espejo. Para esto, se realiza un análisis angular independiente del anterior, para el cual es necesario diferenciar la inclinación ideal del espejo (β_i) de la inclinación real (β_r). β_i es la inclinación necesaria que logra que la radiación que incide en el centro del espejo se refleje justo en el centro del receptor, pero como se mostró anteriormente, esta posición no es factible mantenerla en el tiempo dado el movimiento discreto del motor, por lo que se define el β_r como el ángulo de inclinación permitido por el motor, donde se asume que el espejo tiene un montaje perfectamente horizontal ($\beta = 0^\circ$) lo que definirá en un principio la posición de partida.

Por otro lado, la cantidad de pasos que debe dar el motor para llegar de una inclinación β_1 a una β_2 , se define por medio de la siguiente ecuación:

$$pasos = \frac{\beta_2 - \beta_1}{0,12} \quad (43)$$

En donde el valor de 0,12 corresponde a la resolución del motor. Tomando en cuenta que el resultado anterior es un número decimal, se establece el criterio de truncar el número para determinar cuándo dar efectivamente un paso.

El siguiente procedimiento se basa en el cálculo reiterativo de β_i dado por la ecuación (11), el cual corresponderá también al proceso realizado por Arduino para controlar el motor de cada uno de los espejos. En Arduino se utiliza el segundo como unidad mínima de tiempo, por lo que el procedimiento es el que se establece a continuación:

Procedimiento 2

1. Colocar el espejo en una posición inicial conocida, la cual será establecida por un sensor. Esta posición define el β_r límite del sistema.
2. Calcular β_i de cada motor en base a la hora en que se quiera poner en marcha el concentrador.
3. Girar los motores una cantidad de pasos definida por el truncamiento del número obtenido en la ecuación (43), considerando las inclinaciones establecidas en los pasos anteriores.
4. Calcular reiteradamente β_i hasta que tenga un desfase de $-0,06^\circ$ con la primera inclinación determinada (β_{r0}) (en la primera iteración se considera la mitad del desfase normal para dar un paso del motor). En este punto, el reflejo de la radiación se encontrará en uno de sus extremos de diseño.
5. Se da un paso en el motor, definiendo un nuevo valor de β_r , lo que desplaza el reflejo de la radiación hasta el extremo opuesto de diseño. En este punto β_i queda desplazado en $+0,06^\circ$ a β_r .
6. Calcular β_i hasta que tenga un desfase de $-0,18^\circ$ (medio desfase inicial más un desfase completo) con β_{r0} (o de $-0,06^\circ$ con β_r).
7. Se aplica un nuevo paso del motor, modificándose el valor de β_r . Nuevamente β_i queda desplazado en $+0,06^\circ$ a β_r .
8. Se repiten los pasos 6 y 7 aumentando en un desfase a la vez: $-0,30^\circ$, $-0,42^\circ$, $-0,54^\circ$, etc.

Dado que en un concentrador Fresnel los espejos tienen un movimiento igual y sincronizado (sección 8.5), se realizarán los cálculos solo para un espejo y el movimiento se hace extensivo al resto.

Para utilizarlo durante un día completo, el concentrador se pone en marcha cuando $\rho_t = -90^\circ$ para la salida del sol por el horizonte, valor que aumenta, llegando a 0° en el medio día solar y a $+90^\circ$ para la puesta de sol.

En base al procedimiento anterior, la Ilustración 45 muestra el tiempo entre cada paso del motor (período), el cual es variable a lo largo del día y depende del día del año. Se realizó la simulación para los días 20 de junio, 22 de septiembre y 22 de diciembre, que corresponden al solsticio de invierno, equinoccio de primavera y solsticio de verano, respectivamente. Los períodos más extremos son de 34 [s], dados en el solsticio de invierno, y 74 [s] durante el solsticio de verano. Es importante notar, que independiente de la magnitud del período, la cantidad de pasos que debe dar el motor durante el día es constante a lo largo del año e igual para todos los espejos, y corresponde 751 pasos para el concentrador diseñado, los cuales se traducen en un rango angular de $90,12^\circ$, que coincide con los resultados mostrados en la Ilustración 43.

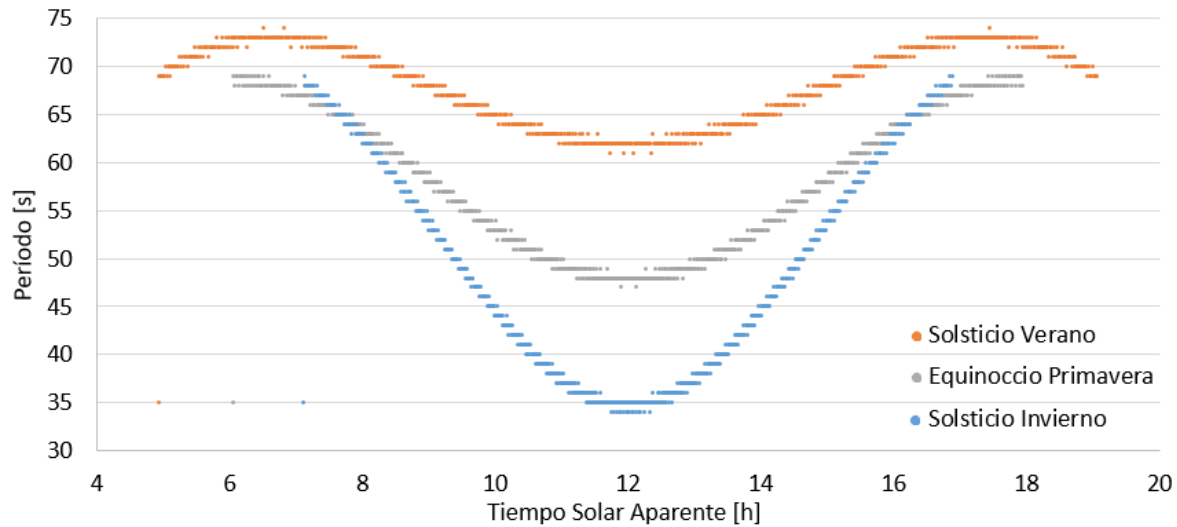


Ilustración 45: Período entre cada paso de los motores para un concentrador ideal.

Los tres puntos en la esquina inferior izquierda representan el período del primer paso, el cual es de la mitad del tiempo debido a que el espejo se sincroniza apuntando justo al centro del receptor, por lo que solo recorre medio rango.

Si fuese necesario un aumento del período de paso del motor se tendría que pensar en disminuir electrónicamente la resolución para evitar que la radiación se escape por los laterales del receptor.

El resultado simplifica bastante la programación del código en Arduino, ya que solo se debe monitorear la situación de uno de los espejos, y cuando este requiera girar un paso para mantener el reflejo centrado en el receptor será el mismo momento en que cualquiera de los espejos del arreglo también deba girar. Por lo que, los cálculos realizados sobre un espejo rigen el funcionamiento de todo el arreglo. Esto representa el caso ideal.

9.5.2 CASO DE DISEÑO

Dado que el diseño establecido considera el desplazamiento del eje de giro (Ilustración 22), para poder utilizar el modelo anterior se debe utilizar un proceso iterativo, ya que se crea una dependencia circular entre φ y β para un ángulo de incidencia transversal (ρ_t) determinado. El procedimiento para calcular la inclinación (β) para un espejo en particular, se detalla a continuación.

Procedimiento 3

1. Determinar φ a partir de la ecuación (12).
2. Calcular β a partir del ángulo obtenido en el punto anterior y ρ_t . Este ángulo coincide con el calculado sin considerar el desplazamiento y corresponde a la primera aproximación.

3. Utilizar las ecuaciones (15) y (16) para obtener los desplazamientos x_n e y_n respectivamente. Este desplazamiento modifica el ángulo φ calculado previamente.
4. Calcular φ corrigiendo la posición del eje del espejo con los desplazamientos obtenidos en el punto anterior (ecuación (17)).
5. Recalcular β a partir del nuevo φ y el ρ_t establecido en un principio.
6. Repetir los pasos 3, 4 y 5 hasta que la diferencia de la nueva inclinación (β) con la anterior sea menor a la mitad de la resolución del motor ($0,12^\circ$). Cuando esto sucede, la iteración ya no representa una modificación significativa del ángulo de inclinación.

Se realizó la simulación de la variación del cambio en la inclinación (β) utilizando el método anterior para todos los espejos en tres días del año (solsticio de verano e invierno y equinoccio de primavera). Se determinó que solamente la primera iteración era significativa, con un valor máximo de variación de $0,1341^\circ$ en los tres casos. La variación máxima del ángulo de inclinación obtenida para la segunda iteración es de $0,000264^\circ$ en los tres casos, lo que la hace despreciable frente a los $0,12^\circ$ de resolución del motor.

Al igual que en la Ilustración 43, se realizó una simulación en Visual Basic del movimiento angular de los espejos considerando el desplazamiento del eje de giro. El procedimiento es análogo al descrito para el caso ideal (Procedimiento 2), pero calculando la inclinación de los espejos en base al Procedimiento 3, descrito anteriormente. Fueron simulados los dos espejos centrales y los dos externos del arreglo para los 3 días anteriormente señalados (solsticios y equinoccio).

Si bien, gráficamente no existen diferencias apreciables con los espejos de Fresnel simulados en la Ilustración 43, al revisar en detalle los datos se pueden identificar importantes diferencias con el caso ideal:

- La cantidad de pasos que debe dar el motor durante un día es variable para cada espejo del arreglo y aparentemente independiente del día. Para el espejo central Oeste se obtuvieron 748 pasos, mientras que para el resto se deben realizar 749, para los tres días analizados (751 pasos para el caso ideal).
- El momento en que un motor debe girar un paso y el período entre pasos, son variable para cada uno de los espejos del arreglo y dependen tanto de la posición del espejo como del día analizado (en el caso ideal solo depende del día analizado).

Para validar estos resultados, se busca confirmar que la radiación de cada espejo esté incidiendo dentro del receptor en todo momento, comparando la distancia horizontal efectiva del centro del espejo al centro del receptor con el reflejo producido por el centro del espejo en el receptor al momento de dar un paso del motor. Esta distancia debiese coincidir aproximadamente con la mitad de la distancia que se desplaza el reflejo del receptor al dar un paso del motor suponiendo el caso ideal en que el centro del espejo coincide con el eje de giro, la cual fue determinada en la sección 9.5.1 (Procedimiento 1). Este dato se obtiene a partir del ángulo de incidencia transversal del sol y de la inclinación del espejo luego de dar el paso del motor.

Para obtener la distancia real entre el eje del espejo y el eje del motor, se utiliza, la ecuación (15) que entrega el desfase en el eje x (x_n) del centro del espejo al centro del eje de giro para una

inclinación determinada. Este valor se suma a la posición (x) inicialmente establecida en el caso ideal para corregirla estableciendo la distancia real entre el centro del espejo y el centro del receptor (x_{real}).

Por otro lado, se utiliza la ecuación (16) para determinar el desfase en el eje y (y_n) y luego corregir la altura H_r . Además, se determina el ángulo φ de la ecuación (11) para una inclinación y ángulo de incidencia establecidos. La altura corregida (H_{corr}) y el ángulo φ obtenidos, son ingresados en la ecuación (17) de donde se despeja la distancia x_{corr} que representa la distancia a la que impacta la radiación reflejada por el centro del espejo sobre el receptor, llamada distancia reflejada ($x_{reflejada}$).

La diferencia entre $x_{reflejada}$ y x_{real} es la desviación de la radiación reflejada por el centro del espejo en el centro del receptor luego de dar un paso del motor. Se realizó la simulación para cada uno de los pasos dados por los cuatro espejos analizados durante los tres días definidos. La agrupación de los resultados obtenidos se muestra en la siguiente ilustración.

	Espejo Externo Oeste	Espejo Central Oeste	Espejo Central Este	Espejo Externo Este
Máximo	7,7	4,2	4,2	7,9
Mínimo	6,8	3,7	3,8	7,1
Promedio	7,5	4,1	4,1	7,7
Desviación Estandar	0,099	0,057	0,056	0,107

Ilustración 46: Valores agrupados de la desviación del reflejo del centro del espejo en el receptor.

La distancia que se desplaza la radiación reflejada en el receptor al dar un paso del motor determinada en la sección anterior para un caso ideal es de 15,8 [mm] para los espejos externos y 8,4 [mm] para los internos. Estos valores son muy similares al doble de los valores promedio obtenidos para cada espejo en la Ilustración 46, cuya variación se explica probablemente por el desplazamiento del eje de giro. Además, analizando la desviación estándar y los valores extremos se puede determinar que no existe una variación muy grande de los datos, por lo que es posible validar las diferencias con el caso ideal establecidas anteriormente.

Que la cantidad de pasos y el período entre ellos sean diferentes para cada espejo del arreglo, hace más compleja la programación de los motores, haciendo que Arduino deba calcular a cada instante los parámetros que establece el Procedimiento 2 para cada uno de los 16 espejos, y así, determinan su movimiento independiente. El código y montaje de componentes relacionados con el controlador se presenta en detalle en los anexos. El código presentado está optimizado para el montaje de un prototipo presentado en la sección siguiente. Solo algunos parámetros deben cambiarse para generalizar su aplicación a las dimensiones reales de diseño.

10 VALIDACIÓN

El diseño planteado en la sección anterior es plasmado en una serie de planos necesarios para la fabricación de piezas y ensamble del concentrador, los cuales se pueden observar en los anexos. Los planos se clasifican en tres diferentes categorías, las que se detallan a continuación:

Planos de Corte: Debido a que uno de los objetivos es diseñar un concentrador a partir de materiales de fácil disponibilidad, se utilizan para varias de las piezas perfiles de acero que se encuentran en el mercado en un largo estándar de 6 metros. Por otro lado, otro de los objetivos es disminuir los costos de fabricación, por lo que los planos de corte indican las piezas y las cantidades que se pueden obtener de un perfil determinado, minimizando los sobrantes de material y evitando comprar más perfiles de los necesarios, disminuyendo los costos del concentrador. Para el diseño planteado del concentrador se utilizan 8 planos de corte.

Planos de Piezas: Existe una serie de piezas que deben ser mecanizadas de diversas formas a partir de materiales en bruto, como tubos rígidos, planchas o los cortes de los perfiles dados en los planos anteriores. Para esto, los planos de piezas muestran todos los mecanizados y sus respectivas dimensiones a realizar en las piezas que los necesiten, como perforaciones, cortes o todo proceso de conformación que implique o no arranque de viruta. Para el diseño planteado del concentrador se utilizan 26 planos de piezas.

Planos de Ensamble: Ya con todas las piezas fabricadas, se requieren los planos de ensamble para establecer un orden para unirlos entre sí y establecer el modo en que se realiza la unión, el cual puede ser mediante de soldaduras, pernos, seguros, pegamentos o simplemente apoyada. Para el diseño planteado del concentrador se utilizan 18 planos de ensamble.

Tanto en los planos de corte como de piezas se detalla el material utilizado para la fabricación. Además, en todos los planos se indican adicionalmente la cantidad de unidades a producir y la escala de tamaño utilizada de acuerdo con el tamaño de la hoja seleccionado.

Para lograr validar la programación del motor y corroborar la teoría planteada a lo largo del informe, se acota la construcción a una prueba de concepto de los módulos solares, para la cual se realiza la construcción de un módulo para observar su funcionamiento a lo largo de un día. Por un lado, se construye el módulo representado de la Ilustración 38, donde el espejo es pegado con silicona neutra y con adhesivo de montaje epoxy sobre el soporte, al cual se le suelda una tapa en cada extremo. Una tapa idéntica es soldada a los ejes para luego unirse entre sí mediante pernos, de tal forma de facilitar el posterior desmontaje.

Por otro lado, se construyen los soportes (“riel guía superior” en planos) de ambos ejes del módulo para lograr ensamblarlos como se muestra en la Ilustración 36. Es necesario darles a los soportes una altura mayor a la de diseño para evitar la interferencia del espejo con el piso al rotar, dado que en el modelo diseñado se cuenta con una altura al piso mayor, dada por la estructura. Sobre los soportes en forma de “L” se suelda un perfil rectangular, el cual se perfora de manera de poder introducirle una cañería y un buje, donde se apoyan posteriormente los ejes del módulo. Solo en el soporte donde se apoya el motor se hace necesaria la forma en “L”, ya que en la otra esquina es

posible fabricarla solo con una platina. Los soportes son fabricados a partir de unas platinas de 5 [mm] de espesor comparados a los 3 [mm] de diseño, sin embargo, esta variación no representa ninguna implicancia en la operación.

Los resultados obtenidos se muestran en la imagen a continuación junto con la comparación con el diseño real.

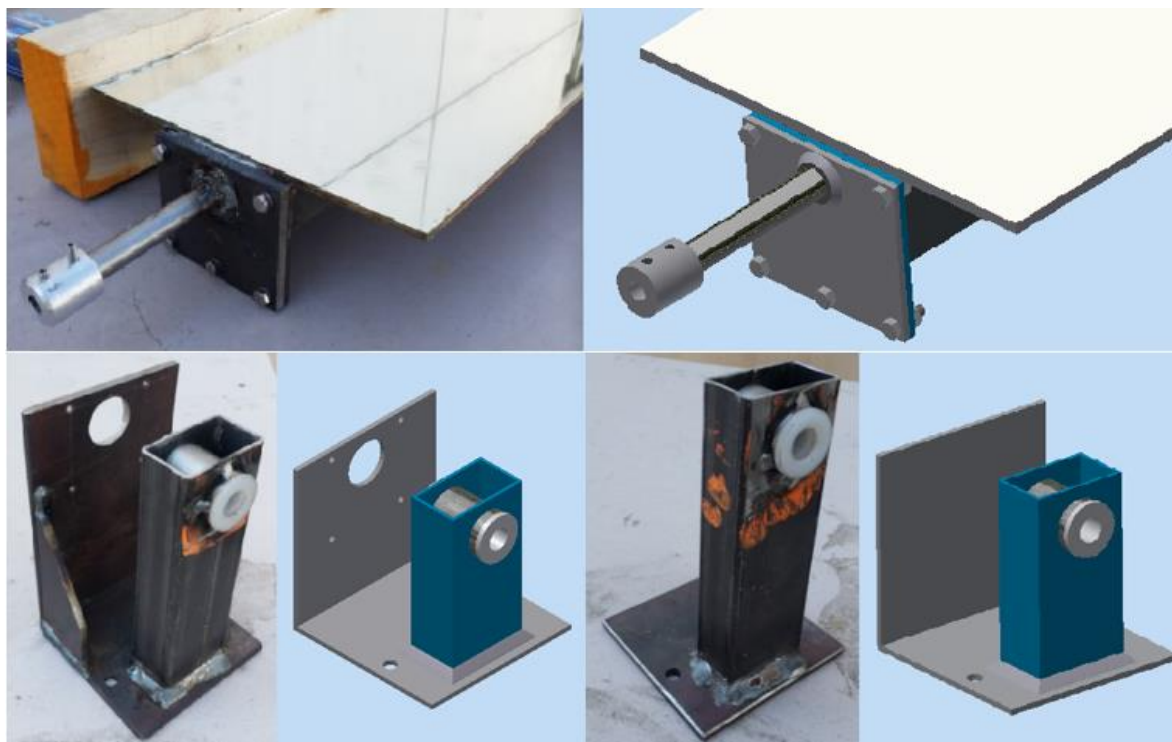


Ilustración 47: Construcción real y diseño teórico de un módulo del concentrador solar Fresnel. La imagen superior muestra el módulo con el espejo, eje y acople, y en la imagen inferior se muestra la construcción de los soportes donde se apoyan los ejes.

Las imperfecciones angulares encontradas al momento de ensamblar los componentes fabricados limitan el movimiento del motor y generan desviaciones importantes en la reflexión de rayos. Estas imperfecciones están dadas por la incertidumbre angular generadas en la soldadura, tanto en el montaje del eje como del soporte de éste. Para disminuir al máximo estas imperfecciones constructivas, se propone modificar la forma en que son ensambladas las piezas soldadas, buscando tener una superficie de contacto más grande entre las piezas y sistemas que reduzcan la necesidad de soldadura, de tal modo de asegurar la rectitud en los ángulos.

De cualquier manera, las imperfecciones angulares siempre estarán presentes a la hora de construir los módulos, generando esfuerzos mayores a los previstos en el proceso de diseño y desviaciones en la reflexión del sol. Por lo anterior, se hace necesaria la utilización de uniones de tipo flexibles en lugares específicos del módulo, de modo de dotar a la estructura un margen de tolerancia sin afectar en gran medida la precisión de la reflexión.

Finalmente, se opta por el montaje de un prototipo del módulo reflector primario que permita demostrar el correcto funcionamiento del seguimiento solar, de modo de evitar los problemas de

alineamiento encontrados en el módulo a tamaño real. Los componentes del prototipo se montan sobre una base de 76×40 [cm], en la cual se busca posicionar un módulo reflector y un receptor. El módulo se compone de un espejo de 10 [cm] de ancho y 30 [cm] de largo que se apoya en un perfil de aluminio al cual se le acoplan los ejes de giro mediante piezas impresas en 3D. Estos ejes de giro se apoyan mediante soportes a la base del prototipo y uno de ellos se conecta a través de un acople al motor paso a paso seleccionado. Adicionalmente, se monta un final de carrera a uno de los lados del módulo para identificar la posición en 90° del espejo, utilizada antes de comenzar su funcionamiento.

Por otro lado, se monta un receptor, que posee un ancho de 15 [cm] y largo de 76 [cm]. La distancia horizontal entre el eje de giro del módulo y el centro del receptor es de 24 [cm], mientras que la distancia vertical es de 100,5 [cm]. El montaje del prototipo se muestra en la ilustración siguiente, en donde el Norte, Sur, Este y Oeste se encuentran a la derecha, izquierda, abajo y arriba de la imagen derecha. Se puede apreciar que el reflector primario se encuentra montado en el borde izquierdo del prototipo (Sur), de tal manera de que el receptor se alargue hacia el Norte para captar la reflexión producida durante el amanecer y atardecer.

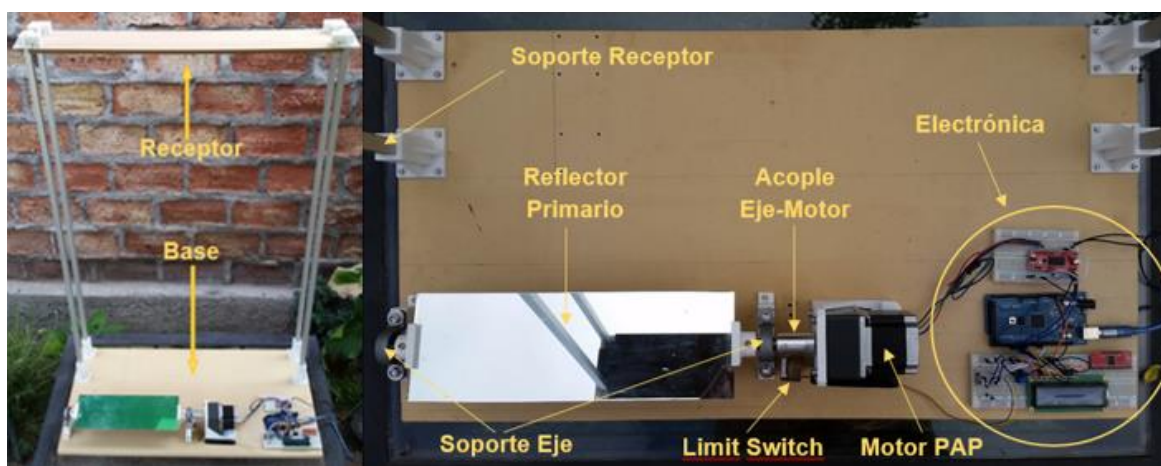


Ilustración 48: Montaje de Prototipo. A la izquierda el montaje general y a la derecha los componentes sobre la base.

El prototipo operó a lo largo de un día completo (19/11/2017, Providencia, Santiago, Chile) para determinar el comportamiento de la reflexión de la radiación sobre el receptor plano. Los resultados obtenidos se muestran consecutivamente en la Ilustración 49. Las imágenes son tomadas desde abajo del receptor, en donde el Norte, Sur, Este y Oeste están definidos hacia la derecha, izquierda, arriba y abajo de las imágenes, respectivamente.

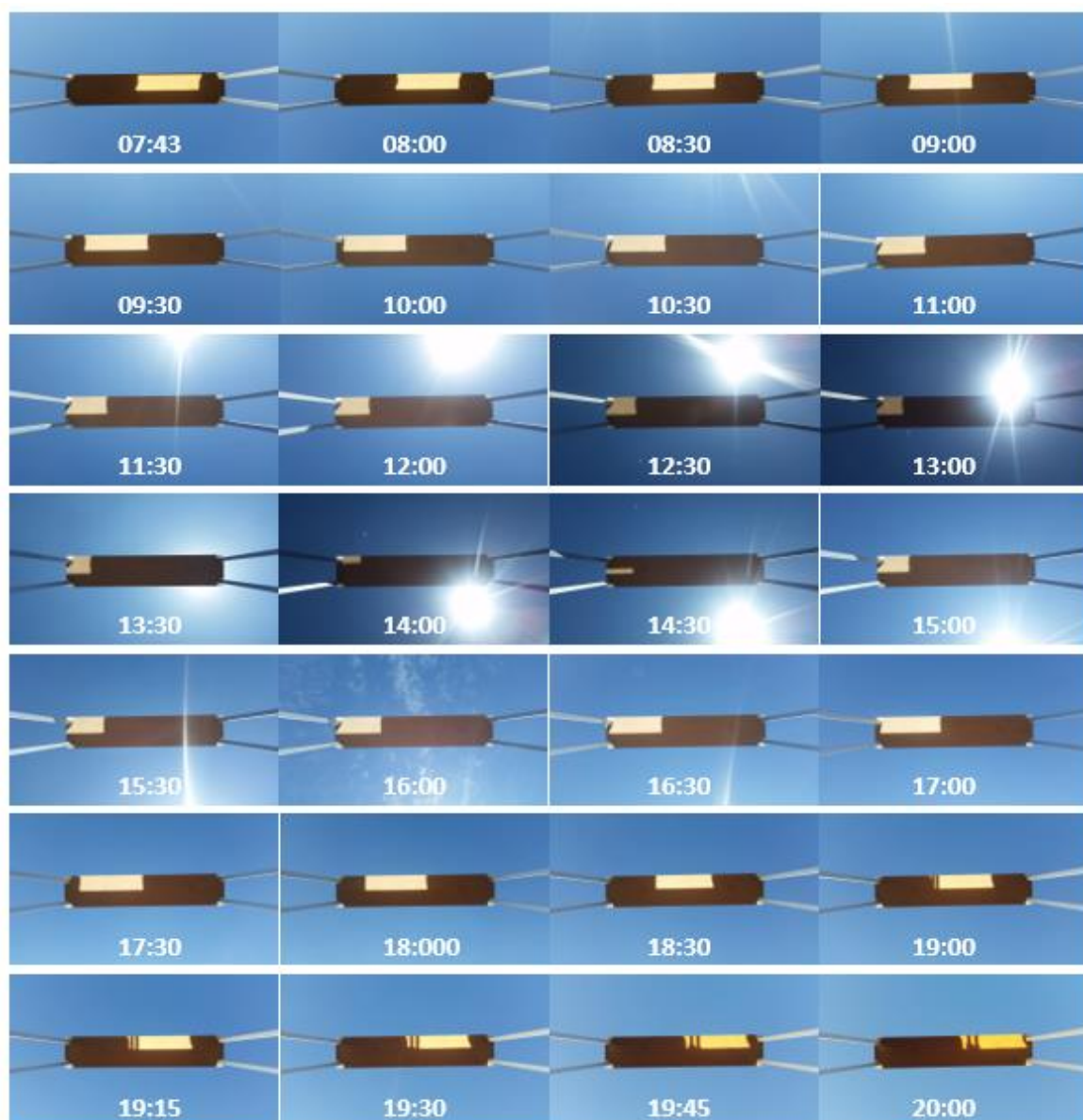


Ilustración 49: Secuencia de la reflexión sobre el receptor en prueba con el prototipo.

Lo primero que se puede apreciar es un movimiento Norte-Sur-Norte de la reflexión a lo largo del día, lo que concuerda con la simulación mostrada en la Ilustración 31 como un día similar al de solsticio de verano. Por otro lado, a pesar de que la reflexión no se encuentra centrada en el plano Este-Oeste del receptor (baja exactitud), es evidente que a lo largo del día la reflexión se mantiene estable sobre éste (alta precisión), lo que valida el modelamiento solar realizado, los cálculos de inclinación de los espejos y el programa que se encarga del movimiento del motor. Es posible, por tanto, que la desviación en el plano Este-Oeste se deba a un error en la determinación de la posición inicial del espejo, lo cual requiere de una corrección menor en el montaje para corregirse.

Adicionalmente, se puede observar en las fotografías tomadas a las 14:00 y 14:30 [hrs] los efectos del sombreado del receptor sobre el espejo primario (sección 8.6), mientras que en las

fotografías sacadas entre las 18:00 y las 20:00 [hrs] se observa el sombreamiento producido por la estructura que soporta el receptor sobre el espejo primario.

Finalmente, y con mayor dificultad, se puede observar la variación del ancho de la radiación reflejada (W_R) mostrada en la Ilustración 44. En la fotografía tomada a las 13:30 [hrs] se observa un W_R mayor que en las fotografías tomadas cerca del amanecer o atardecer. Tal como se mencionó en secciones anteriores, el W_R máximo se obtiene al mismo tiempo que el receptor sombrea el espejo, momento en el cual el espejo sería capaz de captar la máxima cantidad de radiación si no estuviese sombreado (sección 5.2).

Luego de realizar la corrección en la posición inicial del espejo, se puso en funcionamiento nuevamente el prototipo durante un día completo (21/11/2017, Providencia, Santiago, Chile) obteniendo resultados con mayor exactitud.

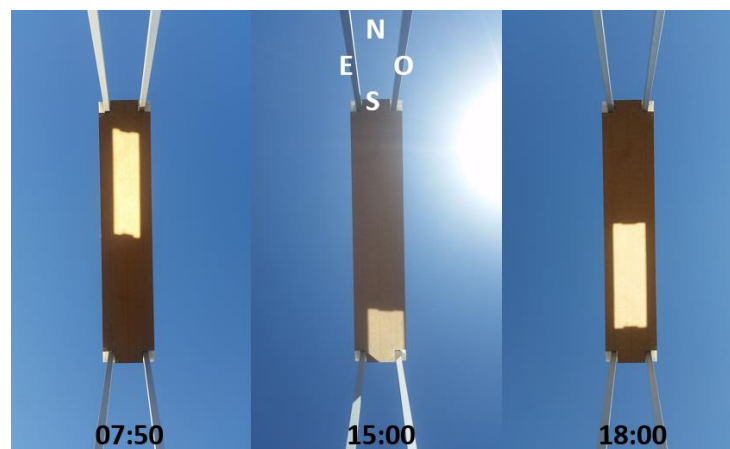


Ilustración 50: Fotografías a lo largo de un día de la radiación reflejada en el receptor del prototipo.

En este caso, se puede observar que la reflexión se encuentra completamente centrada durante el amanecer y atardecer, sin embargo, pasado medio día se desplaza levemente hacia el Oeste, en donde la radiación se desplaza unos 2 [cm] del centro del receptor. Este error puede deberse al error que entregan las ecuaciones que modelan el comportamiento de sol o a imprecisiones en la nivelación u orientación del prototipo. En cualquier caso, los resultados son aceptables y validan el funcionamiento para ser escalado al banco de pruebas diseñado y justifican, en parte, el ancho adicional entregado al receptor.

11 COSTOS

De acuerdo al modelo y dimensiones de diseño se realizó una cotización de los materiales utilizados para la construcción. Estos están divididos en 3 grandes áreas. La primera es la de perfiles, que representa el 12% de los costos totales, en donde se incluyen todos los perfiles utilizados tanto para la estructura del concentrador, los soportes de los espejos y los soportes del receptor. La segunda área de costos corresponde a todos los componentes que componen el concentrador, diferentes a los perfiles y de la electrónica, la que representa el 39% del costo total. Por último, se agrupan los componentes electrónicos utilizados para el control de los espejos, los que representan el 49% de los costos totales, como la placa Arduino y los motores paso a paso.

Perfiles	\$ 234.690
Componentes	\$ 775.248
Electrónica	\$ 977.970
Total	\$ 1.987.908

Ilustración 51: Costos estimados de construcción.

En cada una de estas áreas existen importantes oportunidades de reducción de costos. Por ejemplo, un 36% del costo de los perfiles esta dado solamente por los 16 soportes de los espejos. Este valor puede reducirse optando por la utilización de planchas de acero (láminas de metal) en vez de perfiles tubulares (sección 8.2), tal como se hizo para el diseño del receptor, manteniendo una baja deflexión, pero dificultando el montaje de los espejos y del eje de giro.

Por otro la, un 28% del costo de los componentes esta dado por los tubos de cobre, mientras que un 59% esta dado por los espejos, utilizados como reflectores primarios. En el caso de la cañería, es posible reemplazarla por la utilización de un tubo al vacío, el cual utiliza una lámina delgada de cobre dentro de un conjunto de vidrios. Utilizando un tubo al vacío se evita el uso de un vidrio en el receptor, el que representa el 3% del costo de los componentes, sin embargo, el tubo al vacío debe ser echo a la medida del receptor, lo que puede significar costos adicionales de importación. El costo de los espejos representa un 23% del costo total del concentrador, valor que es posible disminuir a la mitad si se reduce el espesor de 5 a 3 [mm], utilizando un soporte rígido en donde pueda apoyarse toda la base del espejo (como el mencionado en el párrafo anterior).

Finalmente, un importante 90% del costo de la electrónica esta dado solo por los 16 motores que controlan cada uno de los espejos, lo que se traduce en un 44% del costo total del concentrador. En este punto se puede optar por dos posibilidades para la reducción de costos. Una alternativa es la utilización de un solo motor para controlar todos los espejos, lo que trae una serie de consecuencias:

- Centrar el espejo en el eje de giro para que todos los módulos tengan el mismo movimiento angular.
- Aumento de torque generado por peso propio debido a posicionarlo fuera del centro de masa.

- Montaje más complejo que debe mover en el mismo instante todos los módulos, manteniendo la precisión entregada por el motor.
- Banco de pruebas pierde flexibilidad ya que, por ejemplo, impide la misma inclinación de los espejos para la limpieza o la utilización de una cantidad de módulos distinta a la total durante la operación.

La otra opción para reducir los costos de los motores es una reducción del tamaño de los motores, lo que depende del torque que puedan realizar los motores y del torque necesario para girar un módulo de acuerdo al diseño planteado. Esta opción permitiría mantener la flexibilidad que debe tener un banco de pruebas para analizar el comportamiento de un concentrador solar Fresnel pero con una reducción de costos posiblemente menor que en la primera alternativa.

El detalle de los costos de adquisición de cada área se muestra en los anexos.

Adicionalmente, para la construcción es importante tomar en cuenta tanto los costos de mano de obra como de mecanizado de piezas, los cuales, dependiendo del diseño, pueden llegar a ser importantes en los costos totales.

12 TRABAJO FUTURO

Finalmente, se plantean diversas alternativas para continuar el proyecto, mejorando y optimizando su funcionamiento.

- Agregar un módulo GPS al montaje electrónico para reducir el tiempo de puesta en marcha, con el cual se puede obtener la fecha, hora y ubicación exacta, información que requiere el programa para su funcionamiento.
- Generar una interface de usuario que permita la modificación de los parámetros variables para el banco de pruebas diseñado. Estos parámetros son: altura del receptor, espaciamiento de los espejos y numero de espejos. Además, entregar la opción de posicionar los espejos en inclinaciones determinadas para, por ejemplo, limpiarlos o protegerlos de condiciones climáticas.
- Para asegurar un correcto alineamiento durante el montaje y funcionamiento del concentrador diseñado, se plantea la utilización de acoples elásticos para la unión de ciertos componentes de los módulos. Es necesario analizar los efectos de esta flexibilidad del montaje en la precisión de la reflexión sobre el receptor.
- Analizar los efectos en la reflexión de un montaje con una nivelación u orientación diferentes a las óptimas para las que fueron diseñadas. Es útil tener esta información disponible debido a que en muchos casos es prácticamente imposible un montaje perfecto debido a la incertidumbre en la construcción o en la medición de estos parámetros.
- Dependiendo del torque disponible de los motores utilizados, es posible desconectarlos mientras no se encuentran en movimiento, logrando mantener la posición establecida sin consumir energía eléctrica. Se plantea la utilización de relés o transistores para desconectar la alimentación eléctrica o para conectar directamente los cables de una misma bobina de un motor paso a paso, lo que aumenta el torque del motor en comparación a una desconexión total.
- Analizar las ventajas y desventajas de la utilización de un motor para controlar todas las corridas de espejos versus la utilización de un motor por cada módulo. Si bien ambas opciones son analizadas a lo largo del documento, la elección dependerá de los objetivos específicos planteados para el concentrador Fresnel.
- Diseñar sistema hidráulico y de medición de temperatura, caudal, etc. para la operación del banco de pruebas.

13 ANEXOS

13.1 MONTAJE ELECTRÓNICO

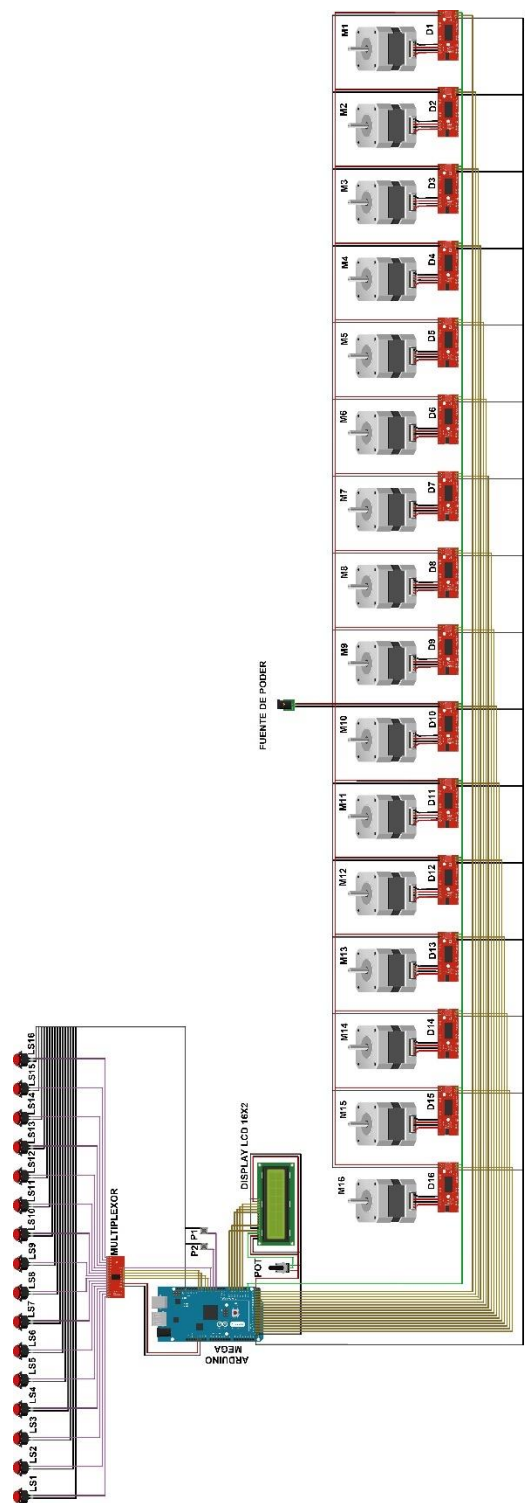


Ilustración 52: Diagrama de montaje general.

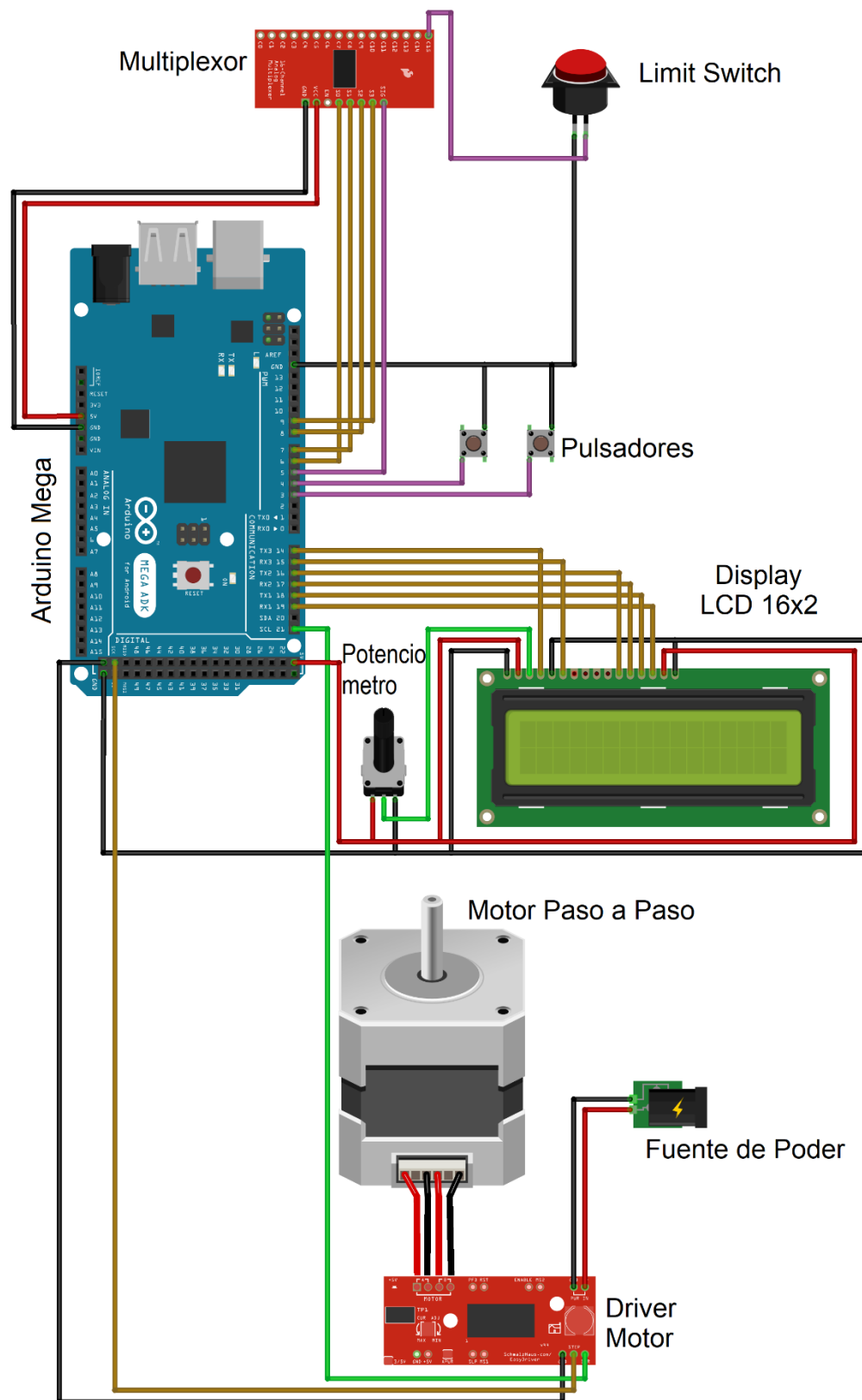


Ilustración 53: Detalle de diagrama de montaje.

13.2 CÓDIGO PROGRAMACIÓN (ARDUINO)

```
/*DEFINICION PINES
Display: D14, D15, D16, D17, D18, D19
Boton: D3, D4
Motor Dirección: D21
Motor Pulso: D22, D24, D26, D28, D30, D32, D34, D36, D38, D40, D42, D44, D46, D48, D50, D52
Boton Final de Carrera: D5
Multiplexor Finales de Carrera: D6, D7, D8, D9
*/

//Tiempo: Incluye la libreria para manejar el tiempo con facilidad
#include <Time.h>

//Display: Incluye la libreria para controlar la pantalla LCD
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(14, 15, 16, 17, 18, 19);
String S;    //Variable que guarda el texto del display
bool listo;  //Variable que decide si se pasa a la siguiente pantalla del display

//Pulsador: Define pines y variables para controlar los botones para navegar en la pantalla LCD
int boton1 = 3 ;
int boton2 = 4 ;
int estado1, estado2;

//Botones de fin de carrera: Define pin y variables relacionadas con el posicionamiento inicial de los espejos
int limit = 5;
int estadoLimit;
unsigned int S0, S1, S2, S3, k ; //Se utilizan para controlar la puerta o señal del multiplexor que se desea recibir. las variables "S" son las señales enviadas para conectar la puerta "k"

//Motor: Define pines y variables para el control de los motores
int sentido = 21, delayMotor = 3; //Es posible utilizar un delay de 2. Con un delay de 1 el motor no anda bien
int Motor = 22;

//Fecha //Fecha será posteriormente determinadas por GPS
int Mes[] = {0, 31, 59, 90, 120, 151, 181, 212, 243, 273, 304, 334}; //Son los días del año al comenzar un mes. Se utiliza para obtener la cantidad de días desde el primero de enero
int diaMin = 1, diaMax = 31, mesMin = 1, mesMax = 12, anoMin = 2017, anoMax = 2025; //Límite de variables (El año solo sirve para saber si es Bisiesto. No esta implementado en el codigo)
int dia, mes, ano;
String dia0, mes0;
float Dia;

//Hora //Hora será posteriormente determinadas por GPS
int horaMin = 6, horaMax = 21, minutoMin = 0, minutoMax = 59; //Límite de Variables
int hora, minuto, segundo, segundoant = 0;
```

```

String hora0, minuto0, segundo0;
time_t Horat;
float Hora;
float huso, husoMin = -4, husoMax = -3;    //Límite de Variables

//Movimiento
float Latitud = -33.4477, Longitud = -70.5577, Declinacion, F, ET;  // (Mi Casa: -33,4481,-70,5599
; Campus San Joaquín: -33.4908,-70.6189 ; Campus Viña: -33.0397,-71.4858)Latitud y Longitud
serán posteriormente determinadas por GPS
float Altura0 = 1.005, PosX0 = 0.24;    //La altura (Altura0) y la posición horizontal que depende
del espaciamiento (PosX0), debe ser variable para el usuario ya que depende de la configuración del
concentrador
float radio = 12.13, alpha = 90.0, xn, yn;
float PrecMotor = 0.121644;
const float pi = 3.1415926535;
float TSA, HoraSolar, Zenit, Azimut, Incidencia;
float Phi0, Phi, Inclination0 = 90, InclinationI;
int pasos, pasoadd;

int aumentosegundo = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  //Configuración Display
  lcd.begin(16, 2);    // Fijamos el numero de caracteres y filas

  //Configuración Pulsadores
  pinMode(boton1, INPUT_PULLUP); //Asigna el pin del boton como entrada utilizando resistencia
interna
  pinMode(boton2, INPUT_PULLUP); //Asigna el pin del boton como entrada utilizando resistencia
interna
  pinMode(limit, INPUT_PULLUP); //Asigna el pin del boton como entrada utilizando resistencia
interna

  //Configuración Motores
  pinMode(sentido, OUTPUT);
  digitalWrite(sentido,LOW);
  pinMode(Motor, OUTPUT);
  digitalWrite(Motor, LOW);

  //Aproximación inicial de ángulo Phi
  Phi0 = -(180.0/pi)*atan(PosX0/Altura0);
  //Setear los pasos en cero
  pasos=0;

  //CONFIGURACIÓN DE FECHA
  listo = false;
  dia = diaMin;
  mes = mesMin;

```

```

ano = anoMin;

while (listo == false){
  //Modifica DIA
  mostrarFecha (dia, mes, ano, "dia");
  delay(500);
  estado1 = HIGH;
  estado2 = HIGH;
  while (estado2 == HIGH){
    estado1 = digitalRead(boton1);
    if(estado1 == LOW){
      dia++;
      if (dia > diaMax){
        dia = diaMin;
      }
      mostrarFecha (dia, mes, ano, "dia");
      delay(250);
    }
    estado2 = digitalRead(boton2);
  }

  //Modifica MES
  mostrarFecha (dia, mes, ano, "mes");
  delay(500);
  estado1 = HIGH;
  estado2 = HIGH;
  while (estado2 == HIGH){
    estado1 = digitalRead(boton1);
    if(estado1 == LOW){
      mes++;
      if (mes > mesMax){
        mes = mesMin;
      }
      mostrarFecha (dia, mes, ano, "mes");
      delay(250);
    }
    estado2 = digitalRead(boton2);
  }

  //Modifica AÑO
  mostrarFecha (dia, mes, ano, "ano");
  delay(500);
  estado1 = HIGH;
  estado2 = HIGH;
  while (estado2 == HIGH){
    estado1 = digitalRead(boton1);
    if(estado1 == LOW){
      ano++;
      if (ano > anoMax){
        ano = anoMin;
      }
    }
  }
}

```

```

    mostrarFecha (dia, mes, ano, "ano");
    delay(250);
}
estado2 = digitalRead(boton2);
}

//PASO A SIGUIENTE VENTANA
mostrarFecha (dia, mes, ano, "ok");
delay(500);
estado1 = HIGH;
estado2 = HIGH;
while (estado2 == HIGH){
    estado1 = digitalRead(boton1);
    estado2 = digitalRead(boton2);
    if(estado1 == LOW){
        listo = true;
        estado2 = LOW;
    }
}
}
}
//*****

//CONFIGURACIÓN DE HORA
listo = false;
hora = horaMin;
minuto = minutoMin;

while (listo == false){
    //Modifica HORA
    mostrarHora (hora, minuto, "hora");
    delay(500);
    estado1 = HIGH;
    estado2 = HIGH;
    while (estado2 == HIGH){
        estado1 = digitalRead(boton1);
        if(estado1 == LOW){
            hora++;
            if (hora > horaMax){
                hora = horaMin;
            }
            mostrarHora (hora, minuto, "hora");
            delay(250);
        }
        estado2 = digitalRead(boton2);
    }

    //Modifica MINUTO
    mostrarHora (hora, minuto, "minuto");
    delay(500);
}

```

```

estado1 = HIGH;
estado2 = HIGH;
while (estado2 == HIGH){
  estado1 = digitalRead(boton1);
  if(estado1 == LOW){
    minuto++;
    if (minuto > minutoMax){
      minuto = minutoMin;
    }
    mostrarHora (hora, minuto, "minuto");
    delay(250);
  }
  estado2 = digitalRead(boton2);
}

//PASO A SIGUIENTE VENTANA
mostrarHora (hora, minuto, "ok");
delay(500);
estado1 = HIGH;
estado2 = HIGH;
while (estado2 == HIGH){
  estado1 = digitalRead(boton1);
  estado2 = digitalRead(boton2);
  if(estado1 == LOW){
    listo = true;
    estado2 = LOW;
  }
}
}
//*****

setTime(hora,minuto,00,dia,mes,ano);    // Setea la fecha y hora de Arduino según la información
recibida

//CONFIGURACIÓN DE HUSO HORARIO
listo = false;
huso = husoMin;

while (listo == false){
  //Modifica HUSO
  mostrarHuso (huso, "huso");
  delay(500);
  estado1 = HIGH;
  estado2 = HIGH;
  while (estado2 == HIGH){
    estado1 = digitalRead(boton1);
    if(estado1 == LOW){
      huso++;
      if (huso > husoMax){
        huso = husoMin;
      }
    }
  }
}

```

```

    mostrarHuso (huso, "huso");
    delay(250);
}
estado2 = digitalRead(boton2);
}

//PASO A SIGUIENTE VENTANA
mostrarHuso (huso, "ok");
delay(500);
estado1 = HIGH;
estado2 = HIGH;
while (estado2 == HIGH){
    estado1 = digitalRead(boton1);
    estado2 = digitalRead(boton2);
    if(estado1 == LOW){
        listo = true;
        estado2 = LOW;
    }
}
}
}
//*****

//CONFIGURACIÓN ANGULOS ESPEJOS (Procedimiento 2.1)
lcd.clear();
lcd.setCursor ( 0, 0 );    // posicionar fila 1
int contad = 1;
lcd.print("Angulo Motor " + String(contad));    //Muestra en display

digitalWrite(sentido,LOW); //Define un sentido de giro
estadoLimit = digitalRead(limit);

while (estadoLimit == HIGH){
    digitalWrite(Motor,HIGH); //El conjunto HIGH - LOW se traduce en 1 paso del motor
    delay(delayMotor);
    digitalWrite(Motor,LOW);
    delay(delayMotor);
    estadoLimit = digitalRead(limit);
}
//Espejos deberían quedar en un ángulo de -90°
//*****

//APROXIMACIÓN ÁNGULO ESPEJO (Procedimiento 2.2, 2.3 y 3)
lcd.clear();
lcd.setCursor ( 0, 0 );    // posicionar fila 1
lcd.print("Sincronizando...");    //Muestra en display

//Se establecen las variables válidas para todo el día de estudio
Dia = Mes[mes-1] + dia;
F = (Dia-1.0)*360.0/365.0;

```

```

ET          =      229.2*(0.000075+0.001868*cos((pi/180.0)*F)-0.032077*sin((pi/180.0)*F)-
0.014615*cos((pi/180.0)*2*F)-0.04089*sin((pi/180.0)*2*F));
Declinacion      =(180/pi)*(0.006918-0.399912*cos((pi/180.0)*F)+0.070257*sin((pi/180.0)*F)-
0.006758*cos((pi/180.0)*2*F)+0.000907*sin((pi/180.0)*2*F)-
0.002697*cos((pi/180.0)*3*F)+0.00148*sin((pi/180.0)*3*F));

```

```

//Se establecen las variables que dependen del momento del día
Horat = now();
Hora = hour(Horat) + (minute(Horat)/60.0) + (second(Horat)/3600.0);
TSA = Hora+(ET-4.0*((15.0*huso)-Longitud))/60.0;
HoraSolar = (TSA-12.0)*15.0;
Zenit
(180.0/pi)*acos(sin((pi/180.0)*Latitud)*sin((pi/180.0)*Declinacion)+cos((pi/180.0)*Latitud)*cos((
pi/180.0)*Declinacion)*cos((pi/180.0)*HoraSolar));
if (HoraSolar < 0){
    Azimut      =      -abs(180-(180.0/pi)*acos((cos((pi/180.0)*Zenit)*sin((pi/180.0)*Latitud)-
sin((pi/180.0)*Declinacion))/(sin((pi/180.0)*Zenit)*cos((pi/180.0)*Latitud))));
}
else{
    Azimut      =      abs(180-(180.0/pi)*acos((cos((pi/180.0)*Zenit)*sin((pi/180.0)*Latitud)-
sin((pi/180.0)*Declinacion))/(sin((pi/180.0)*Zenit)*cos((pi/180.0)*Latitud))));
}
Incidencia = (180.0/pi)*atan(sin((pi/180.0)*Zenit)*sin((pi/180.0)*Azimut)/cos((pi/180.0)*Zenit));

InclinacionI = (Phi0-Incidencia)/2.0;          //Es el ángulo inicial de cada espejo
/*Serial.print("InclinacionI ");
Serial.println(InclinacionI);*/
xn = radio*cos((pi/180.0)*(alpha-InclinacionI));
yn = radio*sin((pi/180.0)*(alpha-InclinacionI));
Phi = -(180.0/pi)*atan((PosX0+xn/1000)/(Altura0-yn/1000));
InclinacionI = (Phi-Incidencia)/2.0;

pasos = (Inclinacion0-InclinacionI)/PrecMotor;
for (int j = 1 ; j <= pasos ; j++){          //Da una cantidad de pasos aproximada a la necesaria
    digitalWrite(sentido,HIGH);              //Define un sentido de giro
    digitalWrite(Motor,HIGH);                //El conjunto HIGH - LOW se traduce en 1
paso del motor
    delay(delayMotor);
    digitalWrite(Motor,LOW);
    delay(delayMotor);
}
//*****

//Establece Hora en Pantalla
actualizacionPantalla ();
//*****
}

```

```

void loop() {

```

```

//Se establecen las variables que dependen del momento del día
Horat = now();

//Evaluación de paso
Hora = hour(Horat) + (minute(Horat)/60.0) + (second(Horat)/3600.0);

TSA = Hora+(ET-4.0*((15.0*huso)-Longitud))/60.0;
HoraSolar = (TSA-12.0)*15.0;
Zenit =
(180.0/pi)*acos(sin((pi/180.0)*Latitud)*sin((pi/180.0)*Declinacion)+cos((pi/180.0)*Latitud)*cos((
pi/180.0)*Declinacion)*cos((pi/180.0)*HoraSolar));
if (HoraSolar < 0){
    Azimut = -abs(180-(180.0/pi)*acos((cos((pi/180.0)*Zenit)*sin((pi/180.0)*Latitud)-
sin((pi/180.0)*Declinacion))/(sin((pi/180.0)*Zenit)*cos((pi/180.0)*Latitud))));
}
else{
    Azimut = abs(180-(180.0/pi)*acos((cos((pi/180.0)*Zenit)*sin((pi/180.0)*Latitud)-
sin((pi/180.0)*Declinacion))/(sin((pi/180.0)*Zenit)*cos((pi/180.0)*Latitud))));
}
Incidencia = (180.0/pi)*atan(sin((pi/180.0)*Zenit)*sin((pi/180.0)*Azimut)/cos((pi/180.0)*Zenit));

InclinacionI = (Phi0-Incidencia)/2.0; //Es el ángulo inicial de cada espejo
xn = radio*cos((pi/180.0)*(alpha-InclinacionI));
yn = radio*sin((pi/180.0)*(alpha-InclinacionI));
Phi = -(180.0/pi)*atan((PosX0+xn/1000)/(Altura0-yn/1000));
InclinacionI = (Phi-Incidencia)/2.0;

if(Inclinacion0-InclinacionI > PrecMotor*(pasos + 1.0/2.0)){
    pasos++;
    Serial.print("paso ");
    digitalWrite(sentido,HIGH); //Define un sentido de giro
    digitalWrite(Motor,HIGH); //El conjunto HIGH - LOW se traduce en 1
    paso del motor
    delay(delayMotor);
    digitalWrite(Motor,LOW);
    delay(delayMotor);
}
//*****

//Actualiza la Pantalla cada segundo
if (second(Horat) != segundoant){
    actualizacionPantalla ();
}
segundoant = second(Horat);
//*****

//Modificación de pasos
if (Serial.available()>0){
    pasoadd = Serial.parseInt();
    Serial.println(pasoadd);
}

```

```

    if (pasoadd > 0) digitalWrite(sentido,HIGH);           //Define un sentido de
giro
    if (pasoadd < 0) digitalWrite(sentido,LOW);           //Define un sentido de
giro
    for (int j = 1 ; j <= abs(pasoadd) ; j++){           //Da una cantidad de pasos aproximada a la necesaria
        Serial.print(j);
        digitalWrite(Motor,HIGH);                       //El conjunto HIGH - LOW se traduce en 1
paso del motor
        delay(delayMotor);
        digitalWrite(Motor,LOW);
        delay(delayMotor);
    }
    Serial.println();
}
//*****
}

```

```

void mostrarFecha (int dia, int mes, int ano, String var){
    lcd.clear();
    dia0 = String(dia);
    mes0 = String(mes);
    if (dia < 10) dia0 = "0" + String(dia);
    if (mes < 10) mes0 = "0" + String(mes);
    lcd.setCursor ( 0, 0 );    // posicionar columna 0, fila 0 (primera fila)
    lcd.print("Fecha");        //Muestra en display
    lcd.setCursor ( 0, 1 );    // posicionar columna 0, fila 1 (segunda fila)
    if (var == "dia") S = ">" + dia0 + "/" + mes0 + "/" + String(ano) + " OK"; //Convierte en texto
    if (var == "mes") S = " " + dia0 + ">" + mes0 + "/" + String(ano) + " OK"; //Convierte en texto
    if (var == "ano") S = " " + dia0 + "/" + mes0 + ">" + String(ano) + " OK"; //Convierte en texto
    if (var == "ok") S = " " + dia0 + "/" + mes0 + "/" + String(ano) + ">OK"; //Convierte en texto
    lcd.print(S); //Muestra en display
}

```

```

void mostrarHora (int hora, int minuto, String var){
    lcd.clear();
    hora0 = String(hora);
    minuto0 = String(minuto);
    if (hora < 10) hora0 = "0" + String(hora);
    if (minuto < 10) minuto0 = "0" + String(minuto);
    lcd.setCursor ( 0, 0 );    // posicionar columna 0, fila 0 (primera fila)
    lcd.print("Hora");        //Muestra en display
    lcd.setCursor ( 0, 1 );    // posicionar columna 0, fila 1 (segunda fila)
    if (var == "hora") S = ">" + hora0 + ":" + minuto0 + " OK"; //Convierte en texto
    if (var == "minuto") S = " " + hora0 + ">" + minuto0 + " OK"; //Convierte en texto
    if (var == "ok") S = " " + hora0 + ":" + minuto0 + " >OK"; //Convierte en texto
    lcd.print(S); //Muestra en display
}

```

```

void mostrarHuso (int huso, String var){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor ( 0, 0 );    // posicionar columna 0, fila 0 (primera fila)
    lcd.print("Huso Horario");    //Muestra en display
    lcd.setCursor ( 0, 1 );    // posicionar columna 0, fila 1 (segunda fila)
    if (var == "huso") S = ">" + String(huso) + "      OK";    //Convierte en texto
    if (var == "ok") S = " " + String(huso) + "      >OK";    //Convierte en texto
    lcd.print(S);    //Muestra en display
}

```

```

void actualizacionPantalla (){
    //Actualiza la Pantalla cada segundo
    Horat = now();
    hora = hour(Horat);
    minuto = minute(Horat);
    segundo = second(Horat);
    hora0 = String(hora);
    minuto0 = String(minuto);
    segundo0 = String(segundo);
    if (hora < 10) hora0 = "0" + String(hora);
    if (minuto < 10) minuto0 = "0" + String(minuto);
    if (segundo < 10) segundo0 = "0" + String(segundo);
    S = hora0 + ":" + minuto0 + ":" + segundo0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor ( 0, 0 );    // posicionar columna 0, fila 0 (primera fila)
    lcd.print(S);    //Muestra en display
}

```

13.3 PLANOS DE CORTES

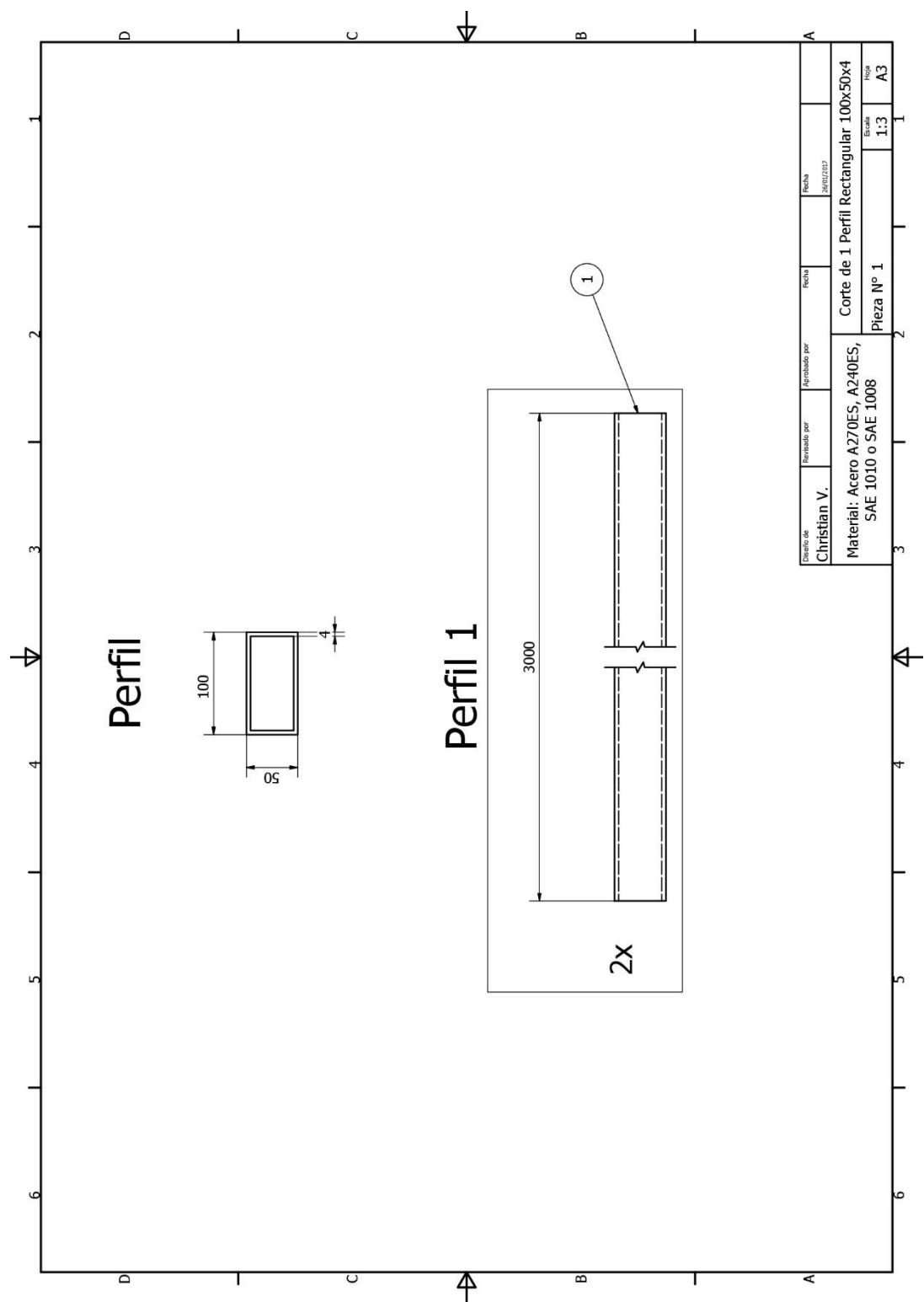


Ilustración 54: Plano de Corte de 1 Perfil Rectangular de 100x50x4.

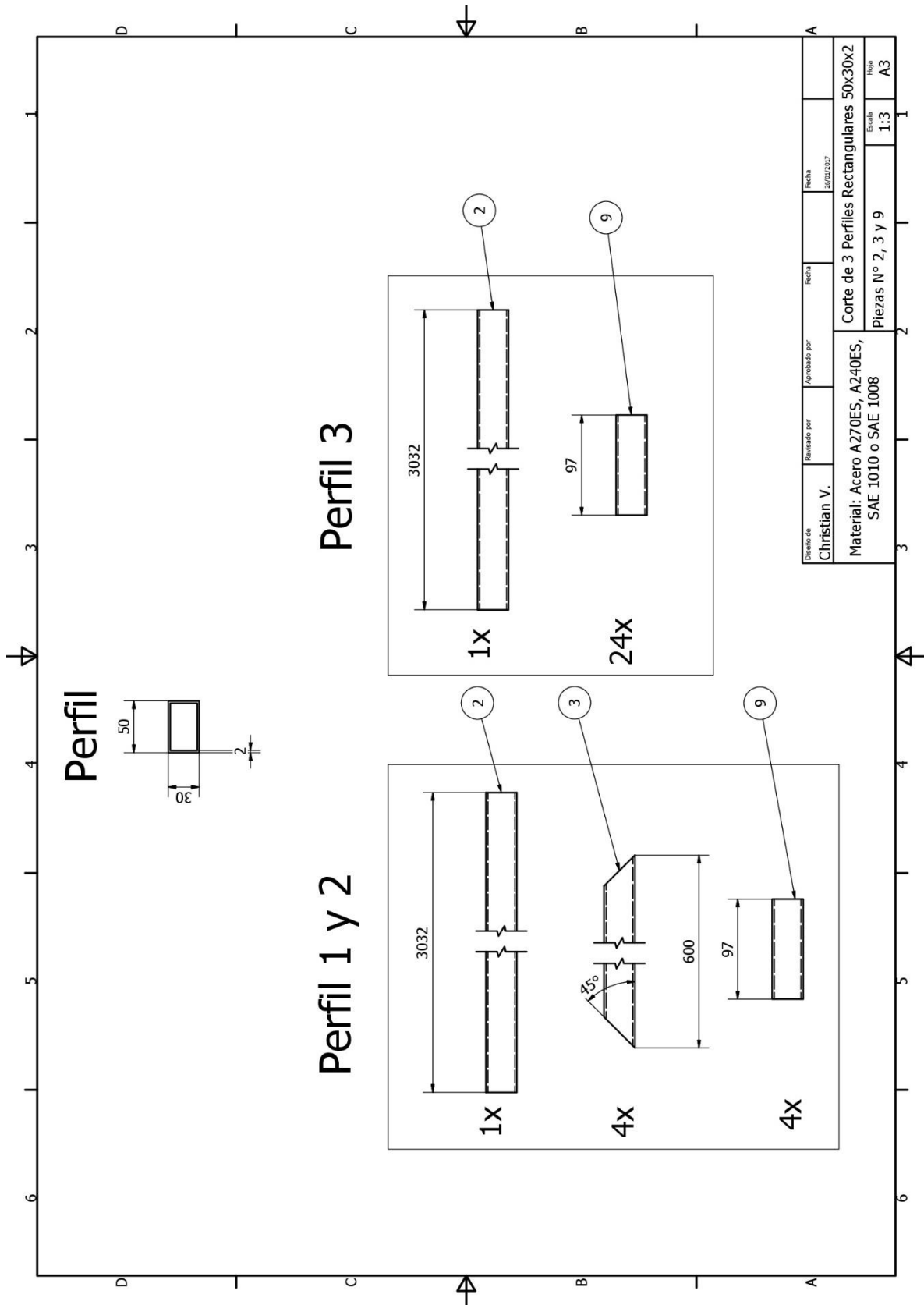


Ilustración 55: Plano de Corte de 3 Perfil Rectangulares de 50x30x2

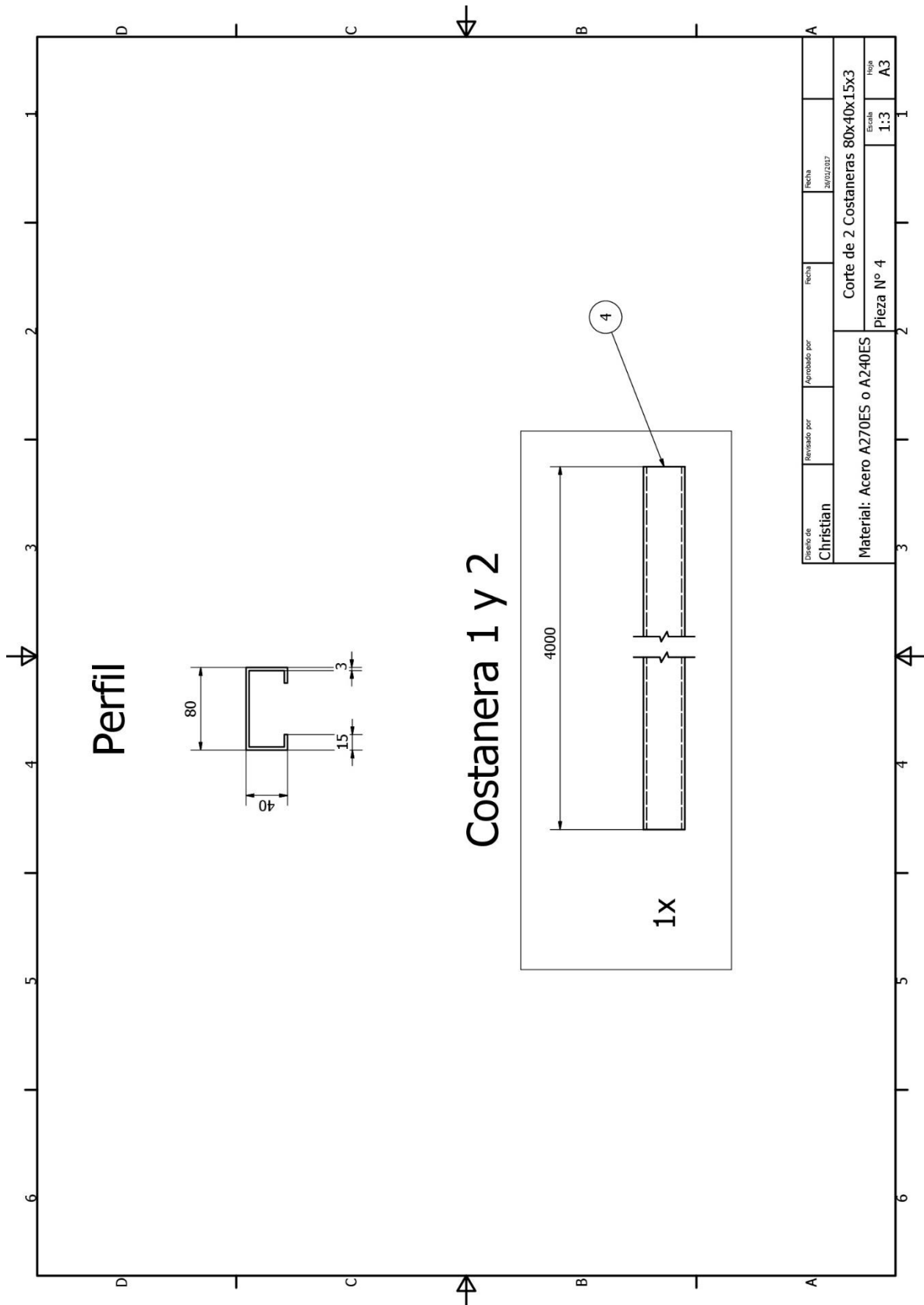


Ilustración 56: Plano de Corte de 2 Costaneras de 80x40x15x3.

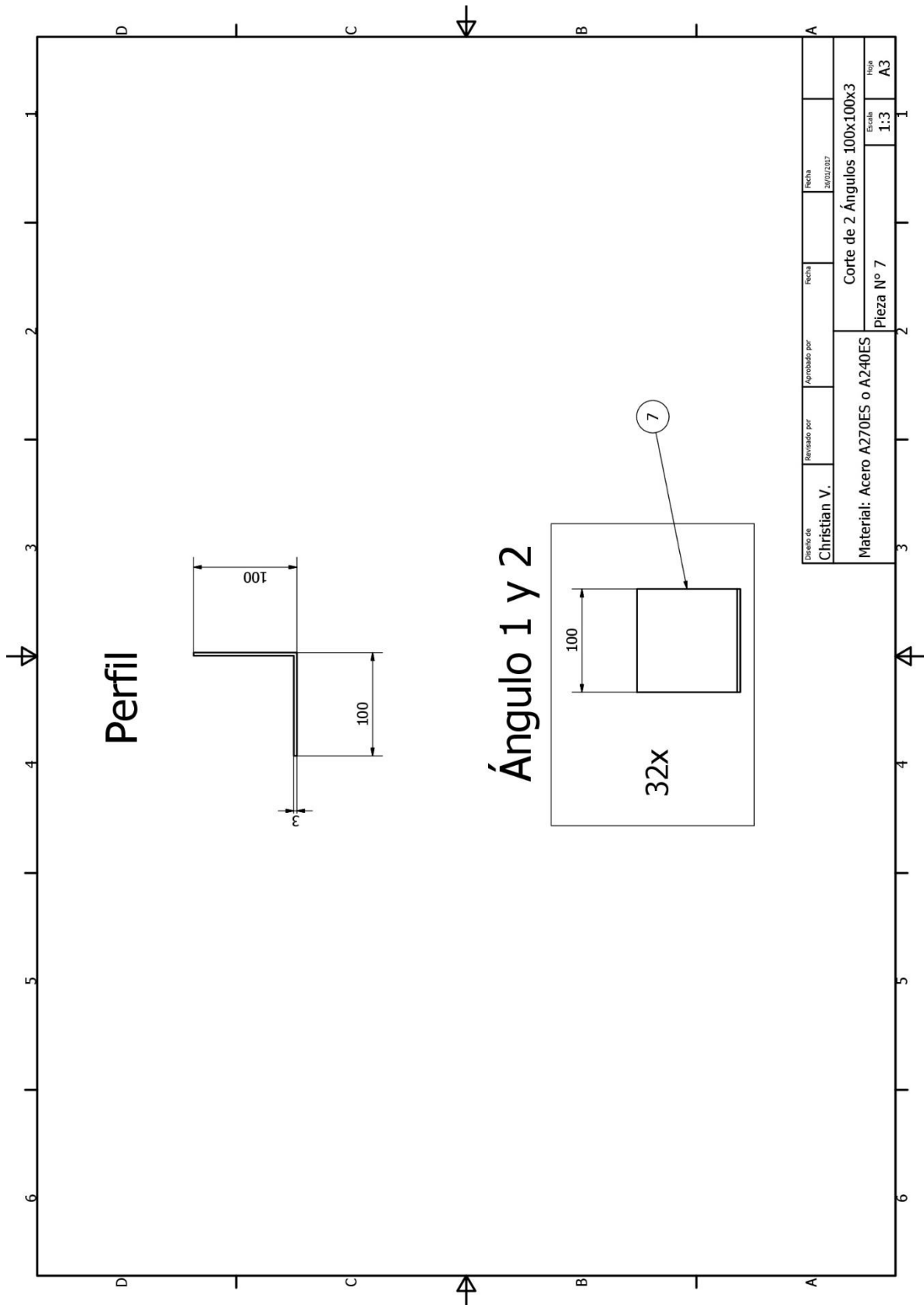
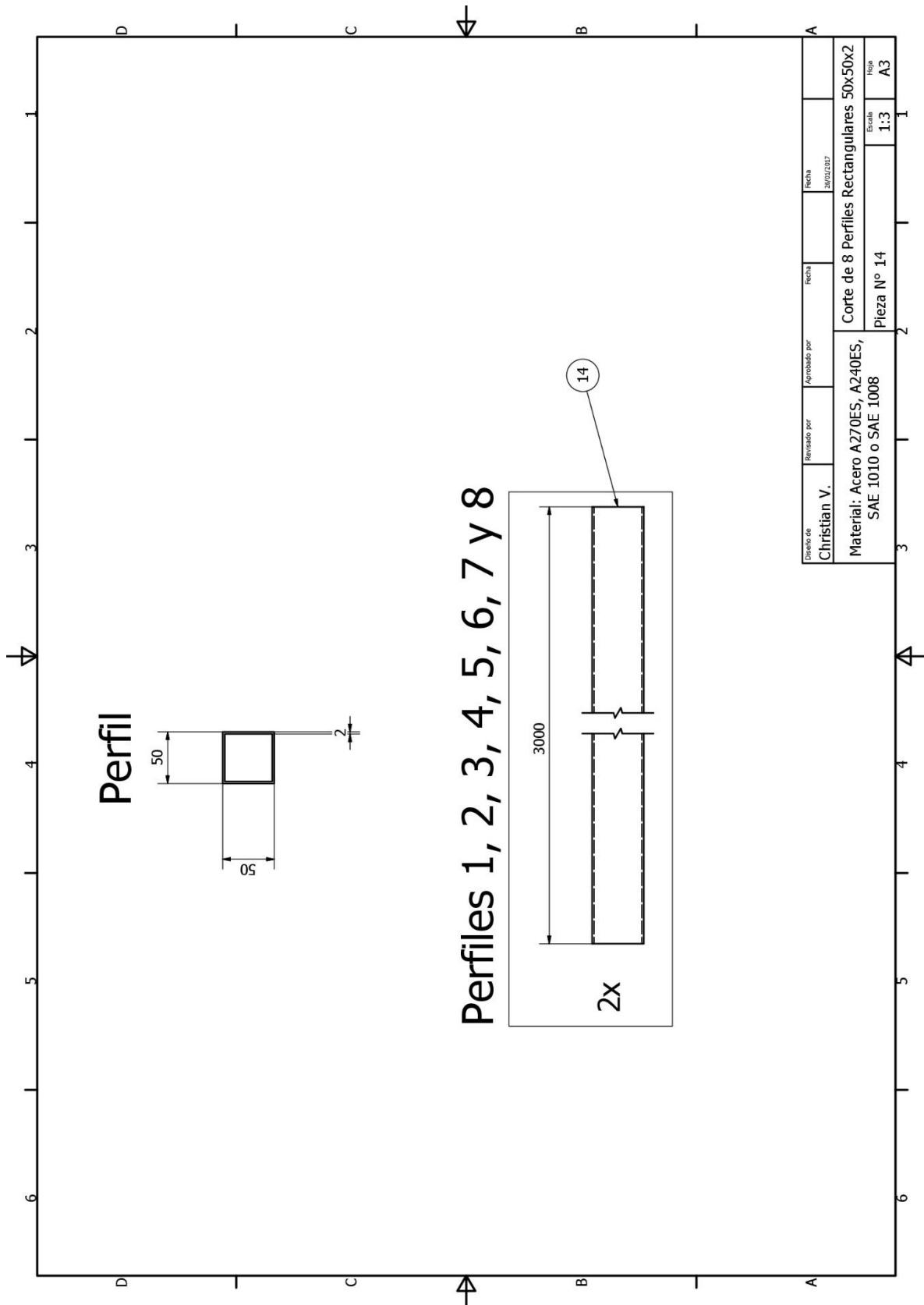


Ilustración 57: Plano de Corte de 1 Angulo de 80x80x3.



Diseño de	Elaborado por	Aprobado por	Fecha	26/02/2017
Christian V.				
Material: Acero A270ES, A240ES, SAE 1010 o SAE 1008				
Corte de 8 Perfiles Rectangulares 50x50x2				
Pieza N° 14				
Escala 1:3				
Hoja A3				

Ilustración 58: Plano de Corte de 8 Perfil Rectangulares de 50x50x2.

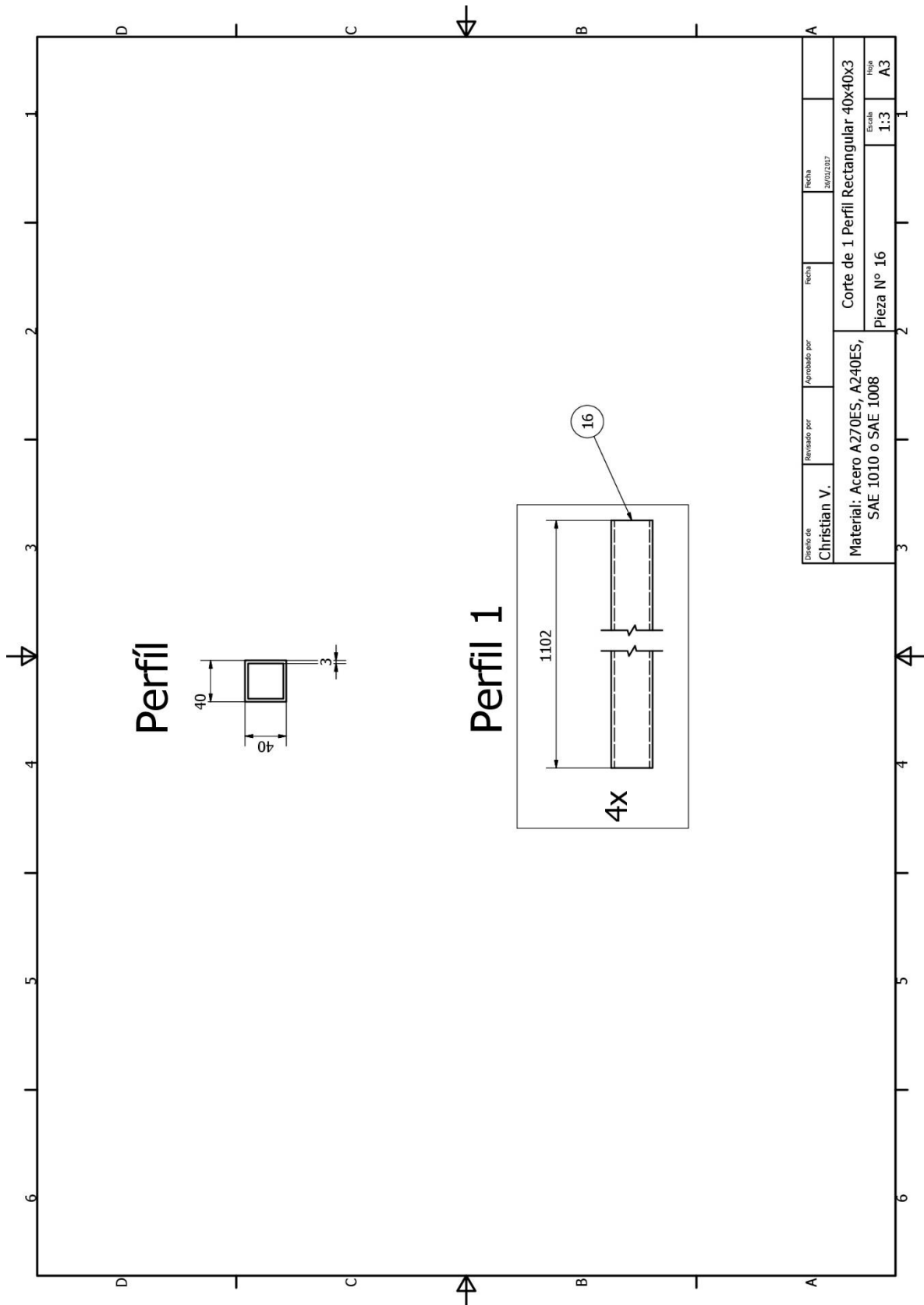
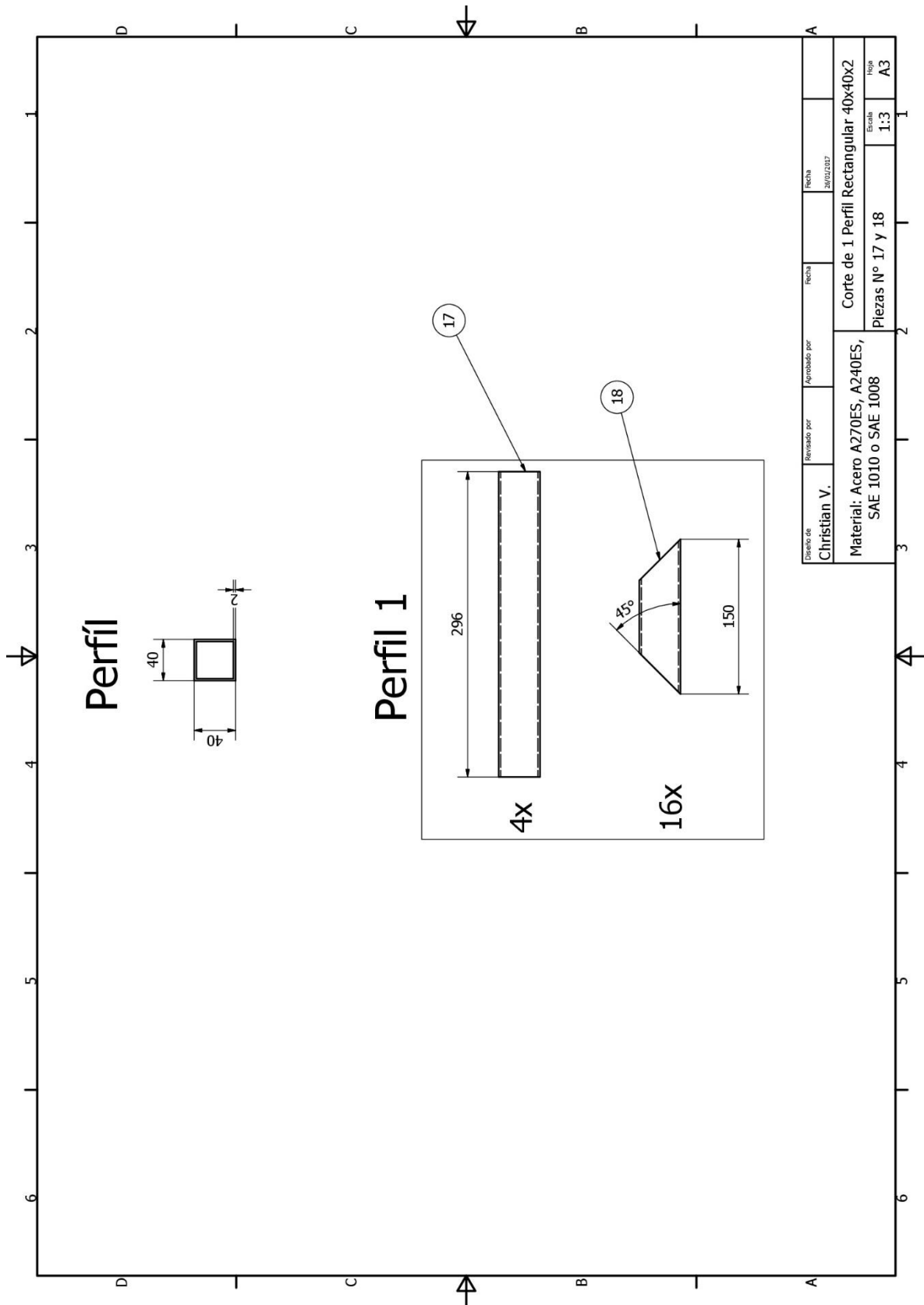


Ilustración 59: Plano de Corte de 1 Perfil Rectangular de 40x40x3.



Diseño de	Elaborado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Christian V.			26/02/2017		
Material: Acero A270ES, A240ES, SAE 1010 o SAE 1008			Corte de 1 Perfil Rectangular 40x40x2		
Piezas N° 17 y 18			Escala	Hoja	
			1:3	A3	

Ilustración 60: Plano de Corte de 1 Perfil Rectangular de 40x40x2.

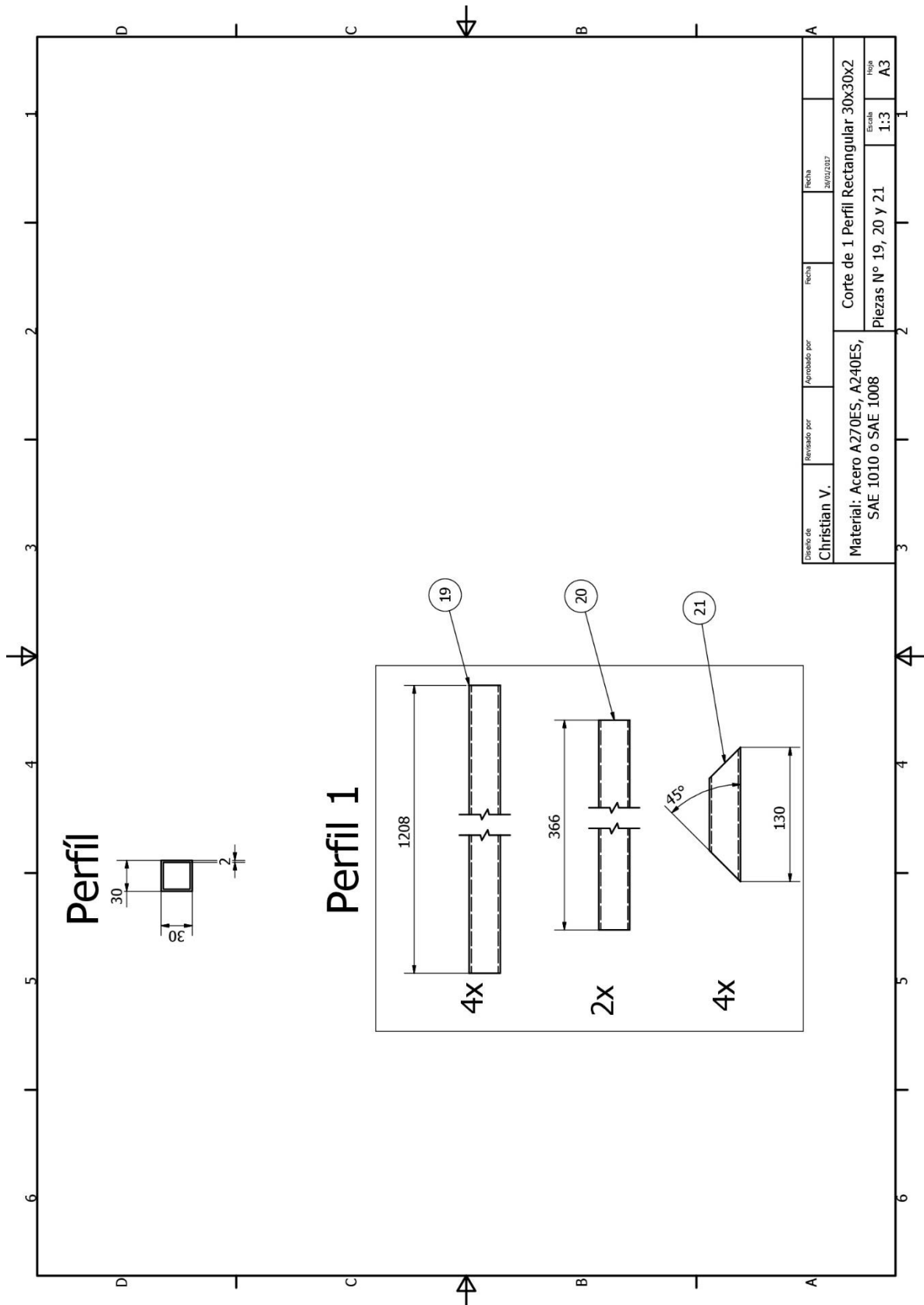


Ilustración 61: Plano de Corte de 1 Perfil Rectangular de 30x30x2.

13.4 PLANOS DE PIEZAS

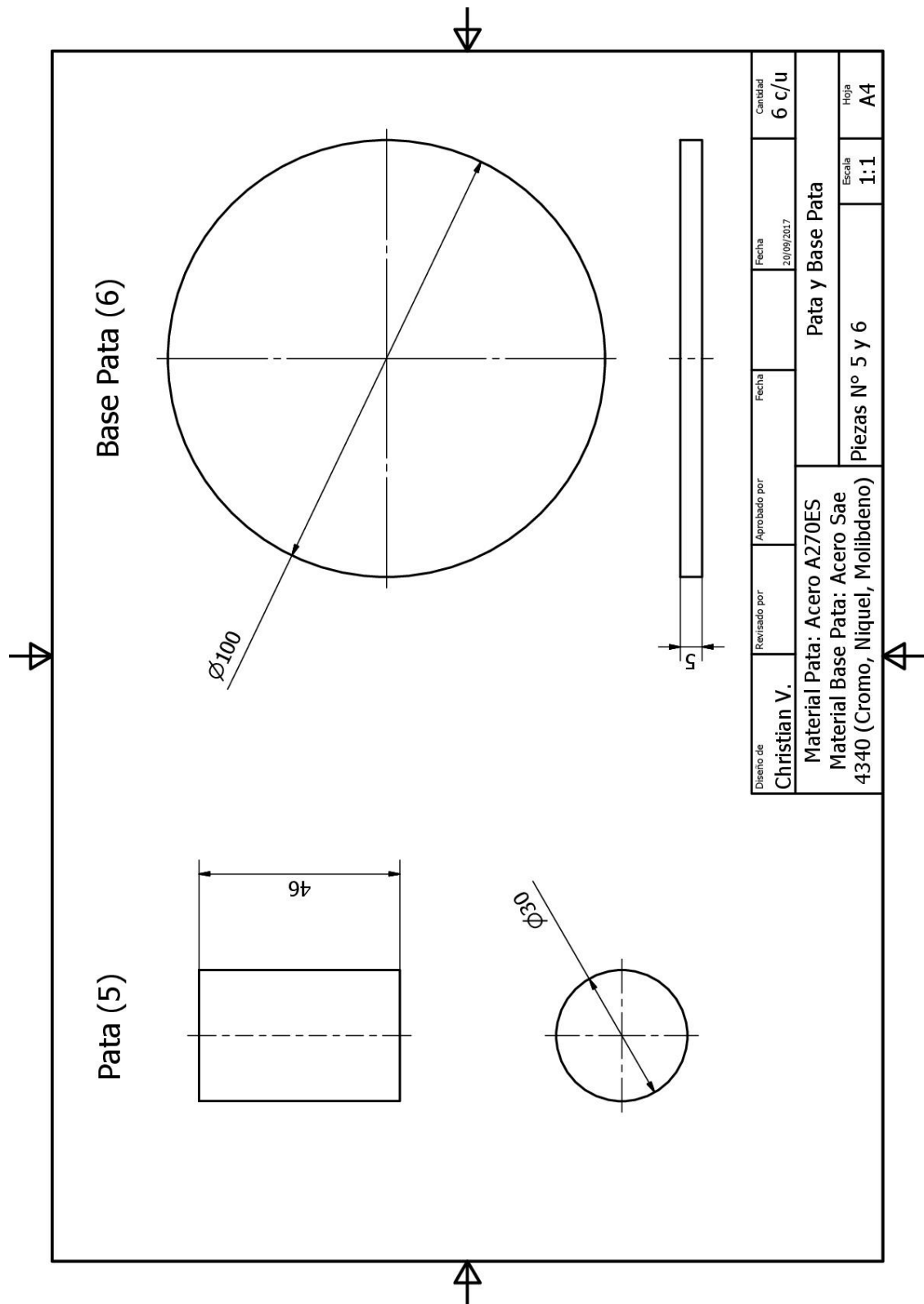


Ilustración 62: Plano de Piezas de Pata y Base Pata.

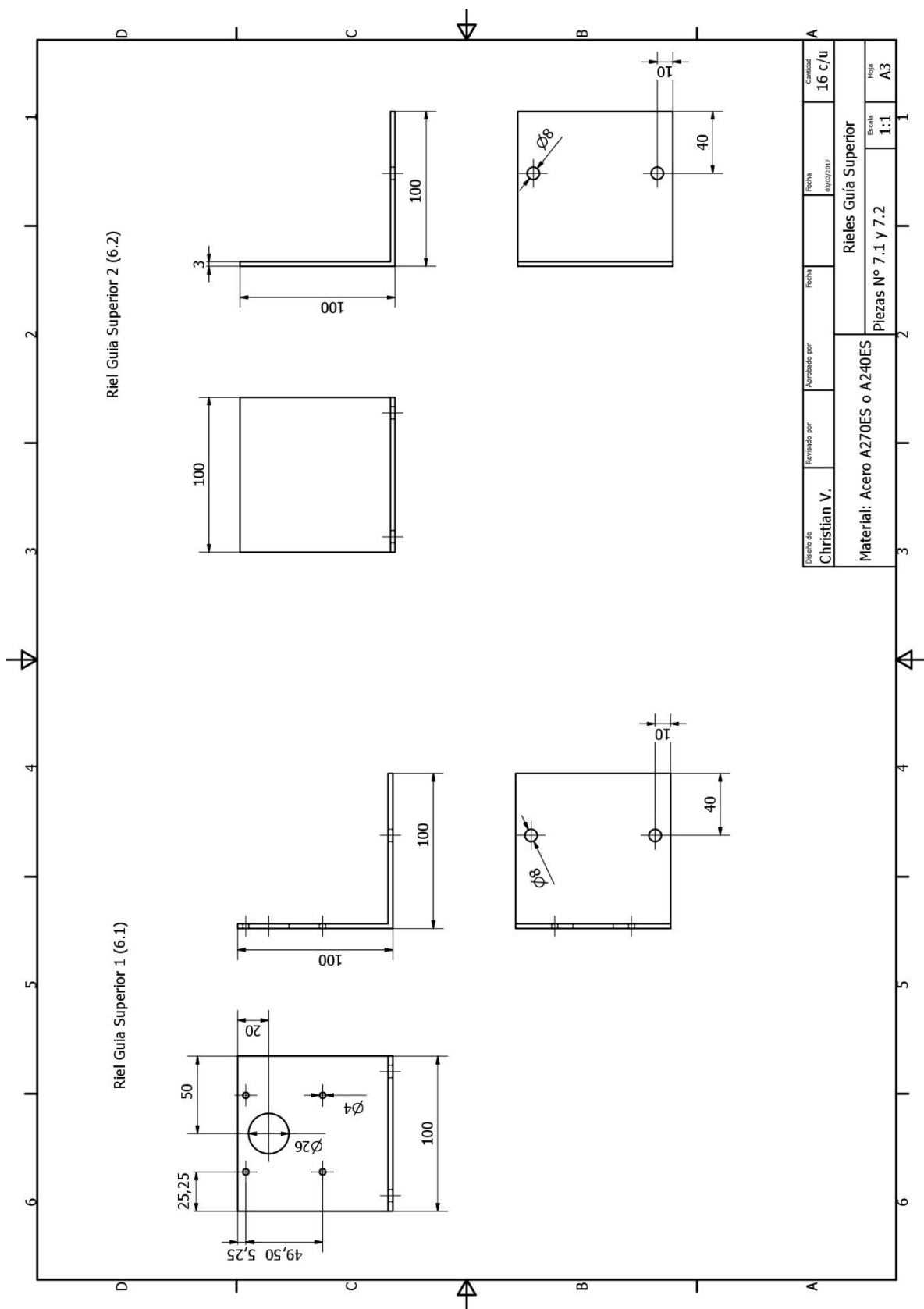


Ilustración 63: Plano de Piezas de Rieles Guía Superiores.

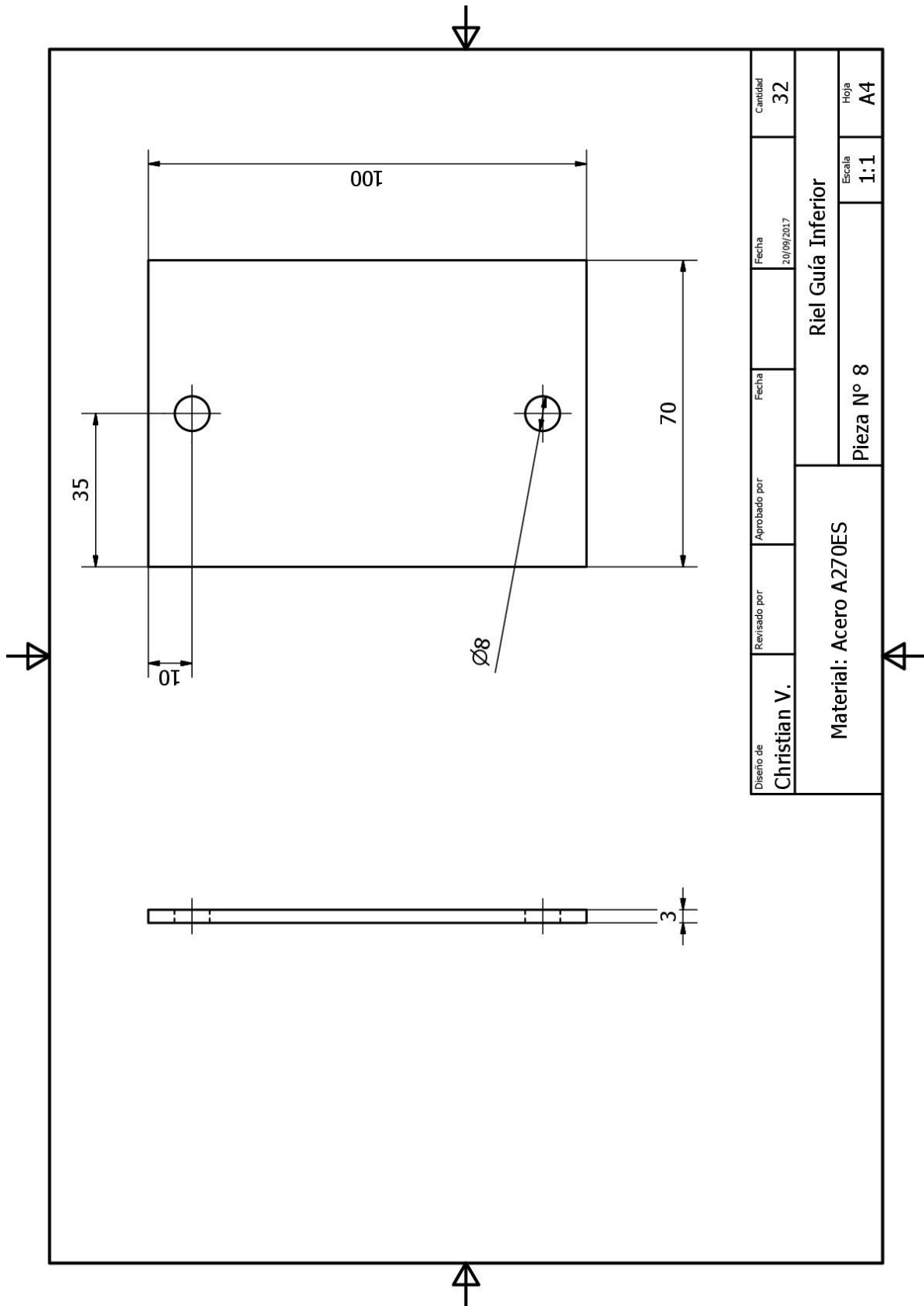


Ilustración 64: Plano de Pieza de Riel Guía Inferior.

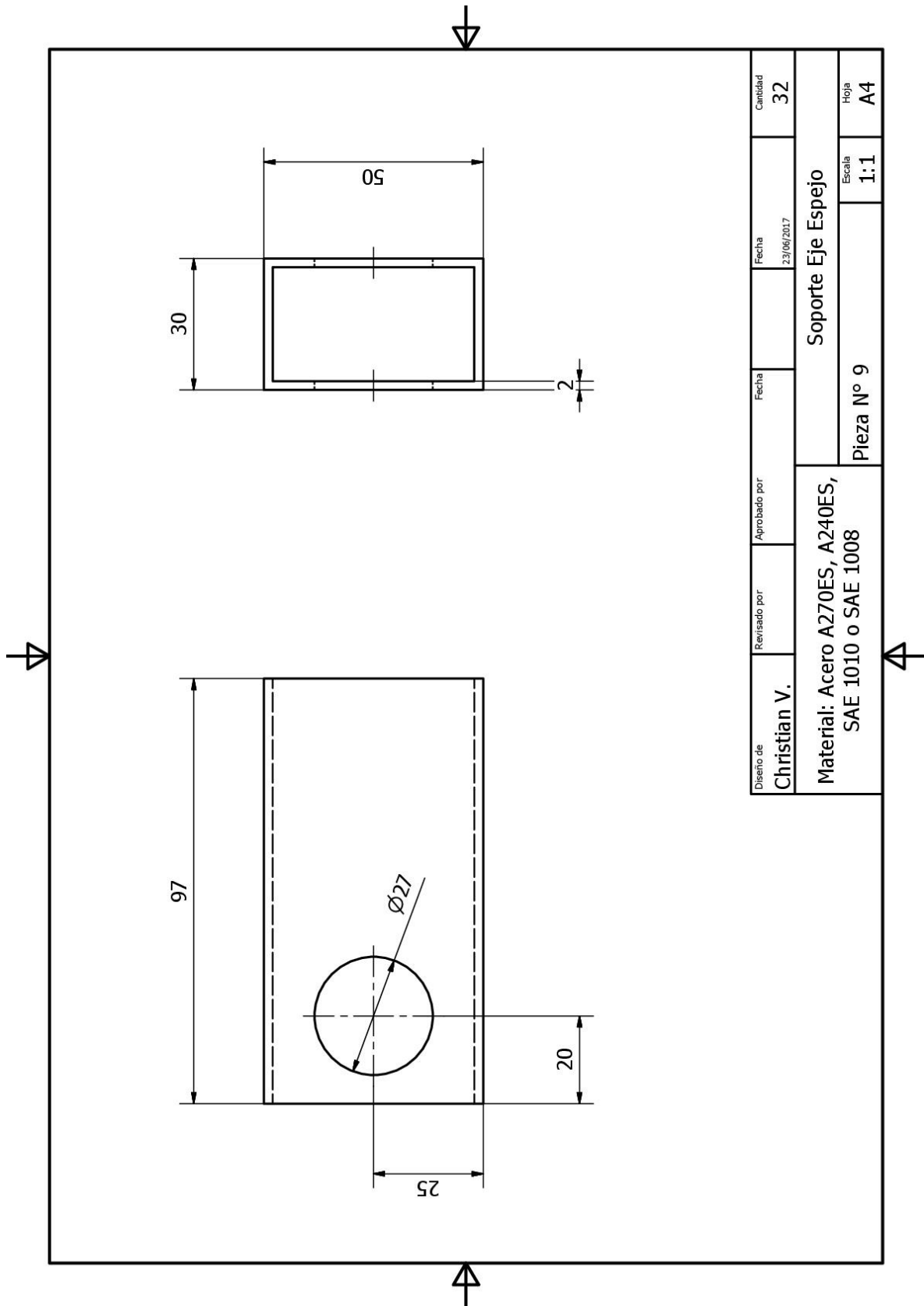


Ilustración 65: Plano de Pieza de Soporte Eje Espejo.

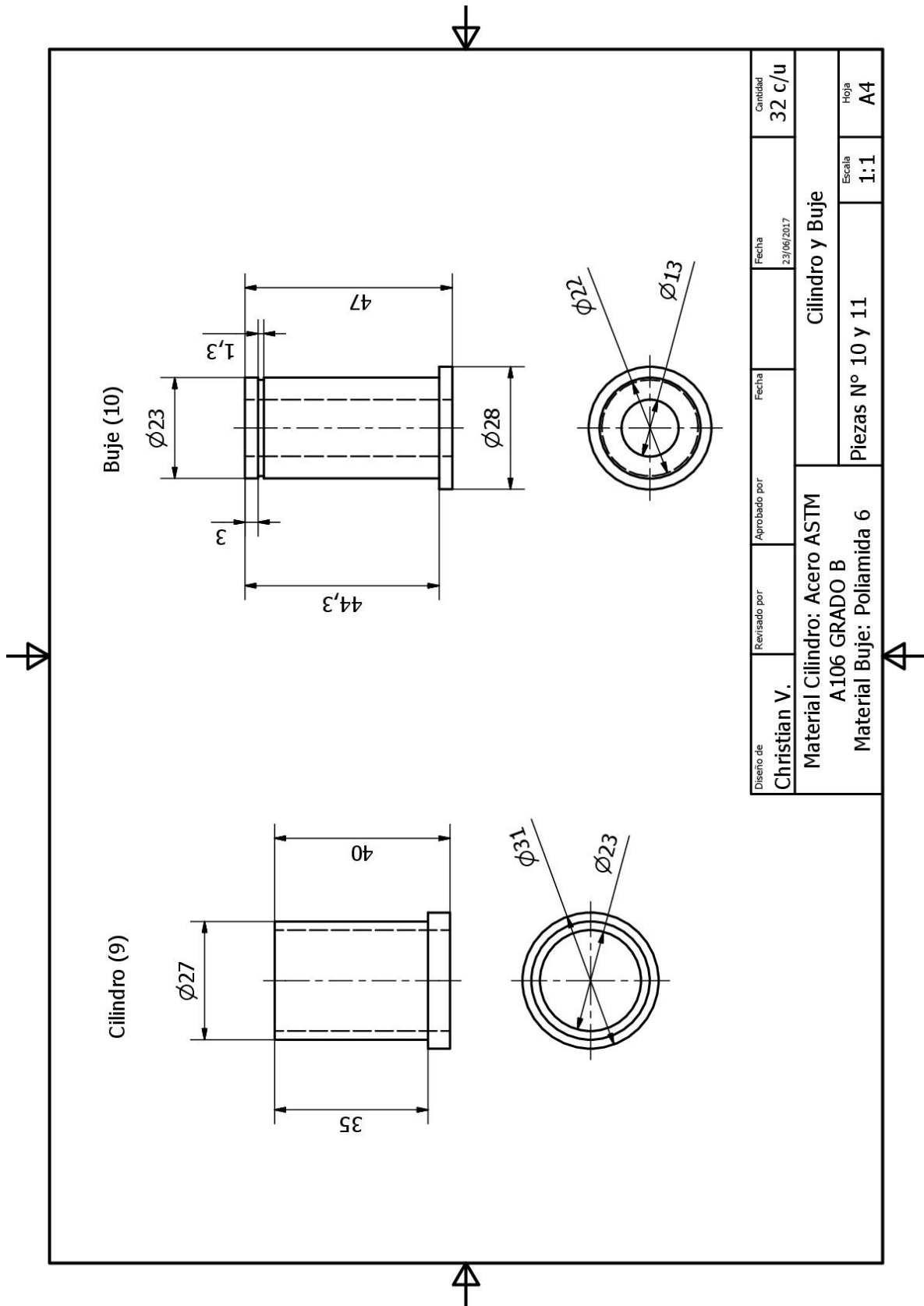
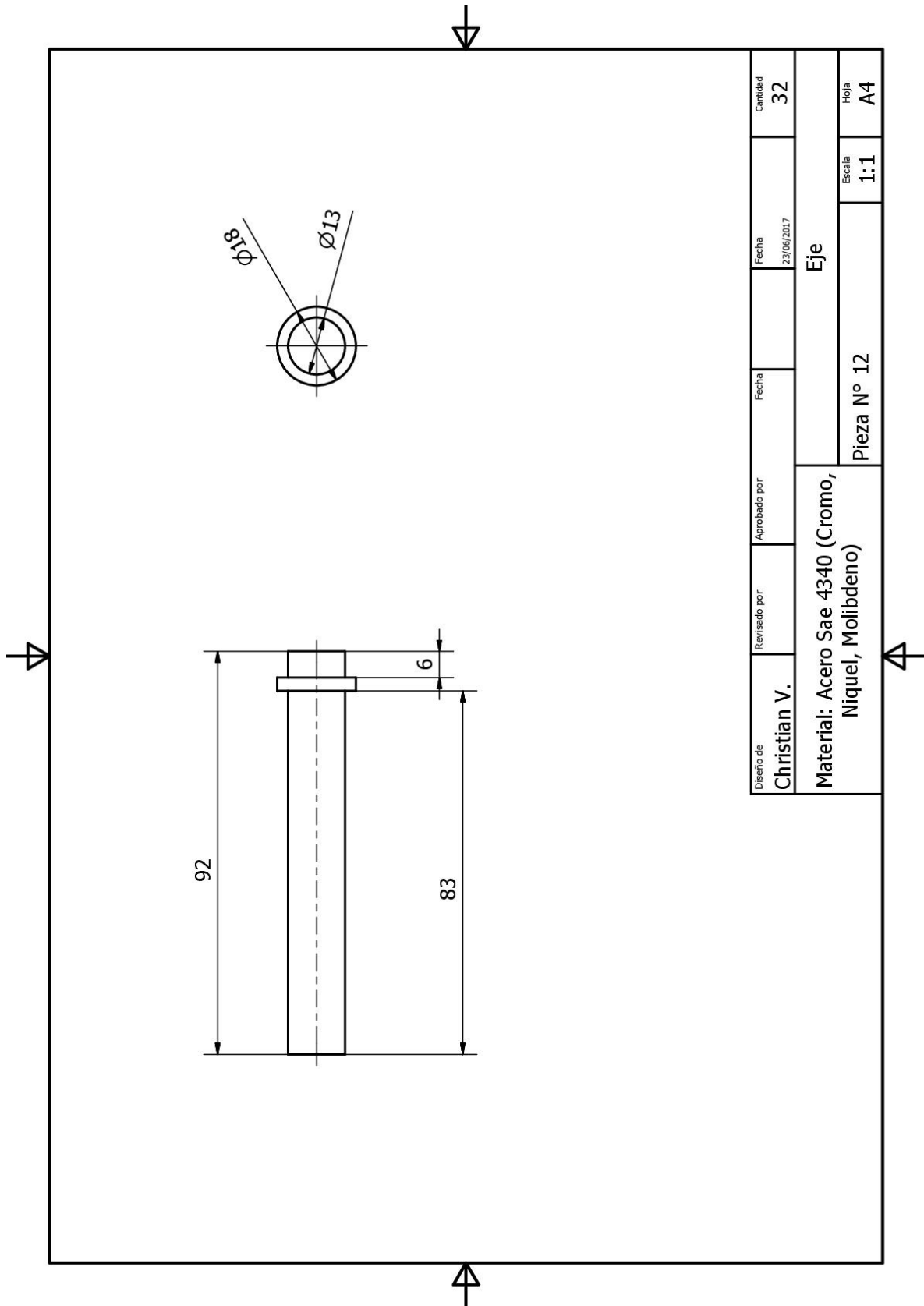


Ilustración 66: Plano de Piezas de Cilindro y Buje.



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Cantidad
Christian V.				23/06/2017	32
Material: Acero Sae 4340 (Cromo, Niquel, Molibdeno)			Eje		
			Pieza N° 12	Escala 1:1	Hoja A4

Ilustración 67: Plano de Pieza de Eje.

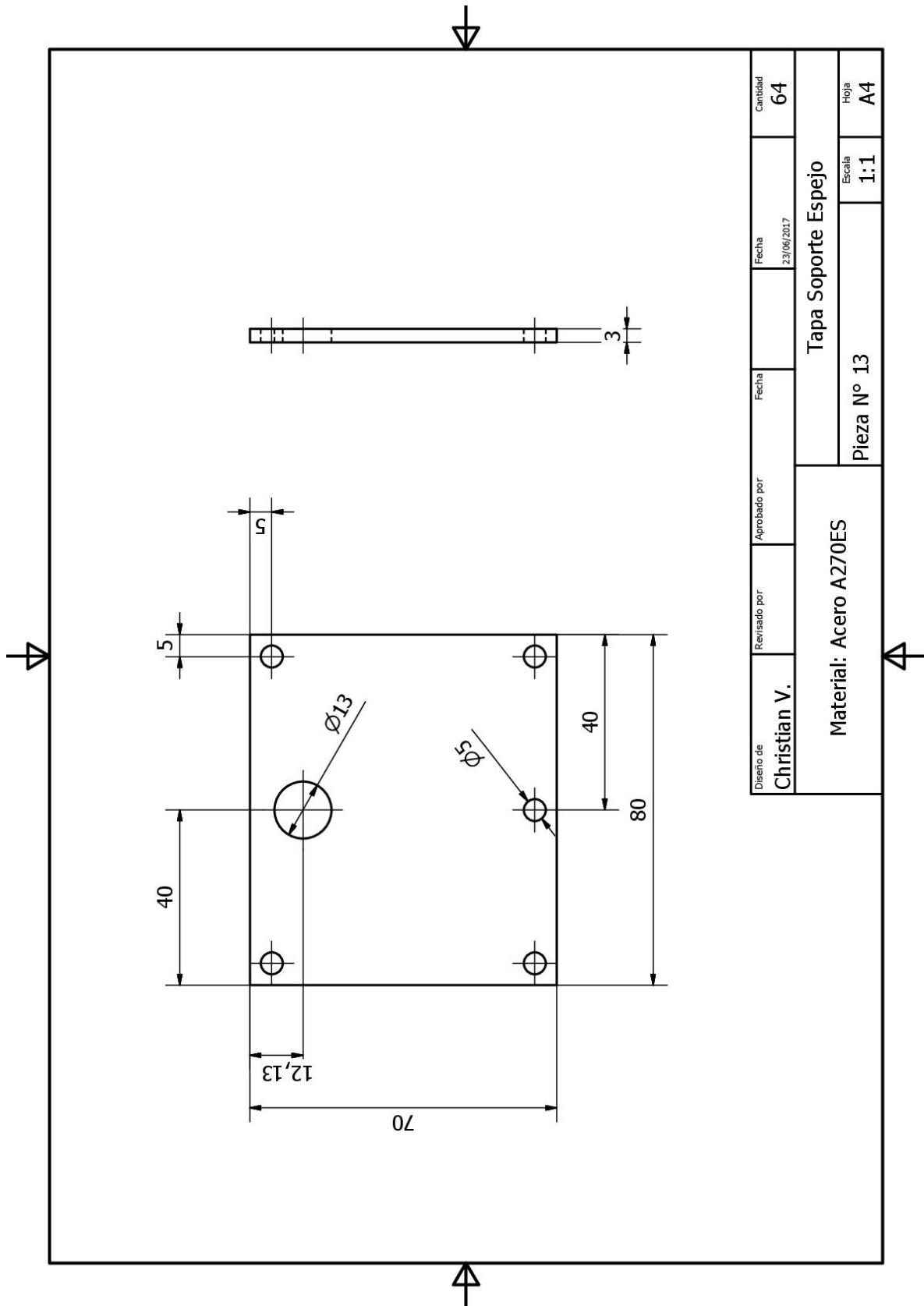


Ilustración 68: Plano de Pieza de Tapa Soporte Espejo.

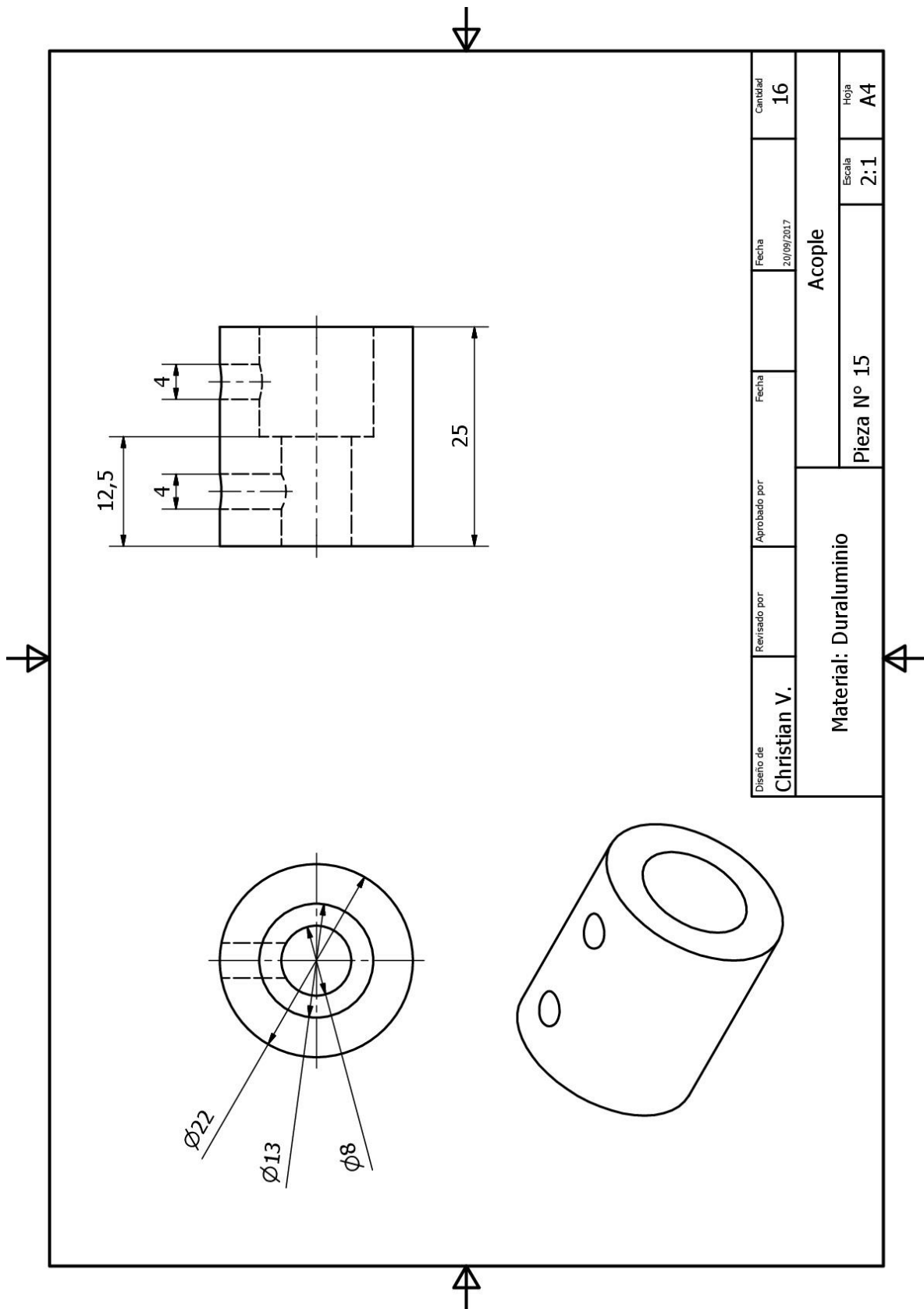


Ilustración 69: Plano de Pieza de Acople.

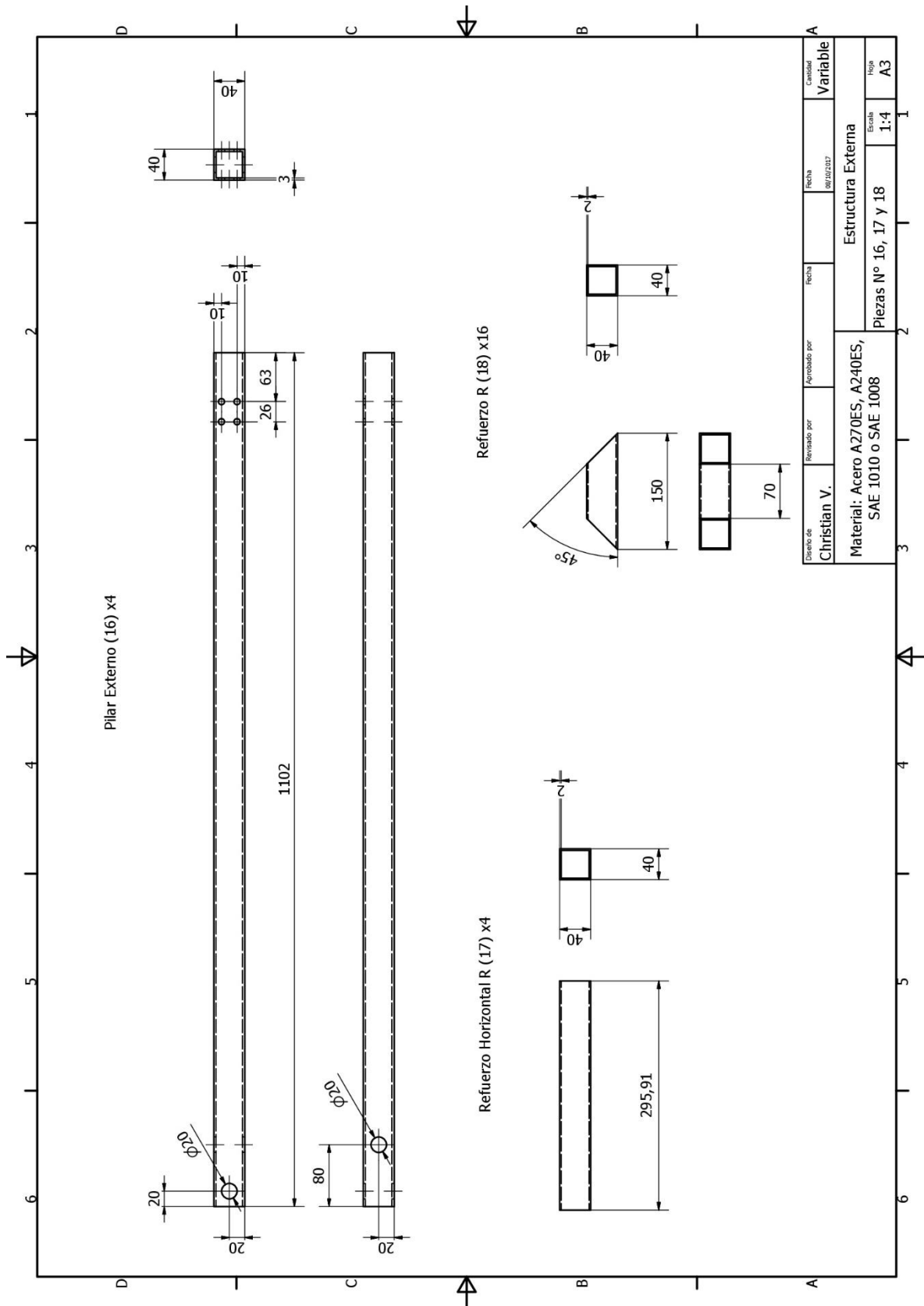


Ilustración 70: Plano de Piezas de Estructura Externa.

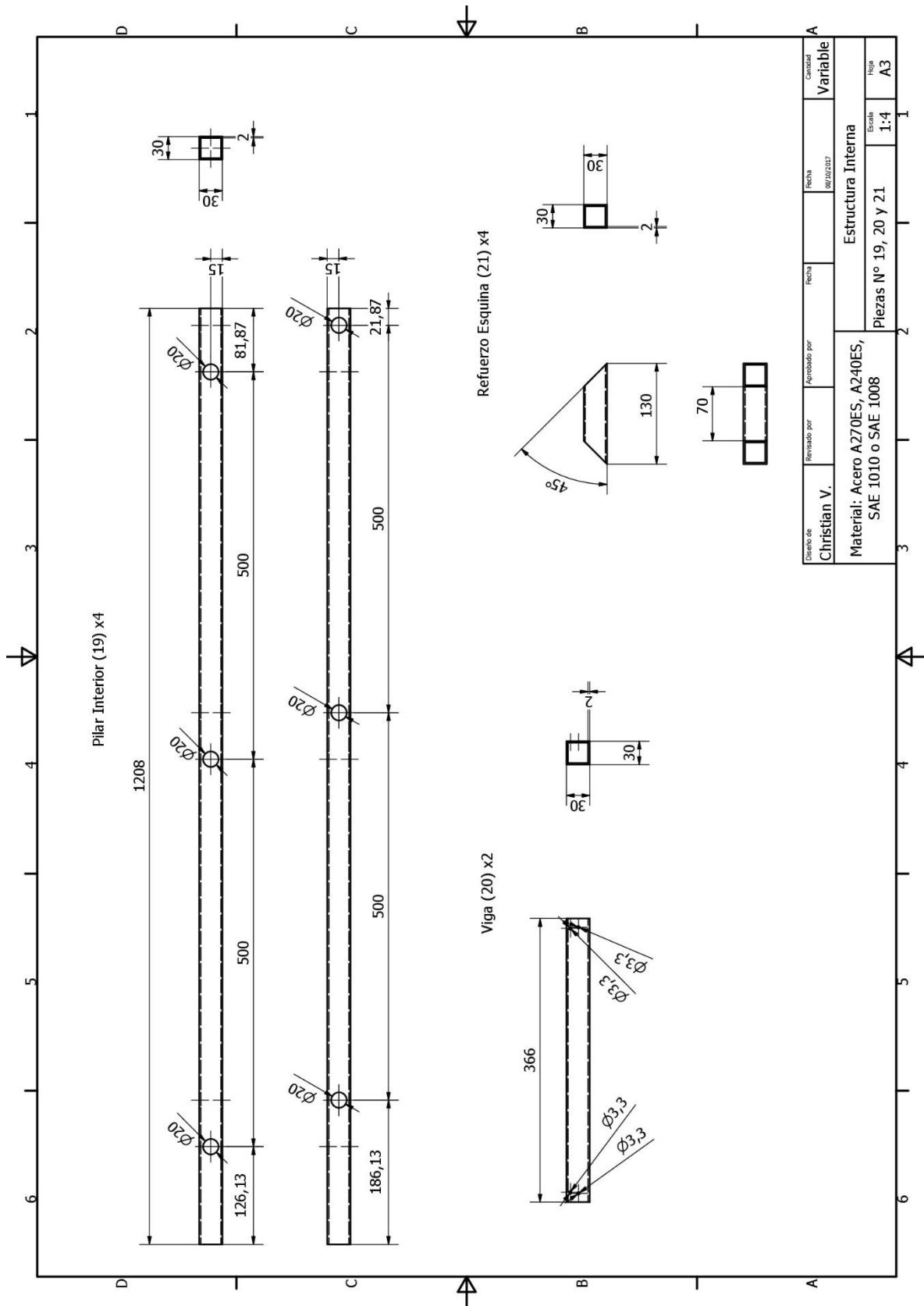


Ilustración 71: Plano de Piezas de Estructura Interna.

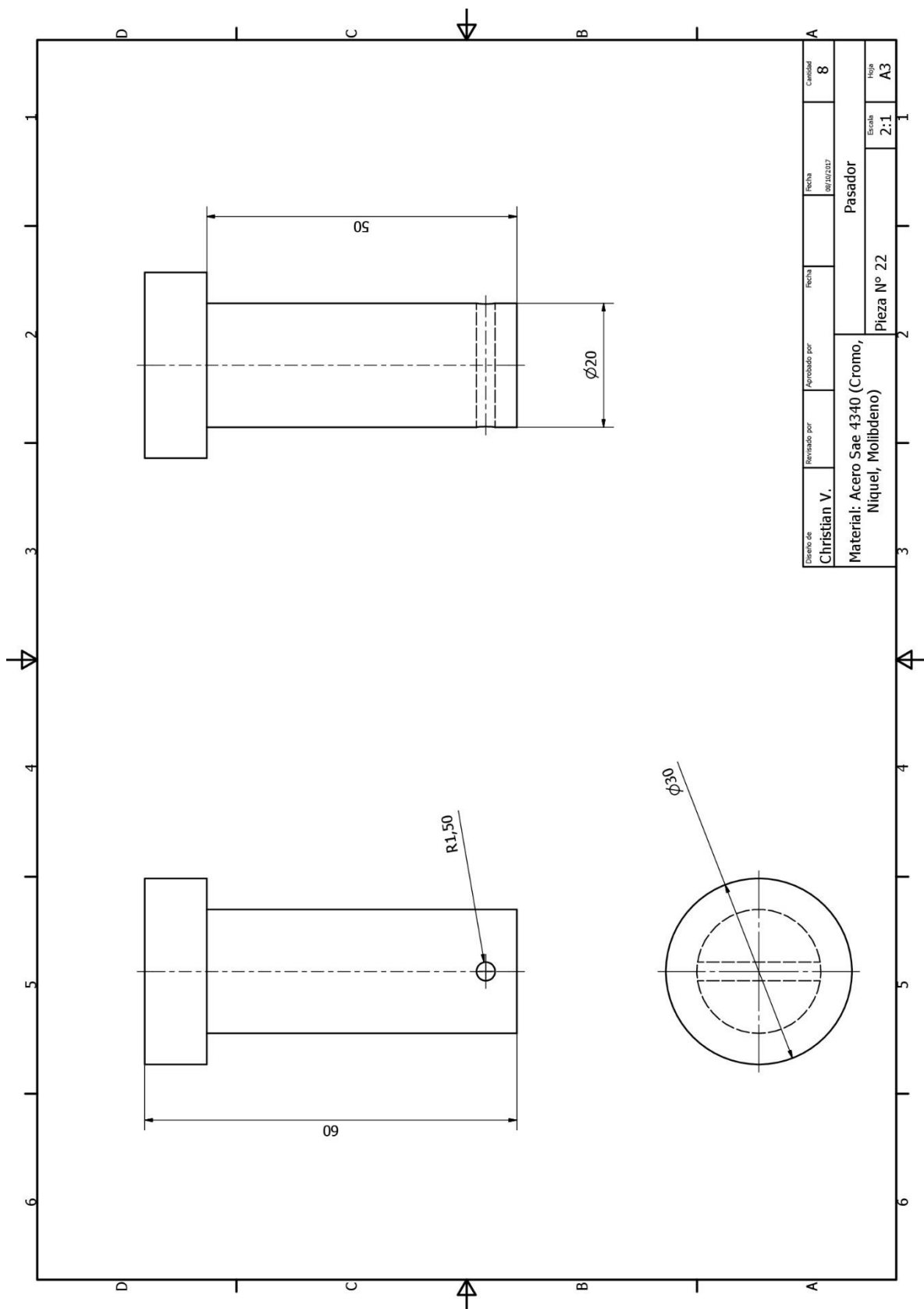


Ilustración 72: Plano de Pieza de Pasador.

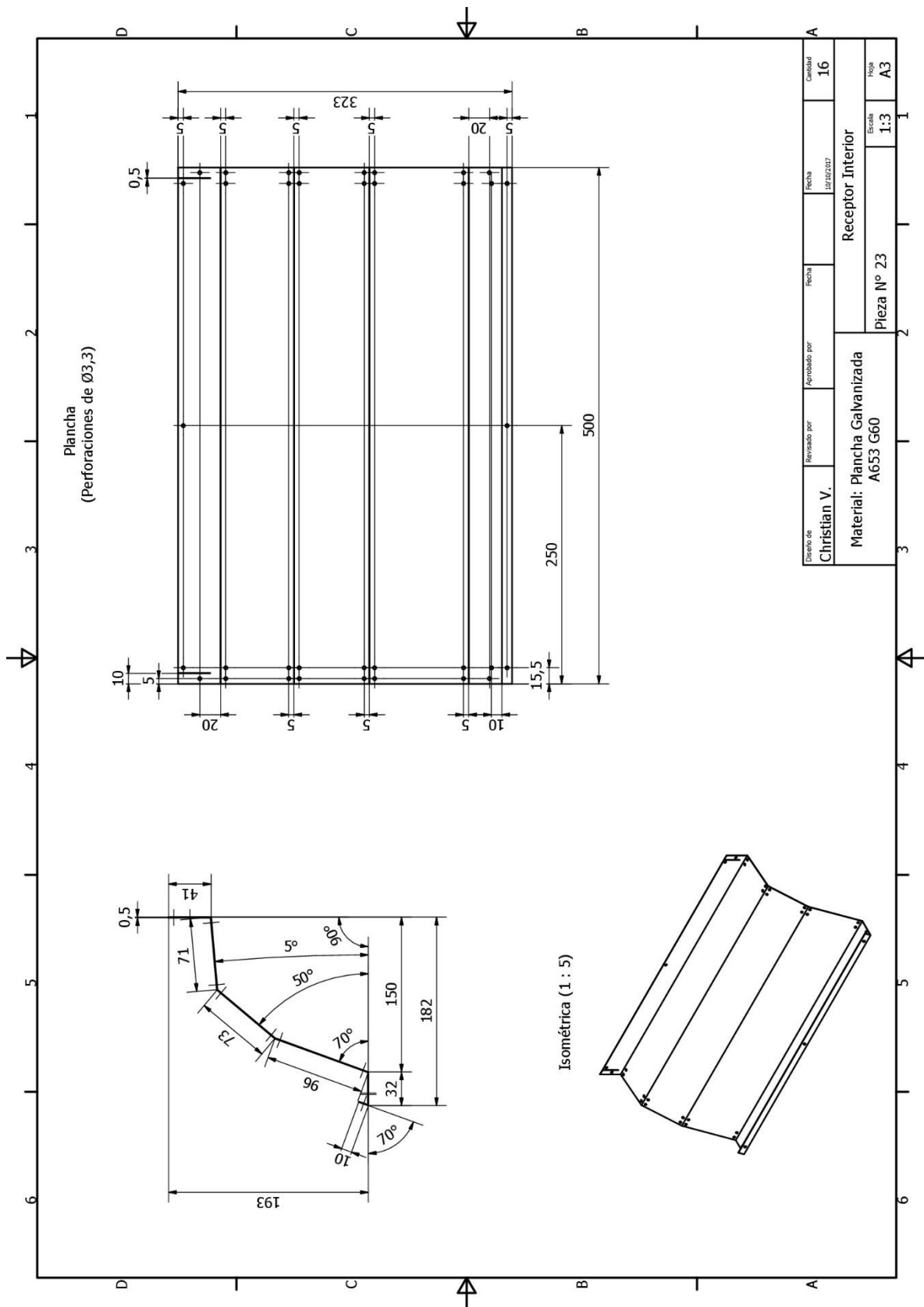


Ilustración 73: Plano de Pieza de Receptor Interior.

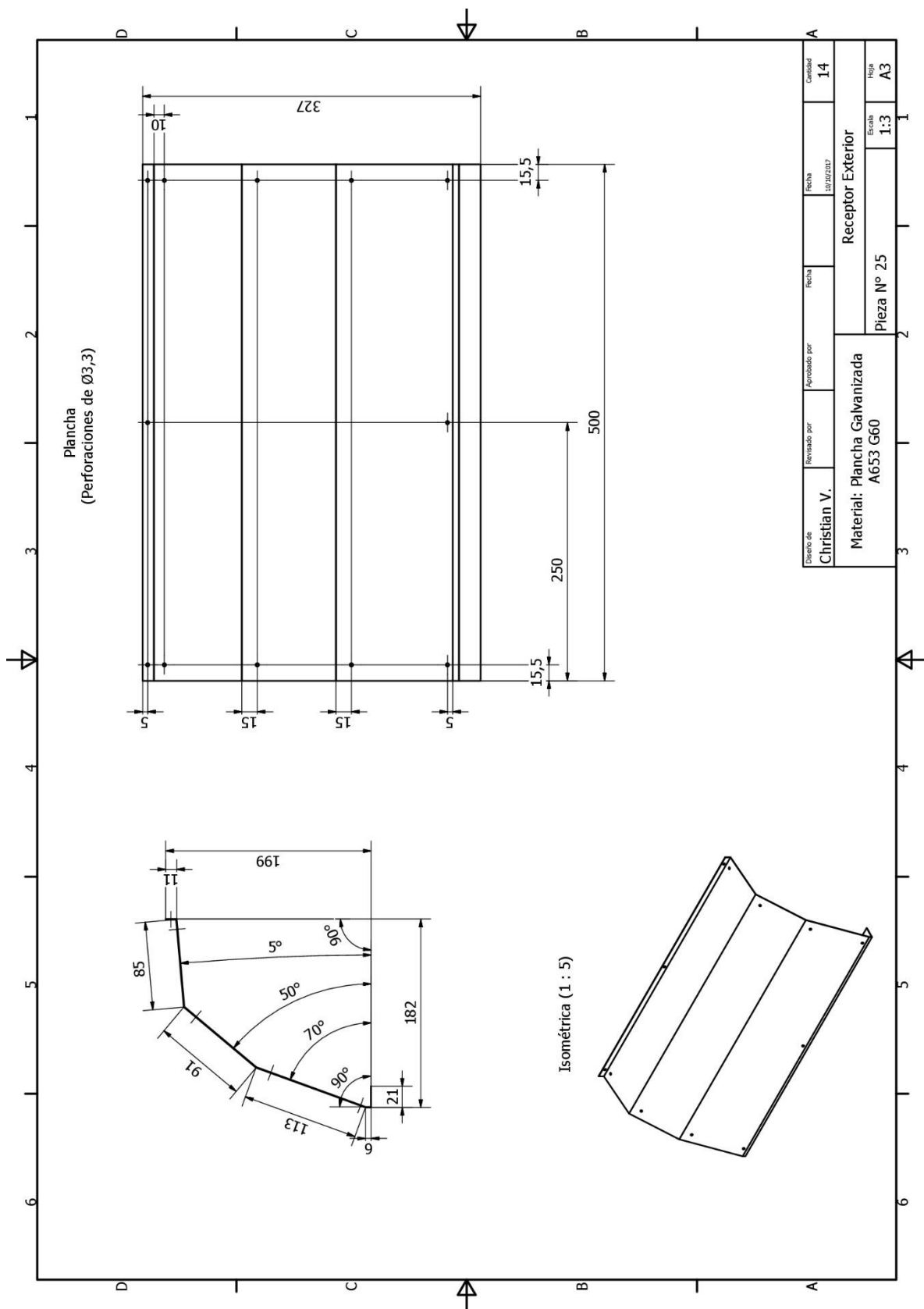


Ilustración 75: Plano de Pieza Receptor Exterior.

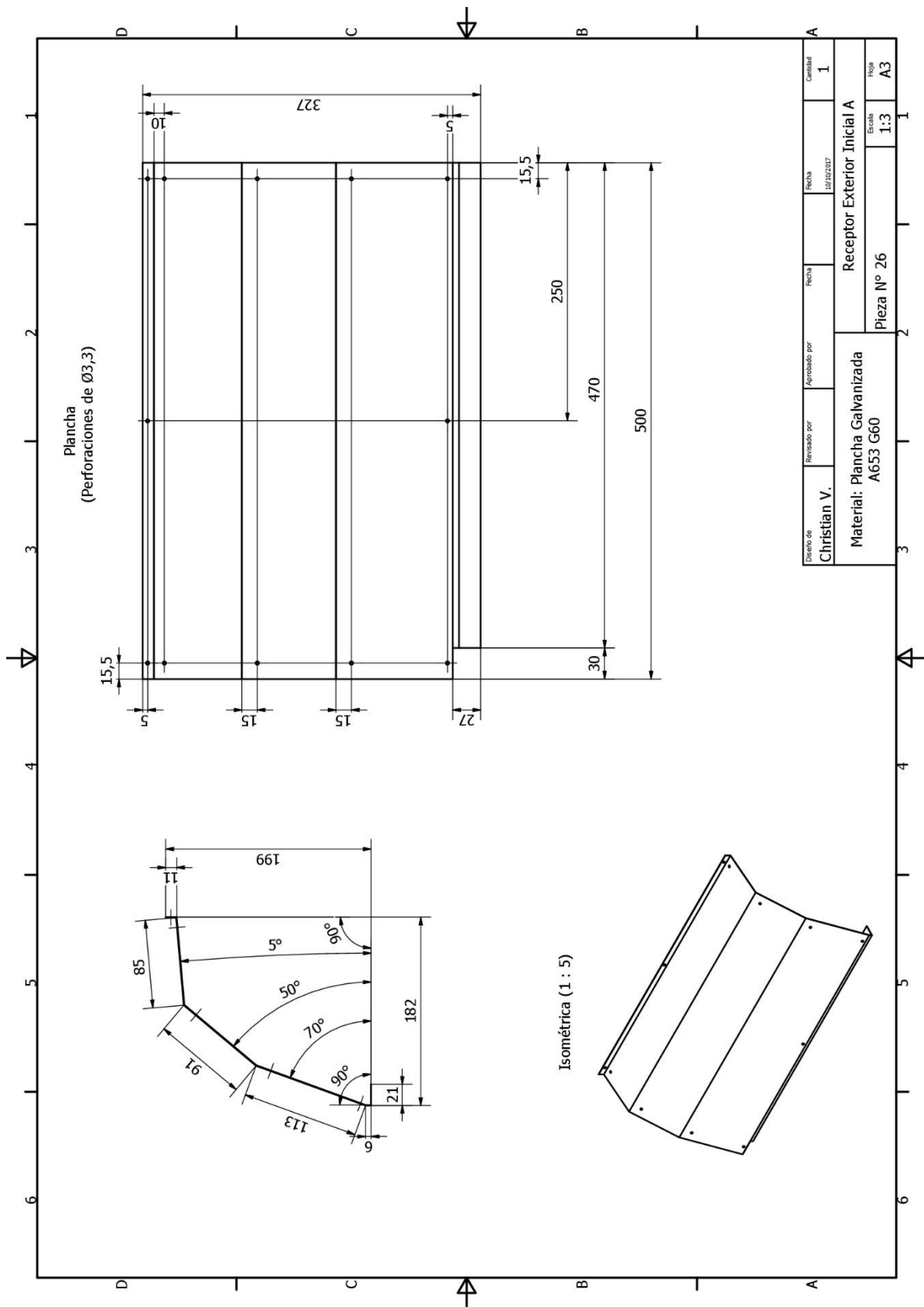


Ilustración 76: Plano de Pieza de Receptor Exterior Inicial A.

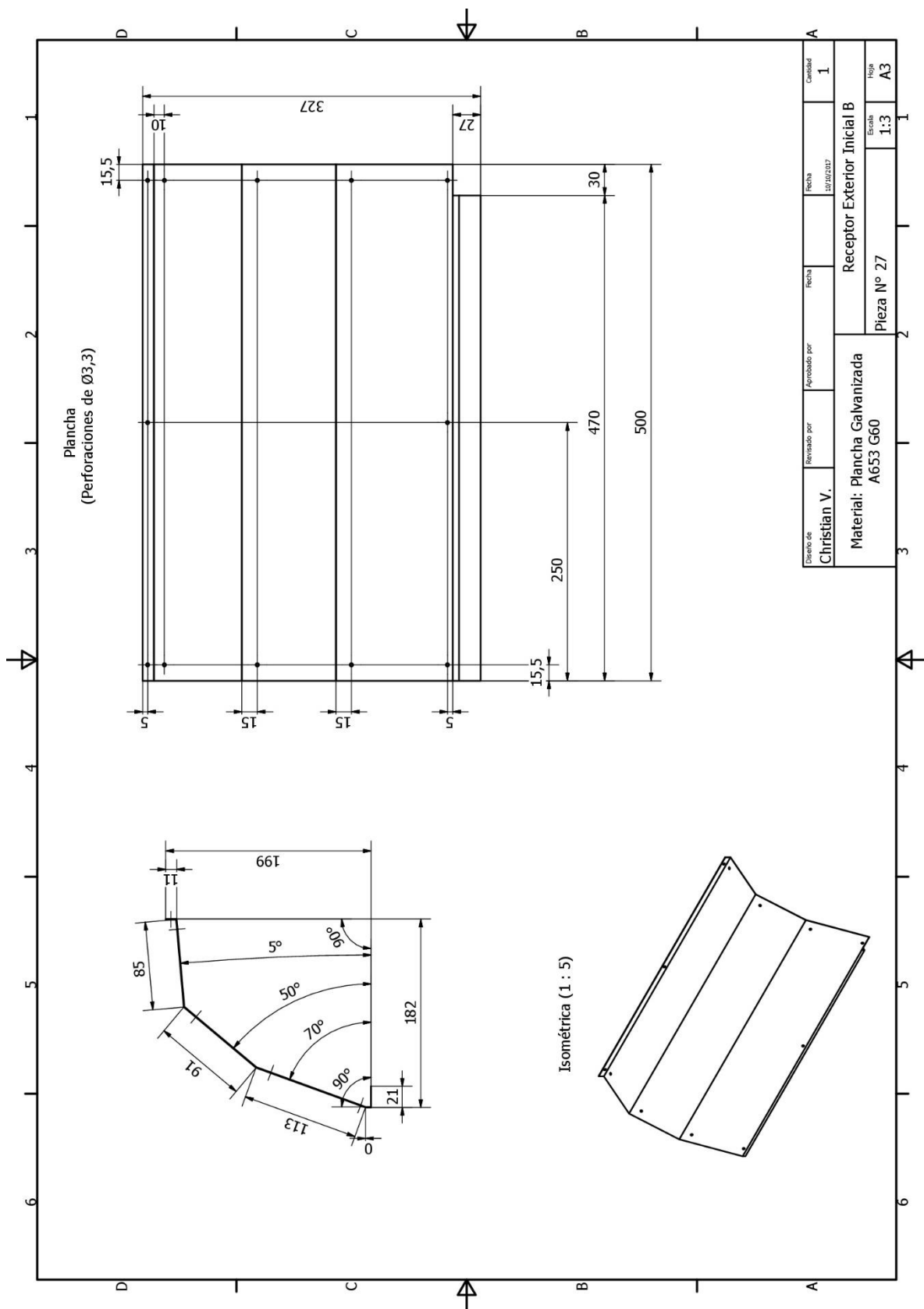


Ilustración 77: Plano de Pieza de Receptor Exterior Inicial B.

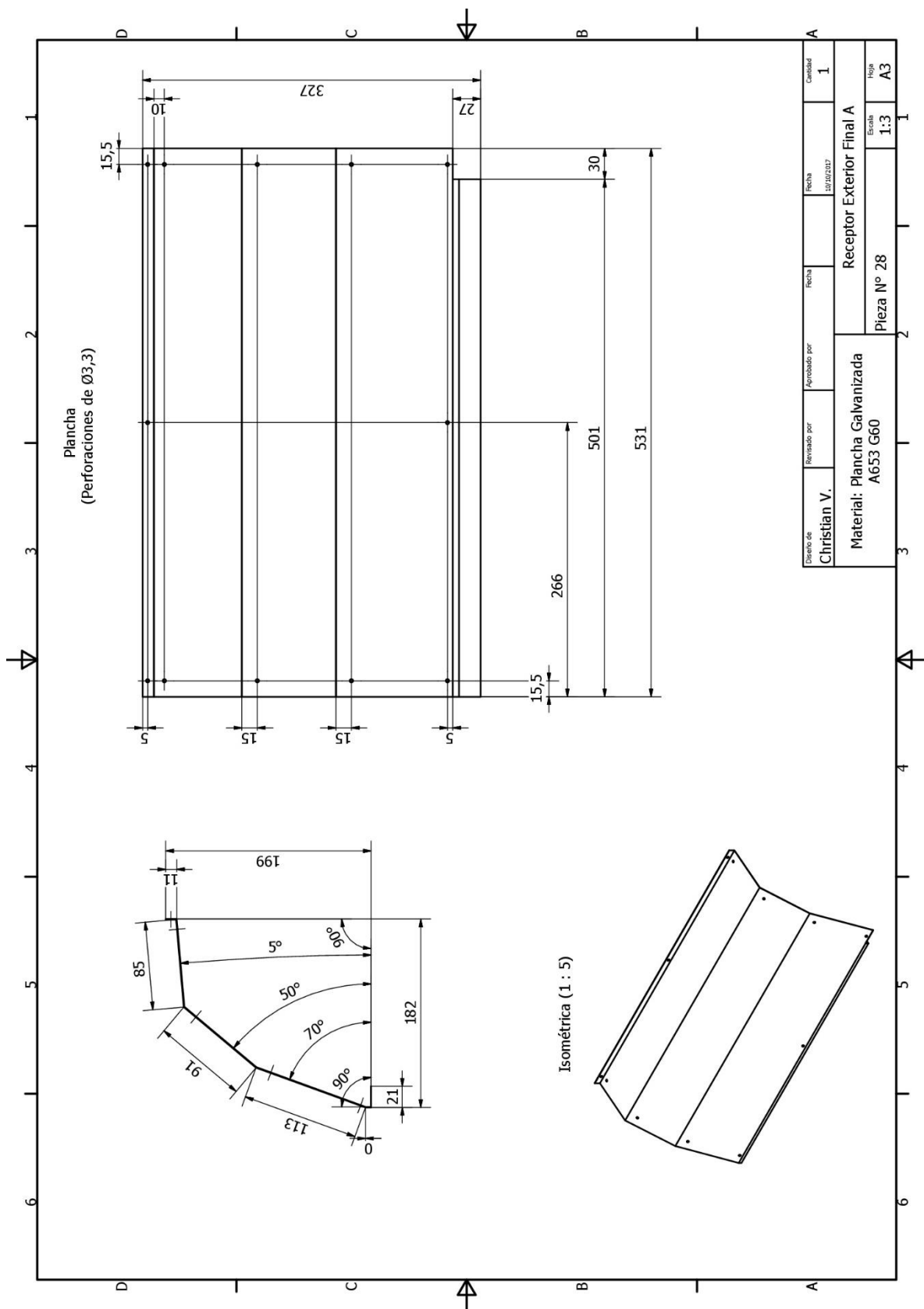


Ilustración 78: Plano de Pieza de Receptor Exterior Final A.

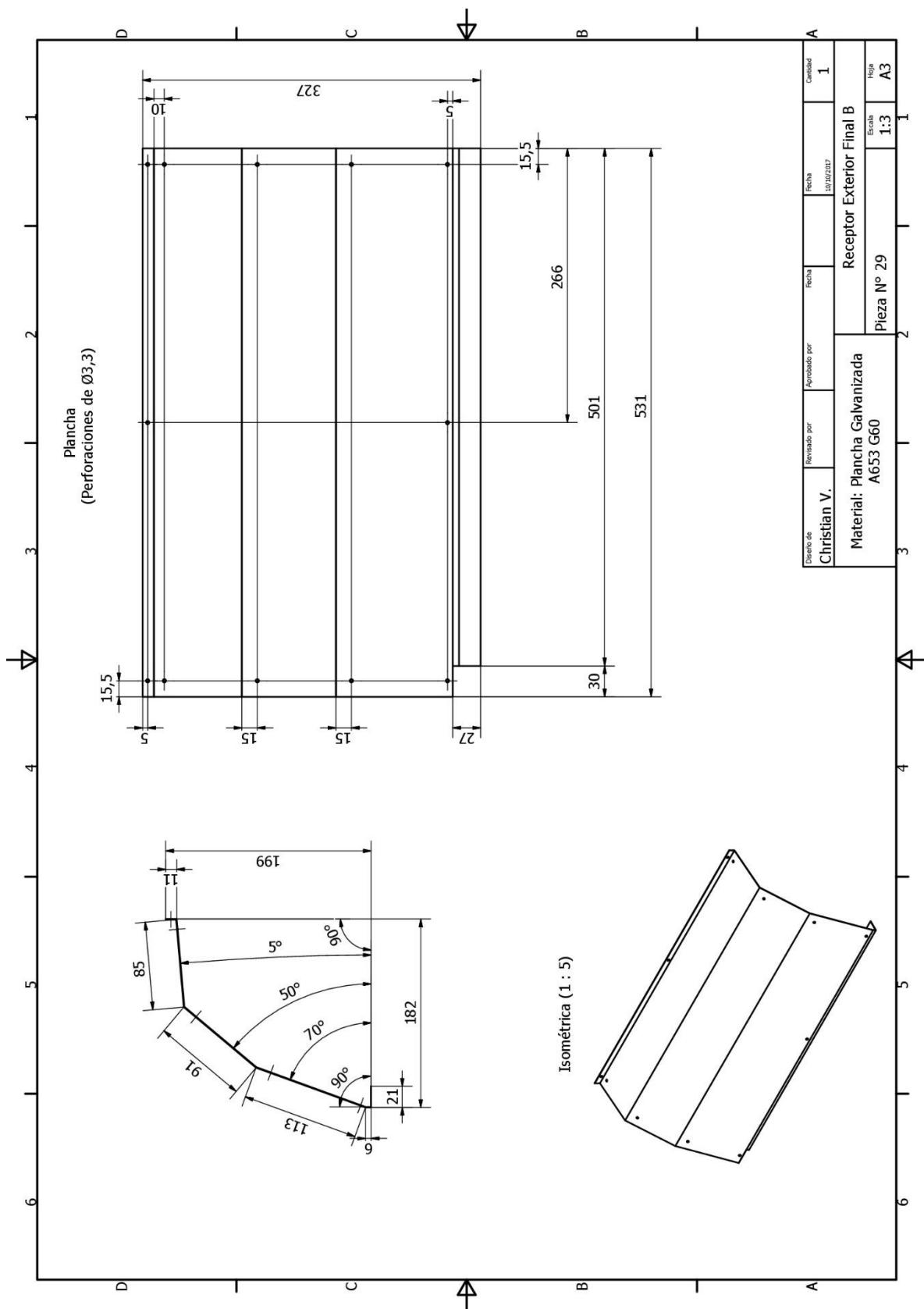


Ilustración 79: Plano de Pieza de Receptor Exterior Final B.

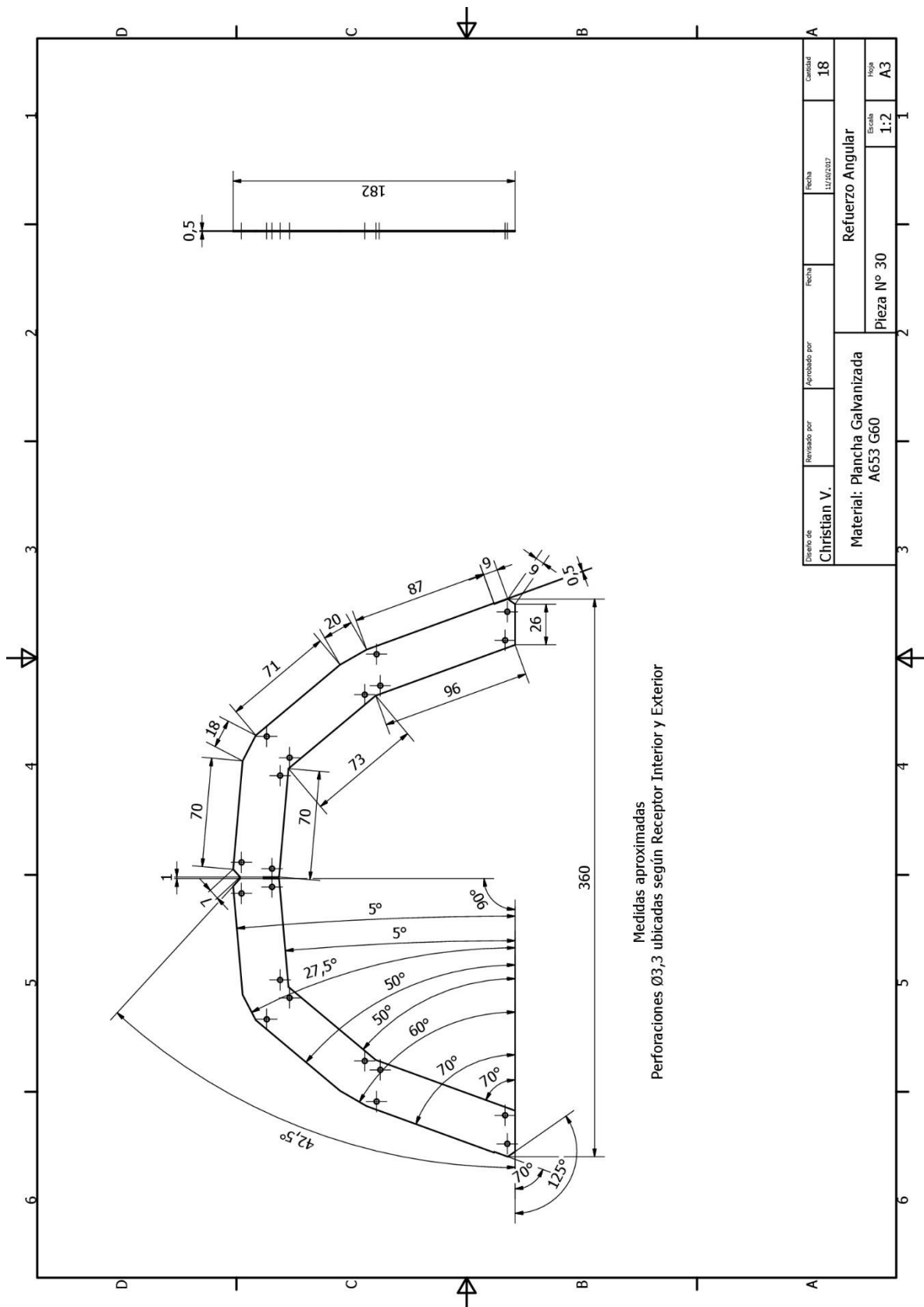


Ilustración 80: Plano de Piezas de Refuerzo Angular.

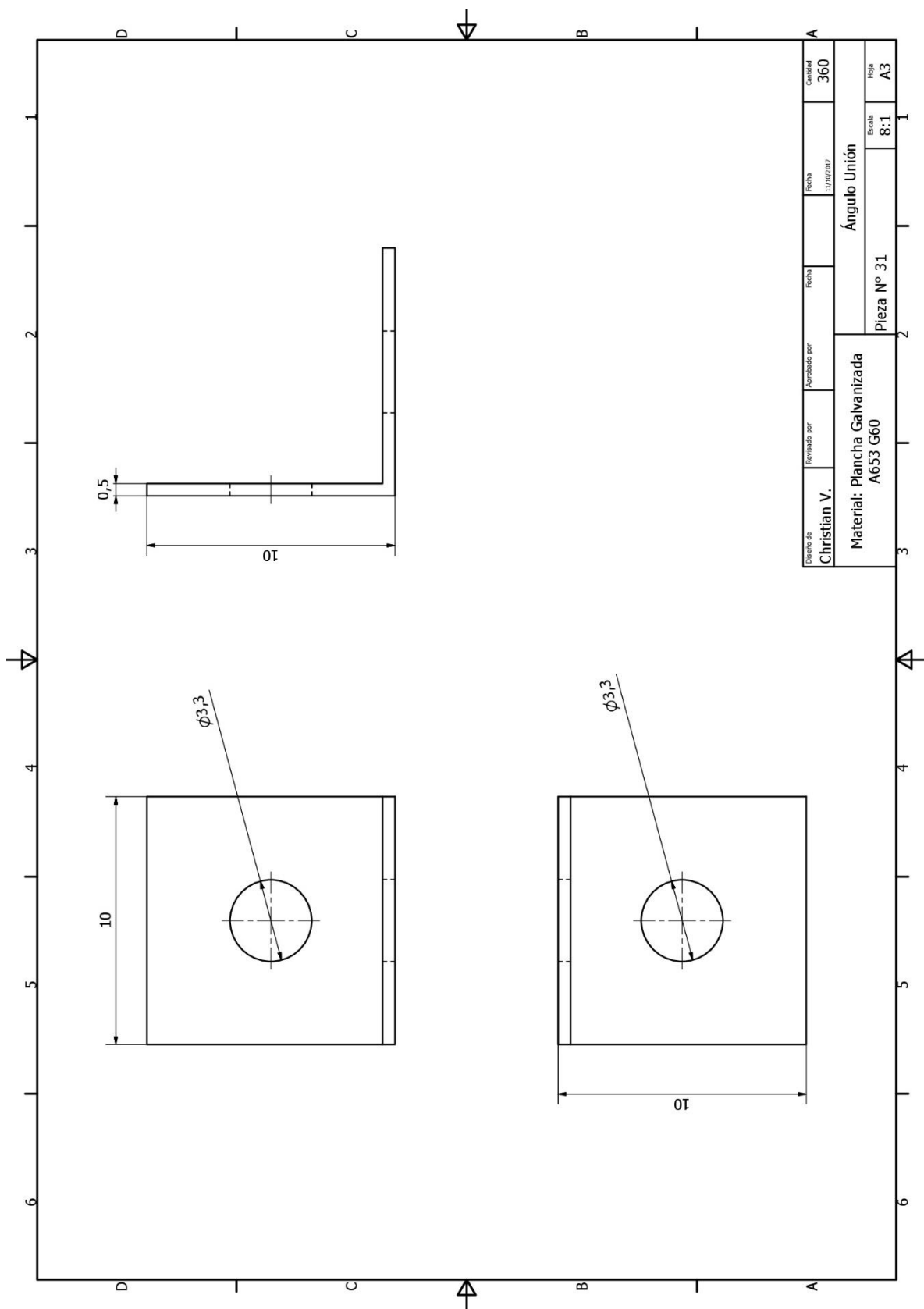


Ilustración 81: Plano de Pieza de Ángulo Unión.

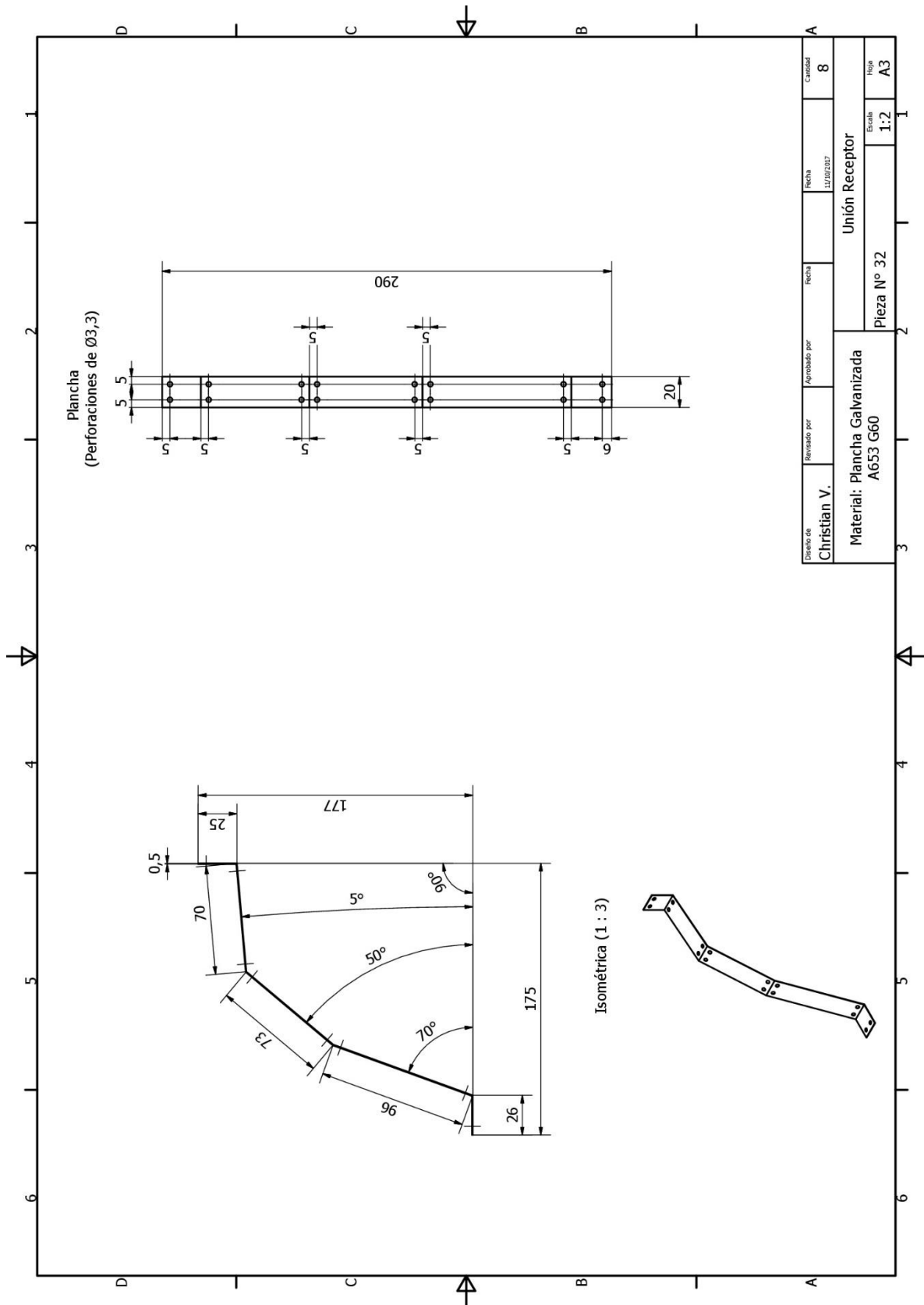


Ilustración 82: Plano de Pieza de Unión Receptor.

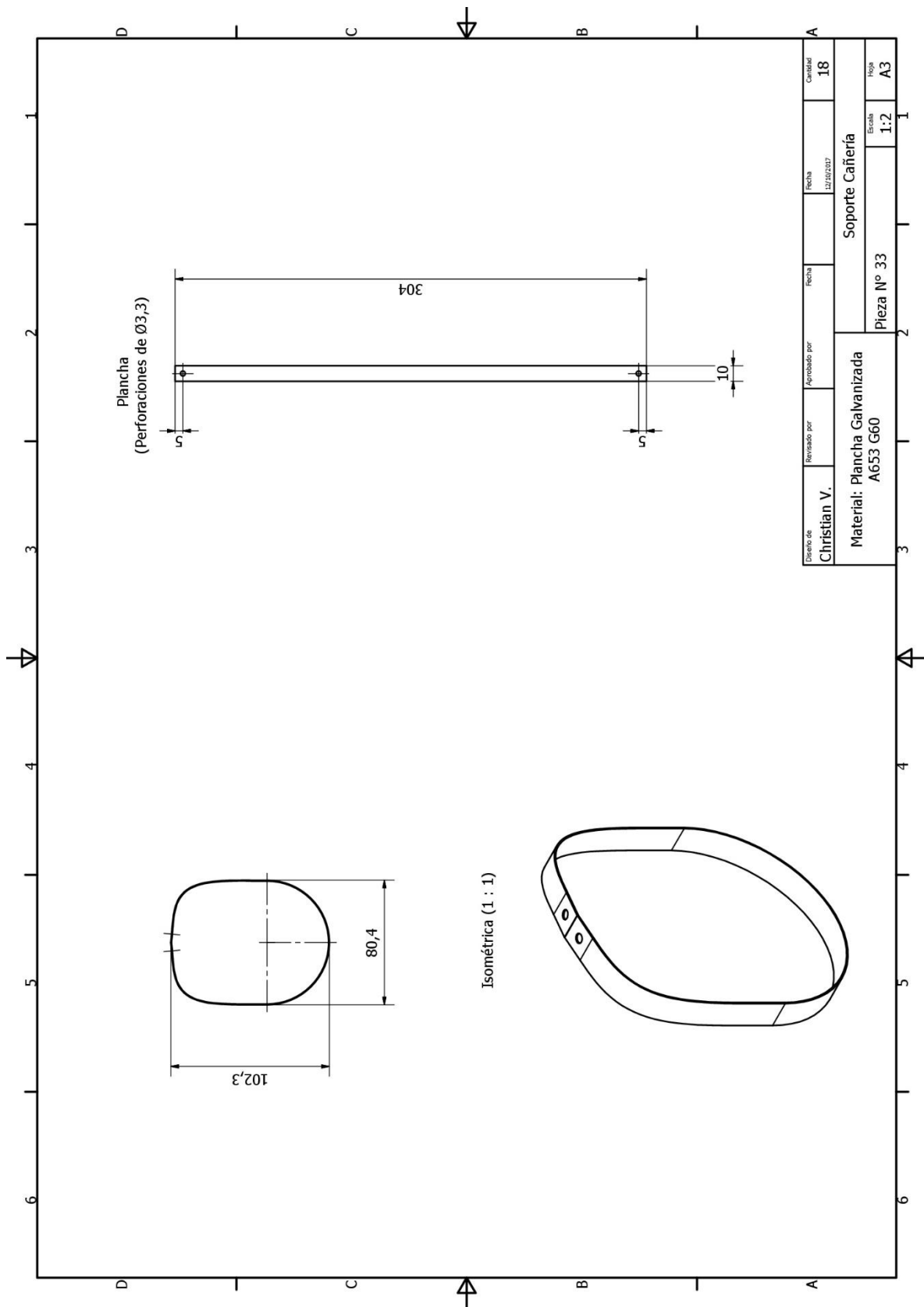
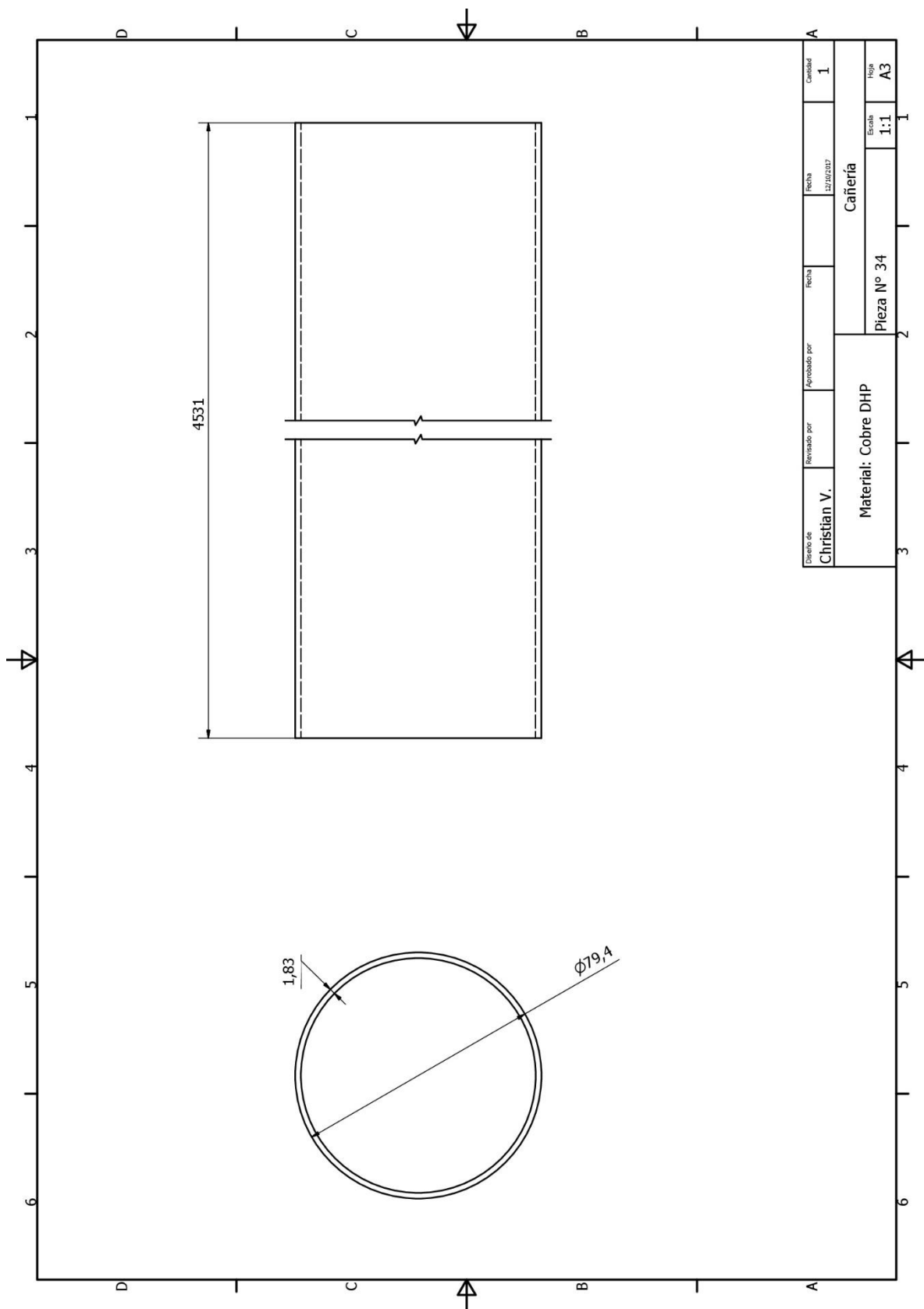


Ilustración 83: Plano de Pieza de Soporte Cañería.



Diseño de	Elaborado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Cantidad
Christian V.			12/02/2017		1
Cañería					
Material: Cobre DHP			Pieza N° 34	Escala	Hoja
				1:1	A3

Ilustración 84: Plano de Pieza de Cañería.

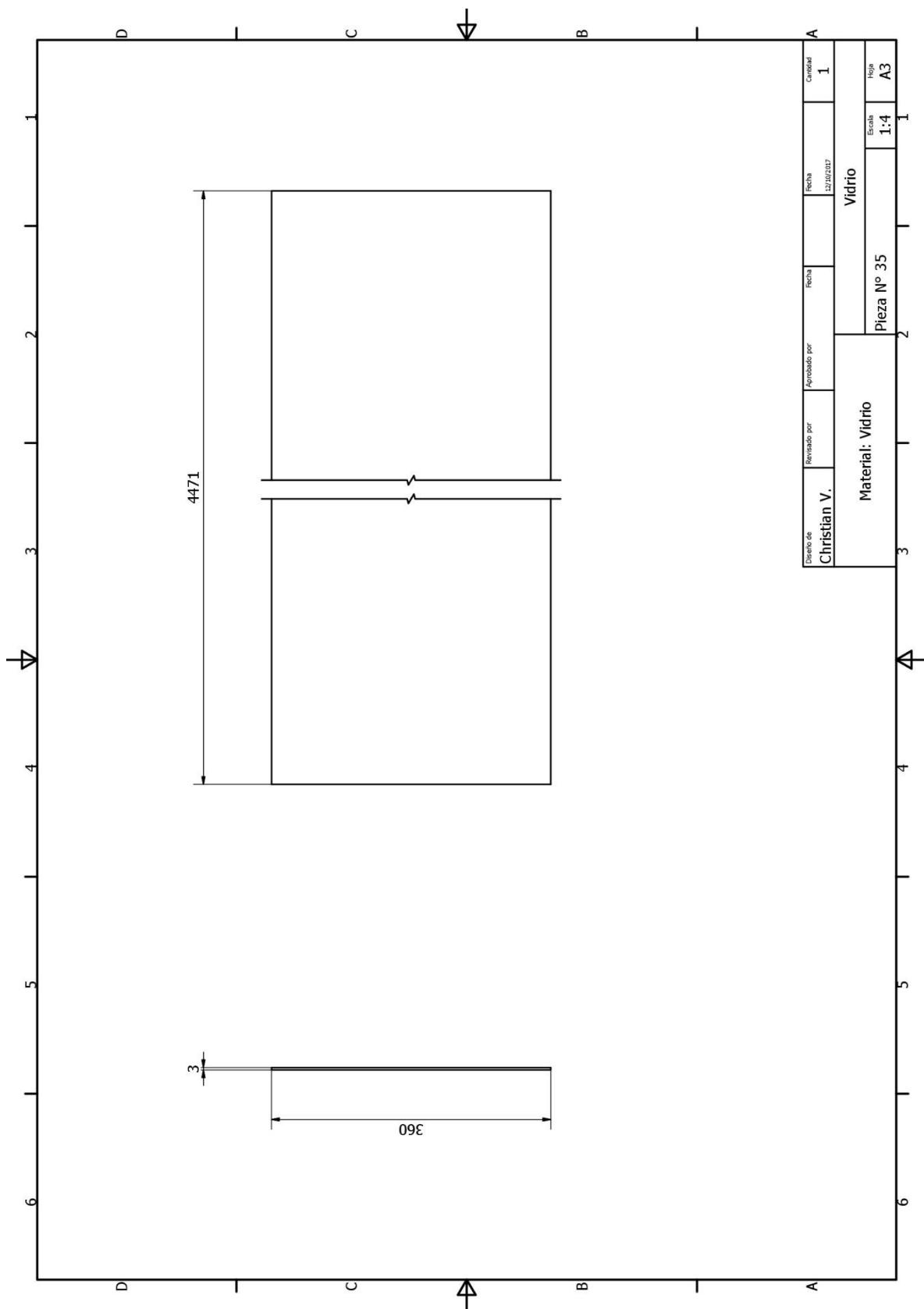


Ilustración 85: Plano de Pieza de Vidrio.

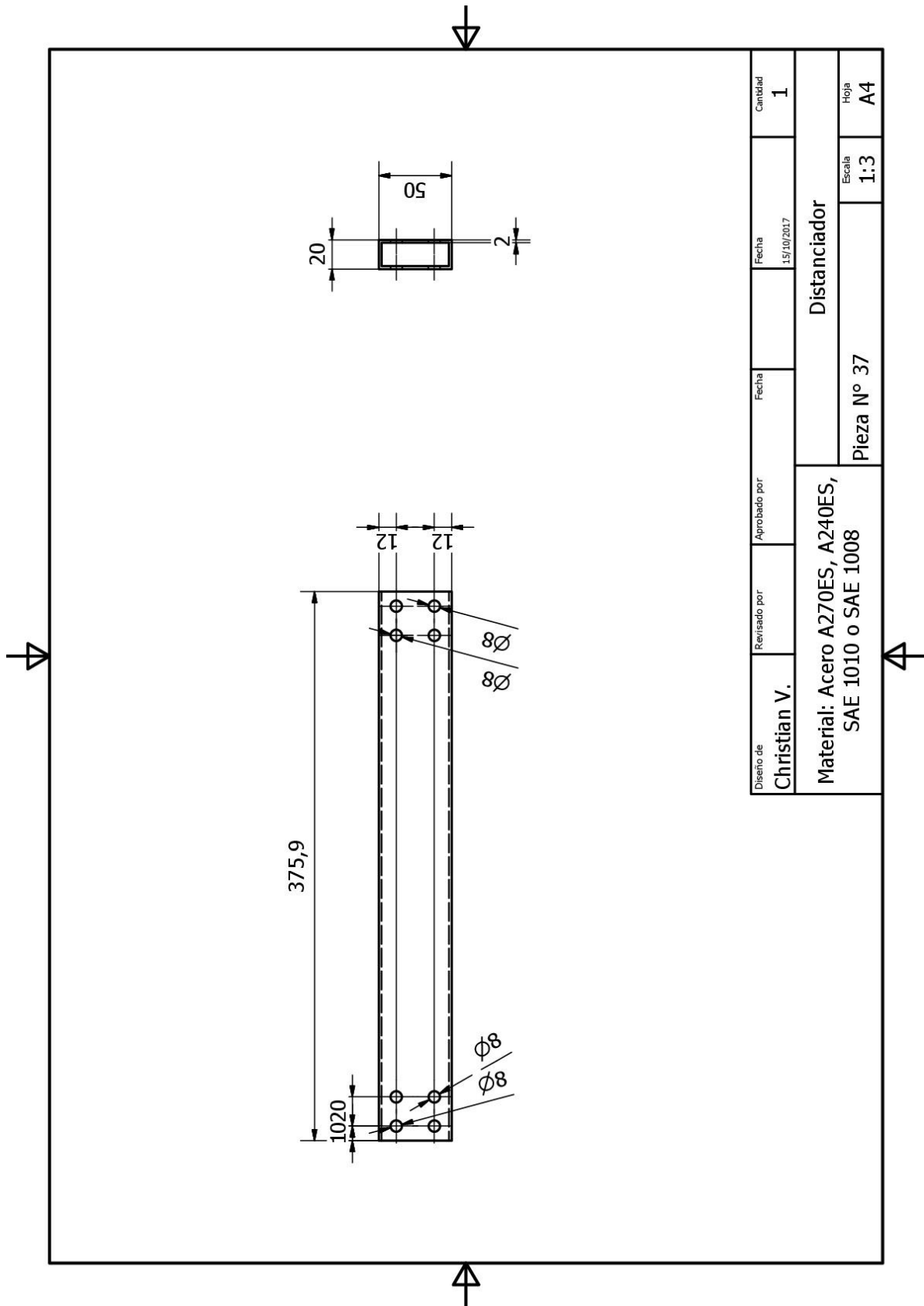


Ilustración 87: Plano de Pieza de Distanciador.

13.5 PLANOS DE ENSAMBLES

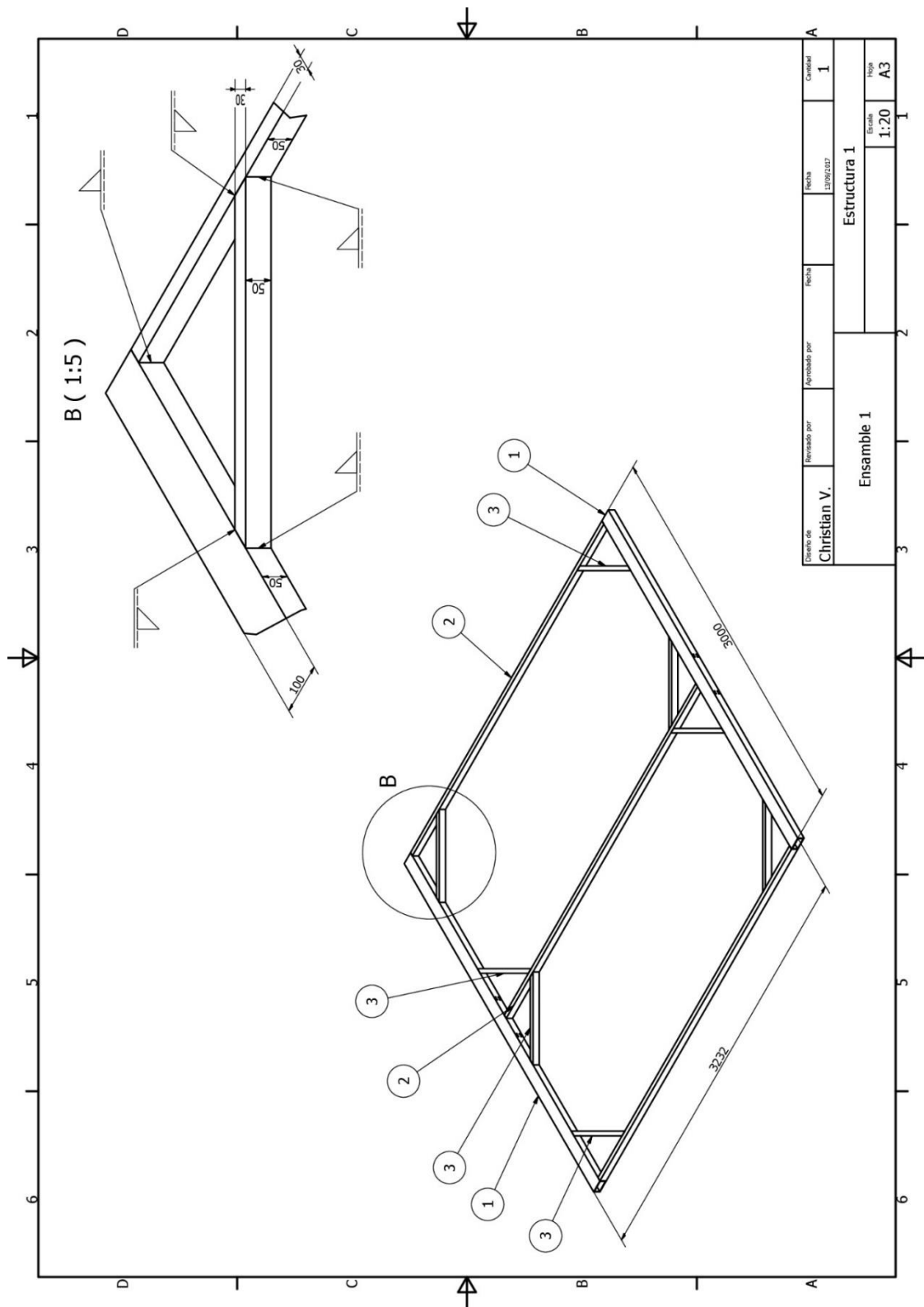
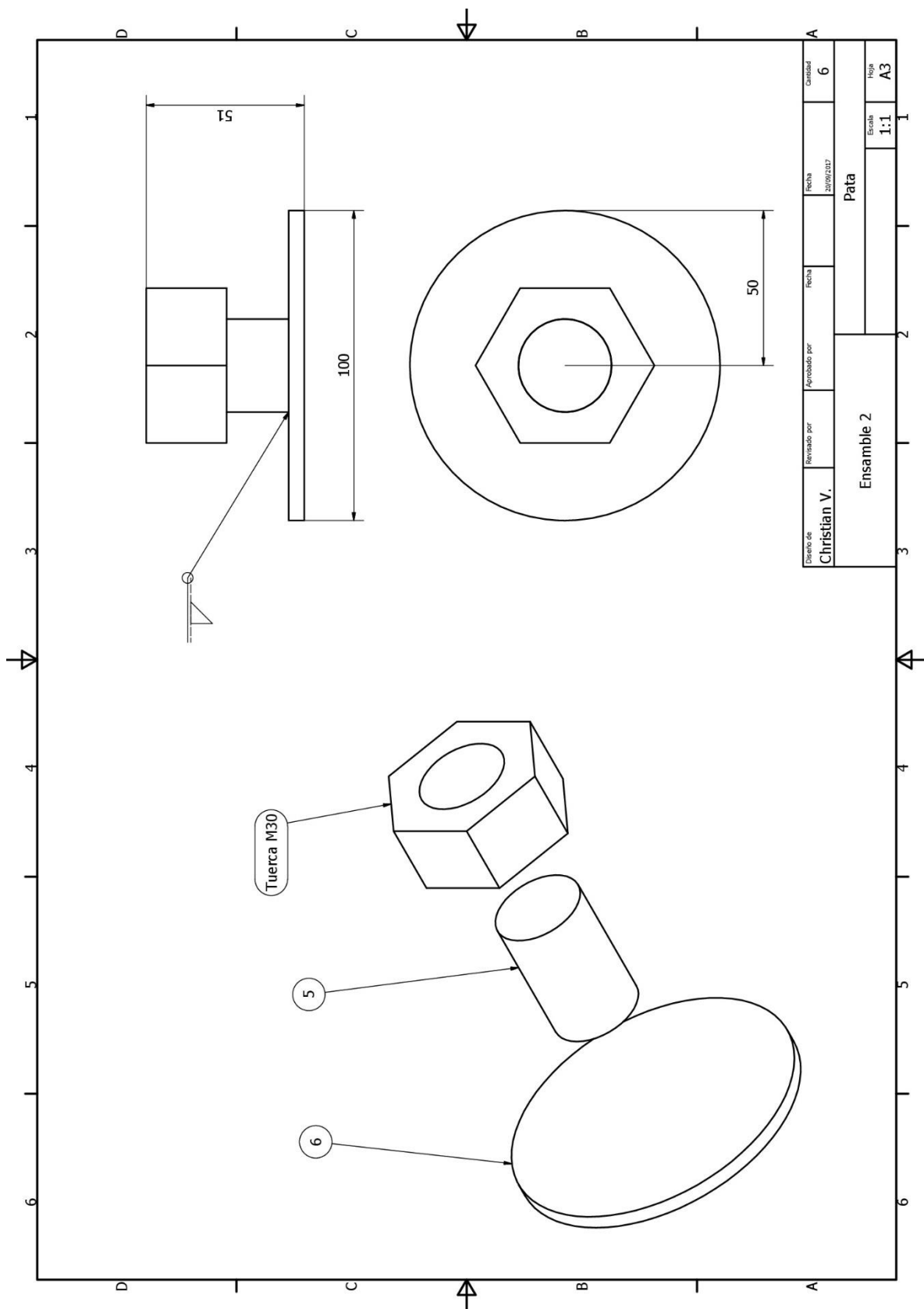


Ilustración 88: Plano de Ensamble 1- Estructura 1.



Diseño de	Christian V.	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Cantidad
					20/09/2017	6
Ensamble 2				Pata		
				Escala	Hoja	
				1:1	A3	

Ilustración 89: Plano de Ensamble 2 - Pata.

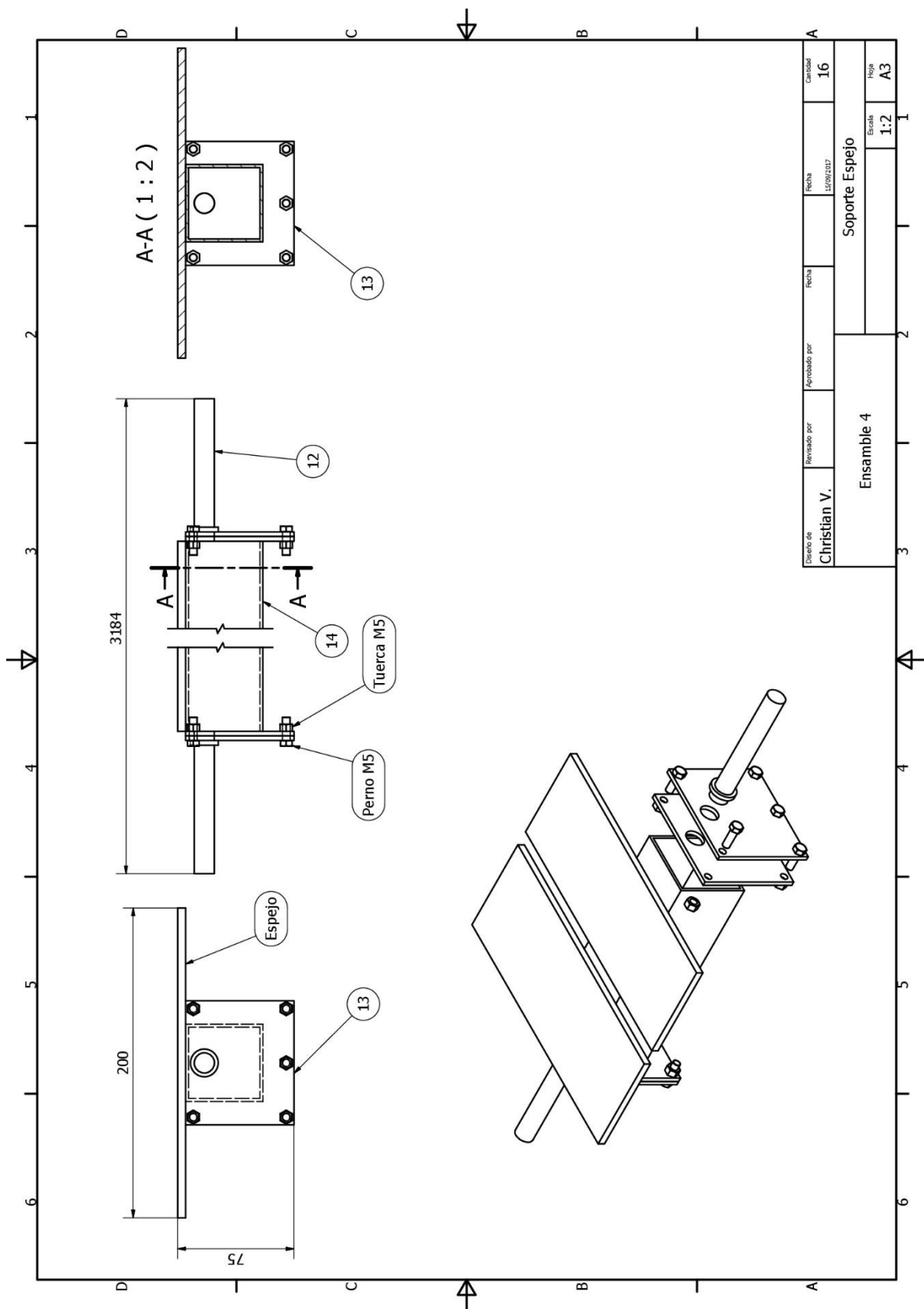


Ilustración 91: Plano de Ensamble 4 - Soporte Espejo.

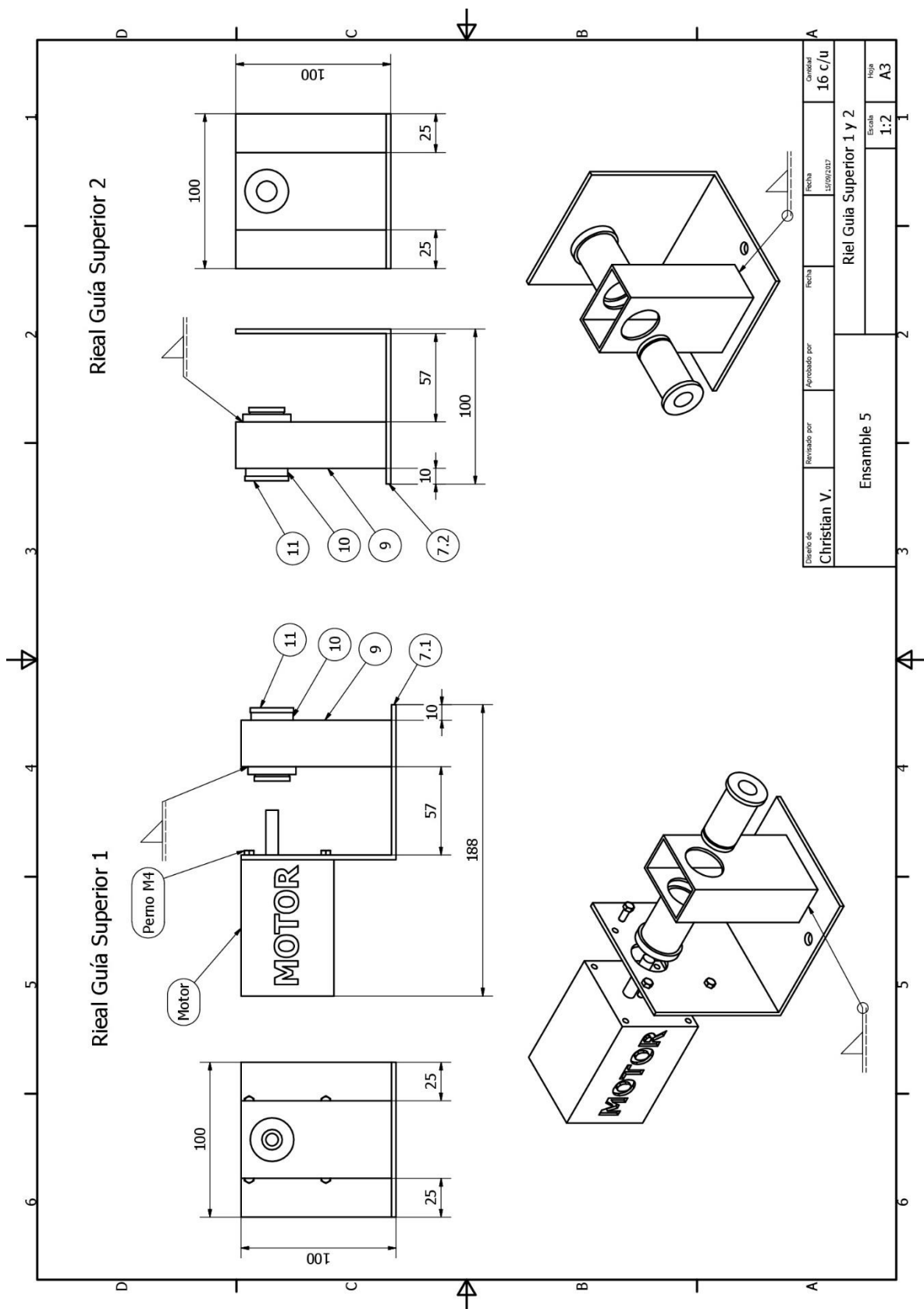
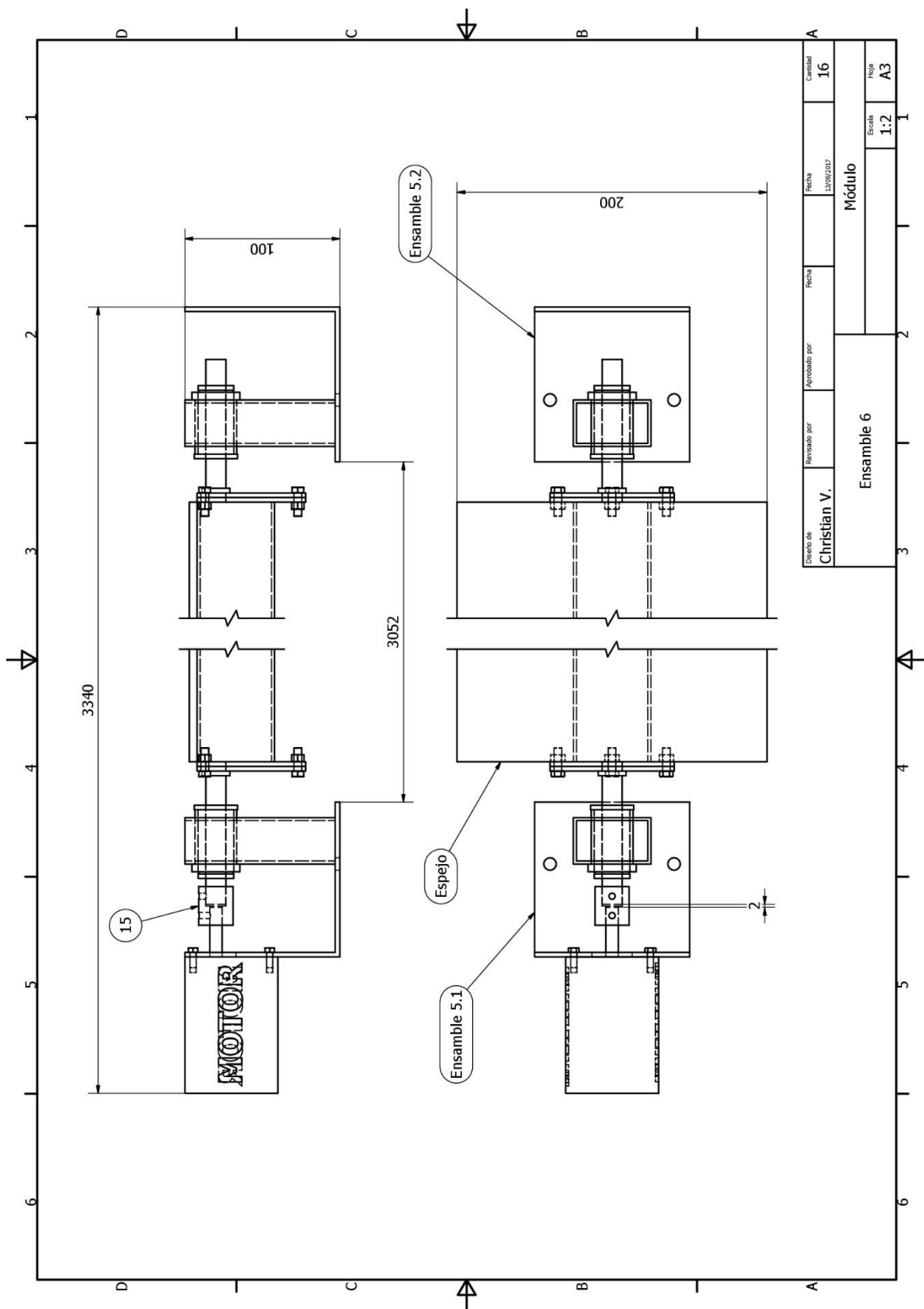


Ilustración 92: Plano de Ensamble 5 - Riel Guía Superior 1 y 2.



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	Cantidad
Christian V.			13/06/2017		16
Ensamble 6			Módulo		
			Escala	Hoja	
			1:2	A3	

Ilustración 93: Plano de Ensamble 6 - Módulo.

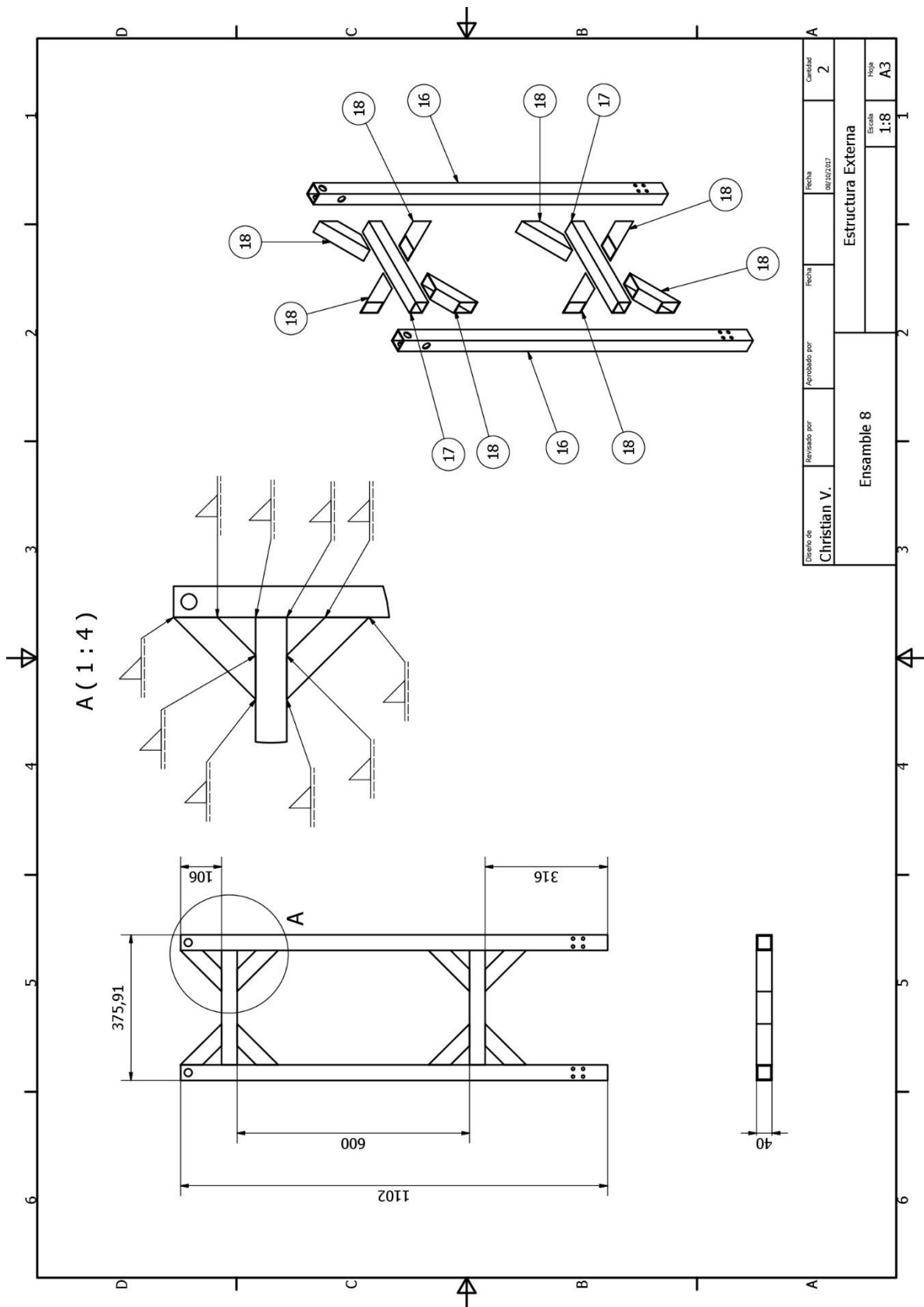


Ilustración 95: Plano de Ensamble 8 - Estructura Externa.

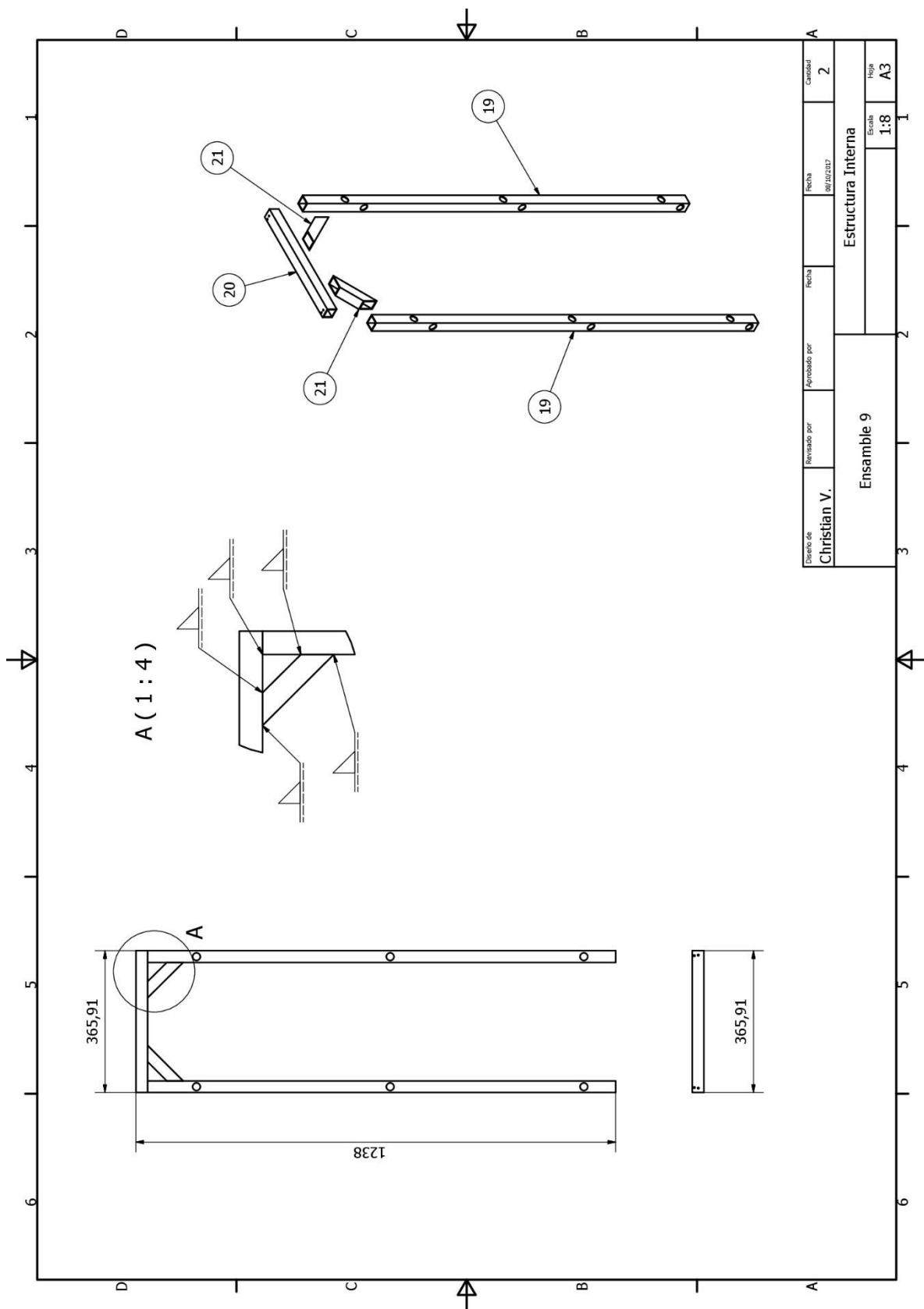


Ilustración 96: Plano de Ensamble 9 - Estructura Interna.

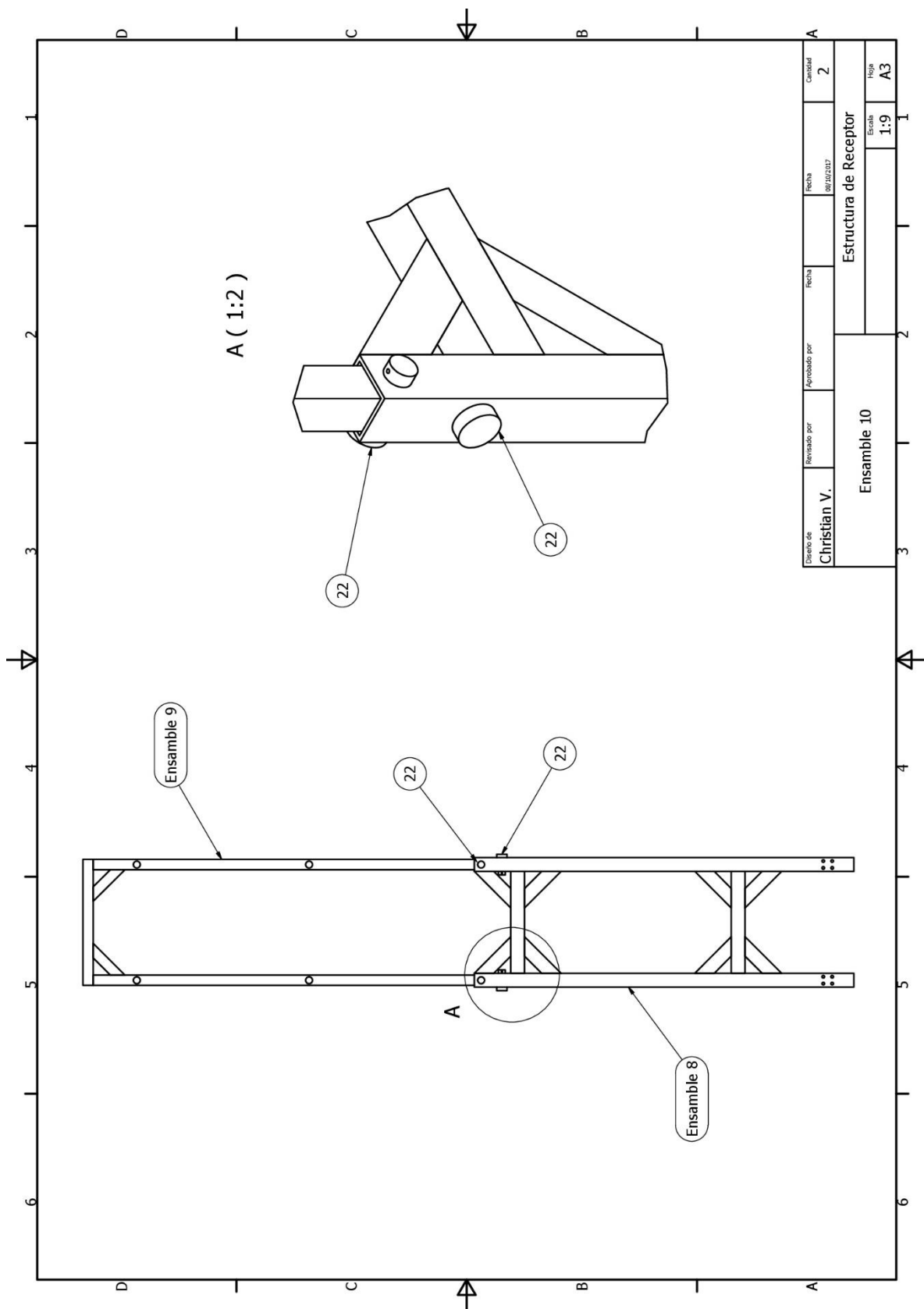
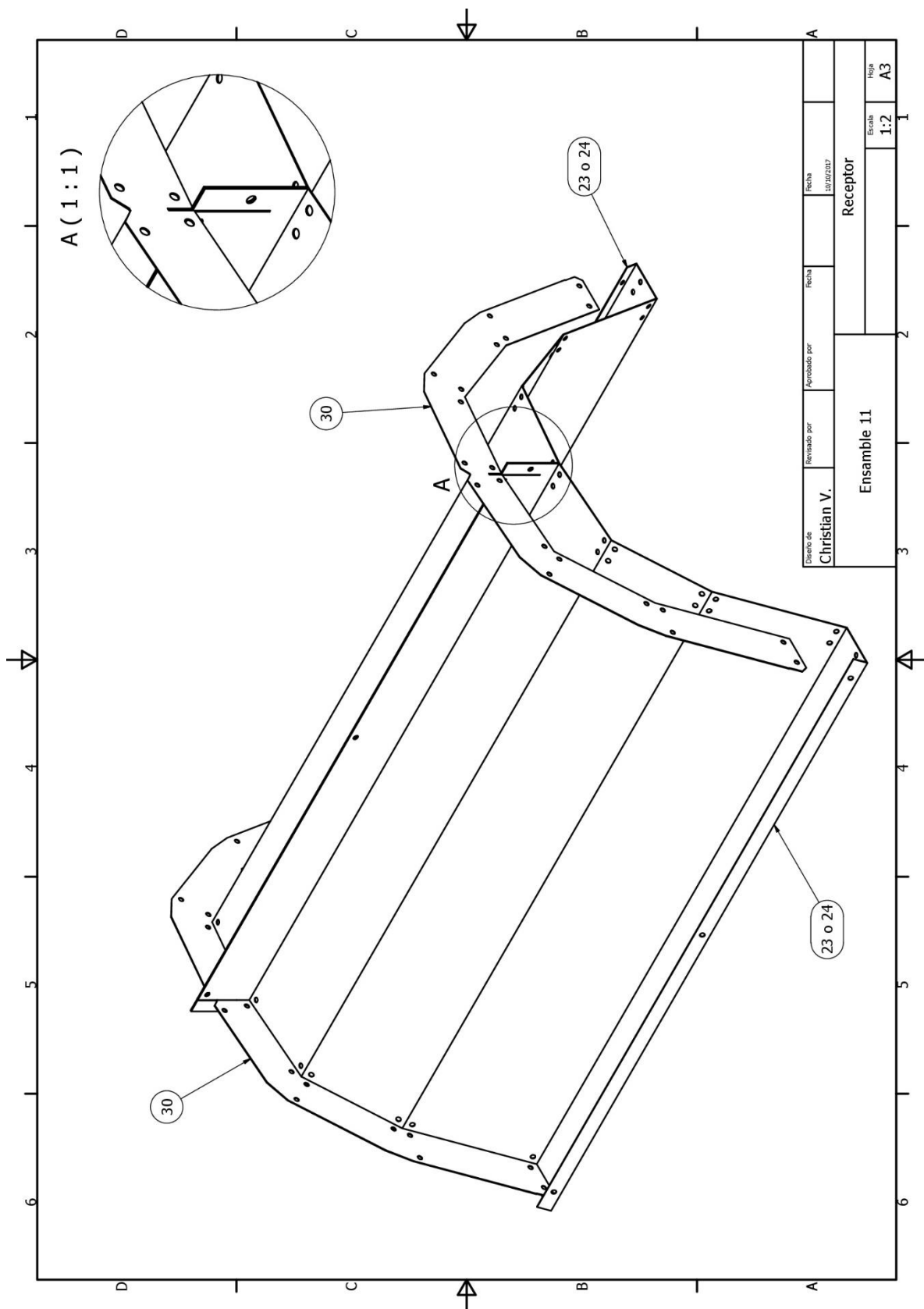


Ilustración 97: Plano de Ensamble 10 - Estructura de Receptor.



Diseño de		Revisado por		Aprobado por		Fecha		Fecha		Fecha	
Christian V.										19/10/2017	
Ensamble 11						Receptor					
						Escala		Hoja			
						1:2		A3			

Ilustración 98: Plando de Ensamble 11 - Receptor.

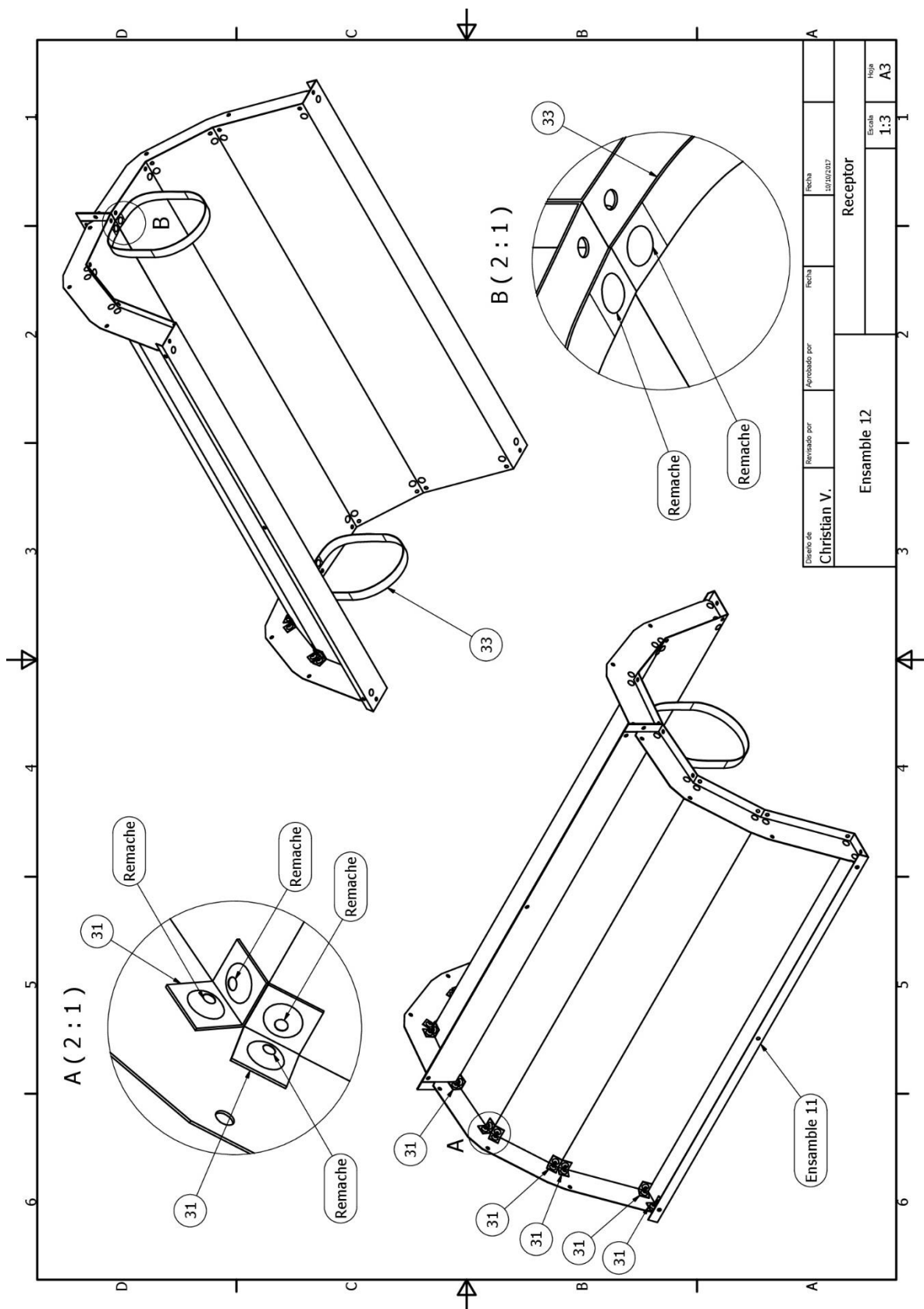


Ilustración 99: Plano de Ensemble 12 - Receptor.

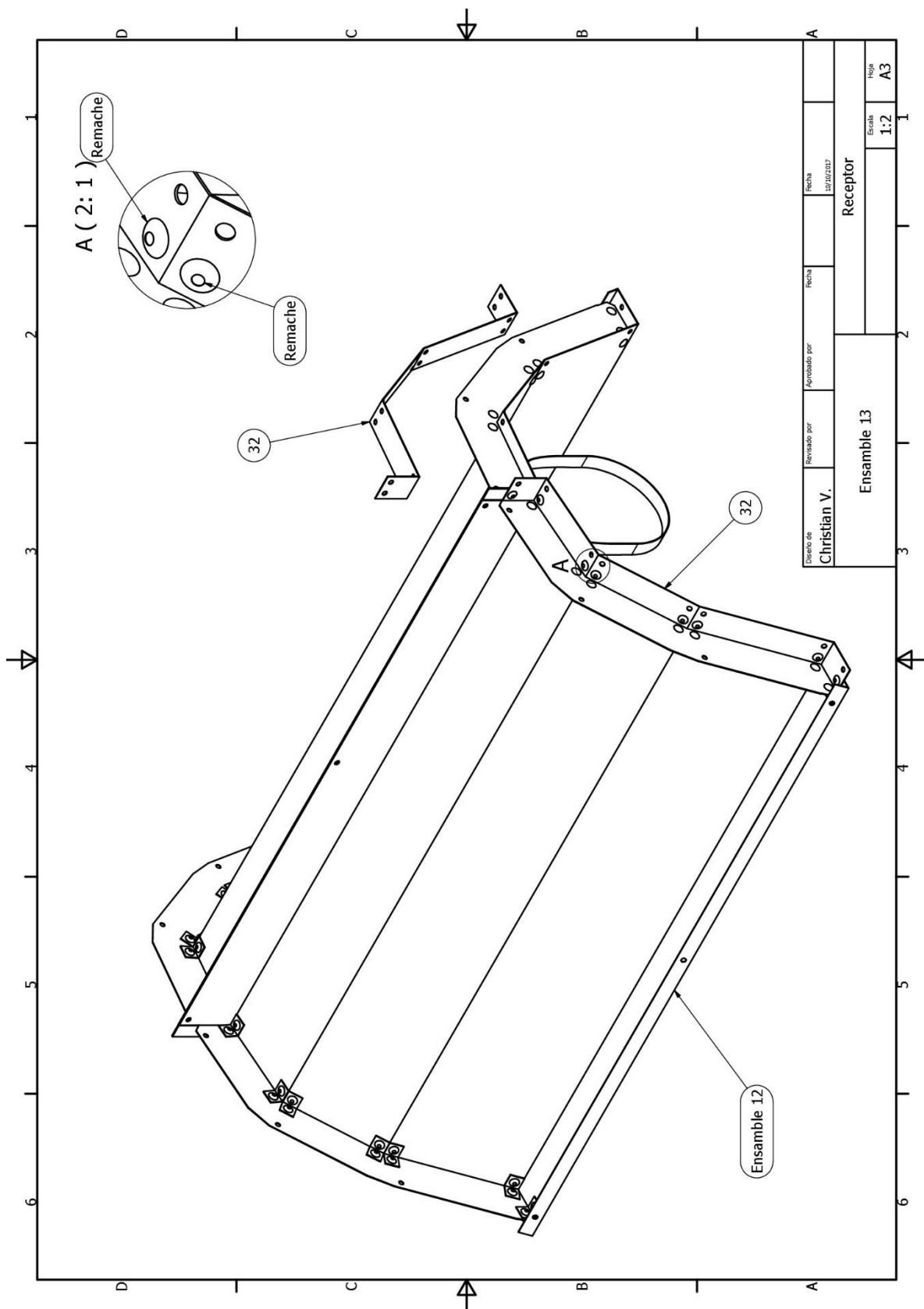


Ilustración 100: Plano de Ensamble 13 - Receptor.

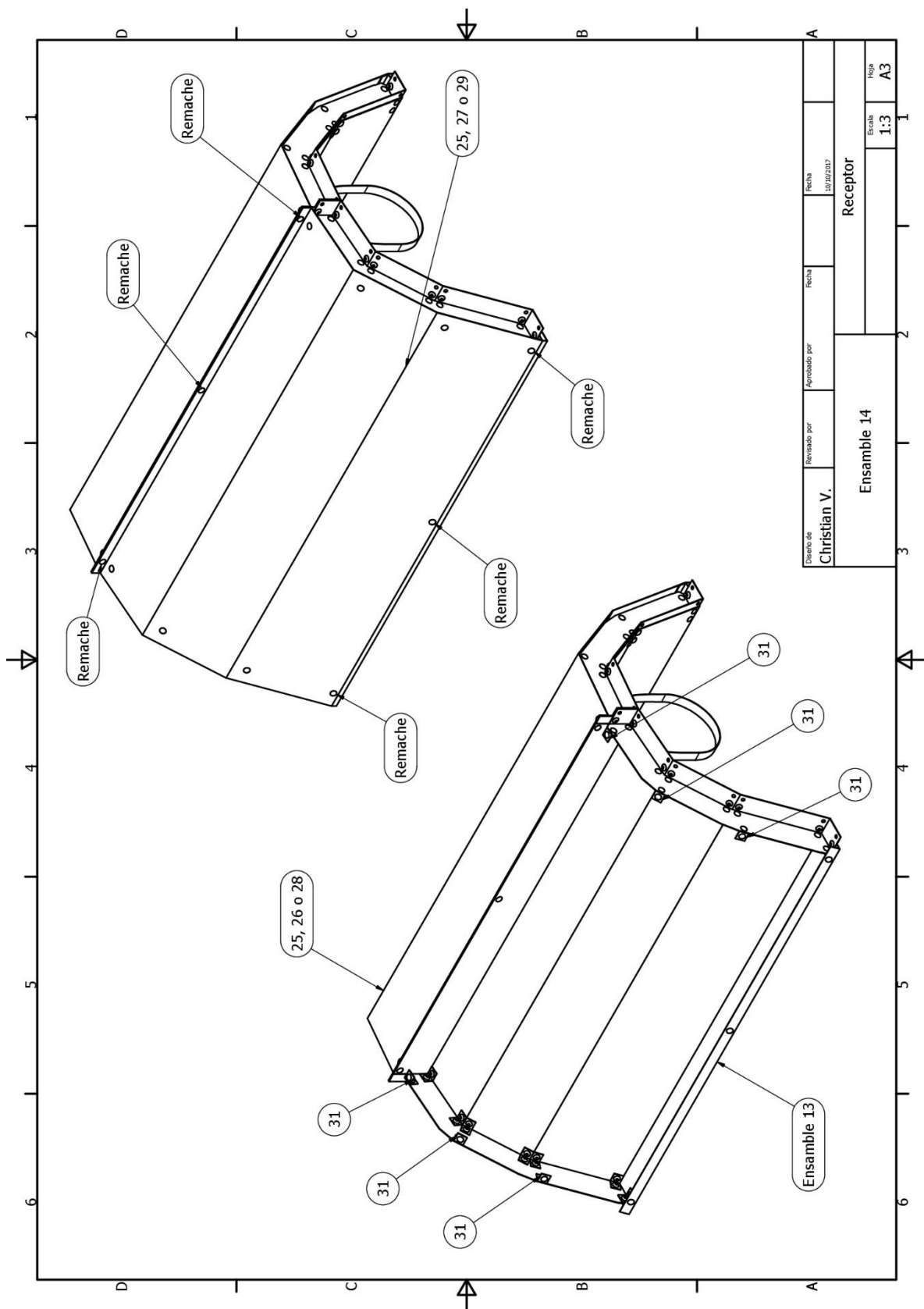


Ilustración 101: Plano de Ensamble 14 - Receptor.

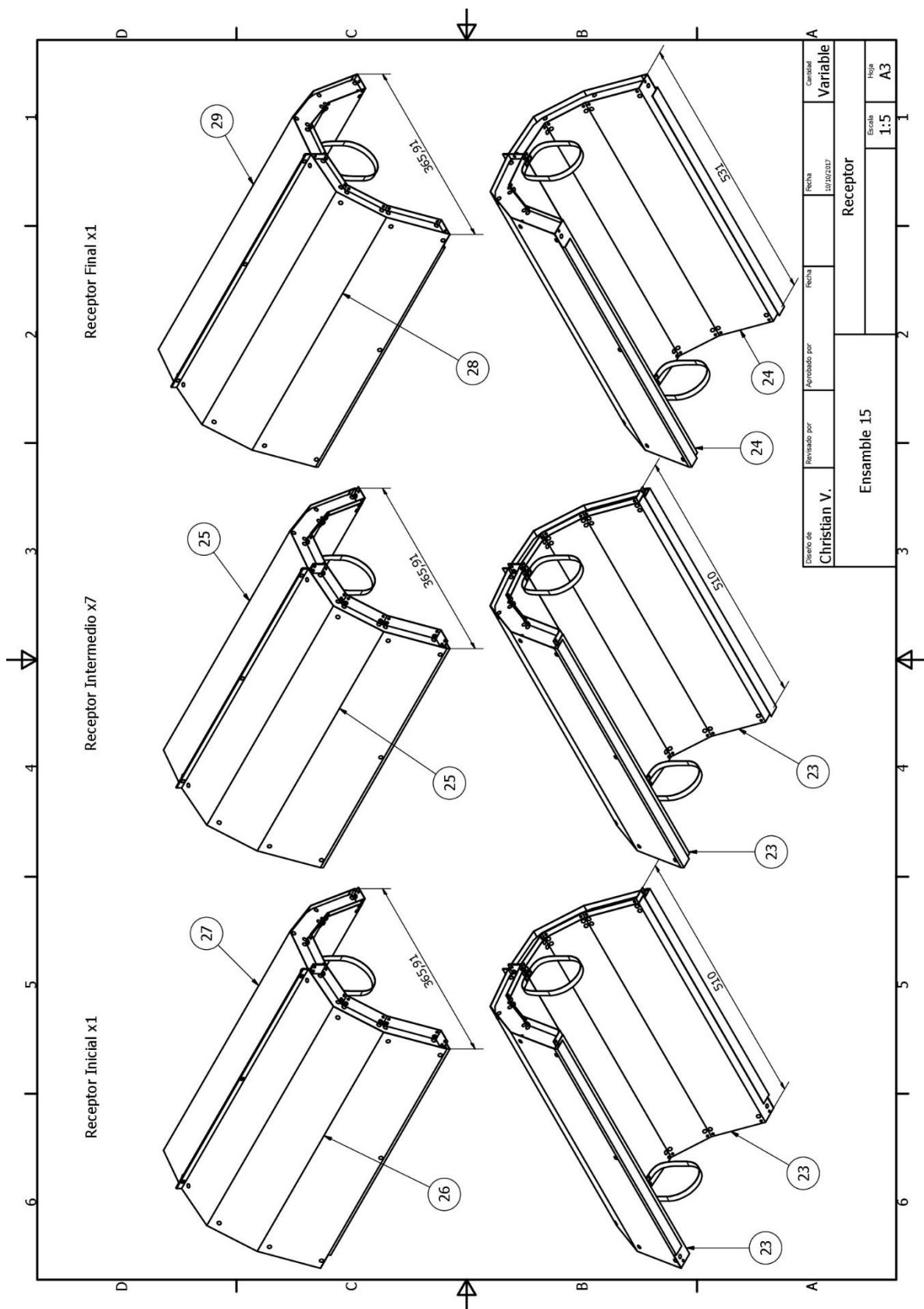


Ilustración 102: Plano de Ensemble 15 - Receptor.

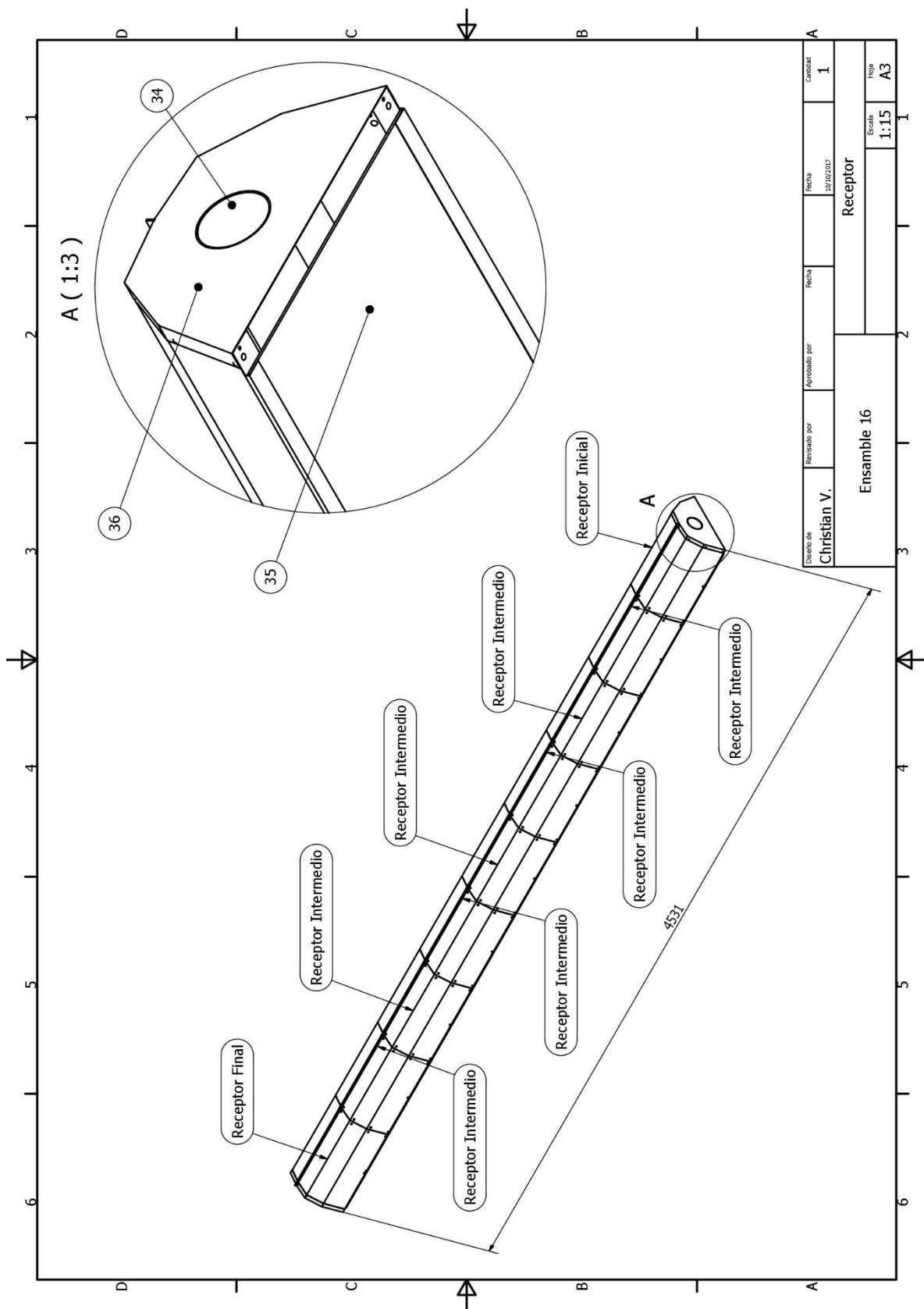


Ilustración 103: Plano de Ensamble 16 - Receptor.

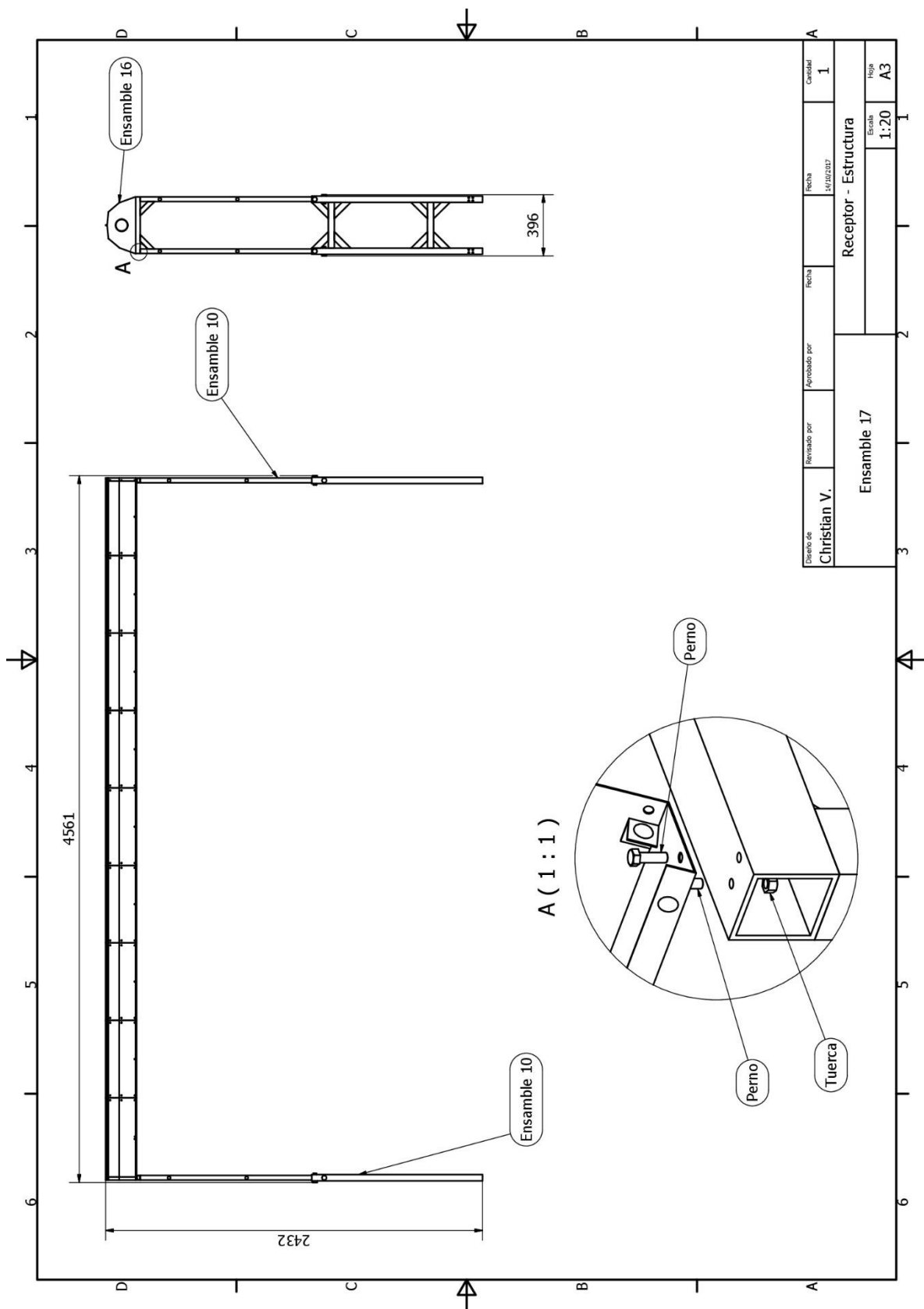


Ilustración 104: Plano de Ensamble 17 - Receptor - Estructura.

13.6 DETALLE DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

<i>Item</i>	<i>Valor</i>
1. Perfiles	\$ 234.690
1.1. Rectangular 100x50x4	\$ 35.000
1.2. Rectangular 50x30x2	\$ 26.370
1.3. Costanera 80x40x15x3	\$ 30.000
1.4. Angular 100x100x3	\$ 25.000
1.5. Cuadrado 50x50x2	\$ 83.920
1.6. Cuadrado 40x40x3	\$ 13.190
1.7. Cuadrado 40x40x2	\$ 8.550
1.8. Cuadrado 30x30x2	\$ 12.660
2. Componentes	\$ 775.248
2.1. Vidrio (3 mm)	\$ 27.000
2.2. Espejo (5 mm)	\$ 460.800
2.3. Tubo (Cañería)	\$ 2.560
2.4. Acero Cromo Niquel (19 mm)	\$ 18.236
2.5. Acero Cromo Niquel (30 mm)	\$ 5.069
2.6. Technyl (28 mm)	\$ 13.671
2.7. Duraluminio (22 mm)	\$ -
2.8. Cañería Cobre (3'')	\$ 220.012
2.9. Plancha Galvanizada (0,5 mm)	\$ 27.900
3. Electrónica	\$ 977.970
3.1. Arduino Mega	\$ 14.990
3.2. Display LCD 16x2	\$ 3.290
3.3. GPS	\$ 15.390
3.4. Multiplexor	\$ 3.500
3.5. Driver PAP	\$ 60.800
3.6. Motor PAP	\$ 880.000
Total	\$ 1.987.908

Ilustración 106: Detalle de costos de adquisición.

14 REFERENCIAS

- [1] G. S. Walker, "Development of a low cost linear fresnel solar concentrator," Thesis, Stellenbosch : Stellenbosch University, 2013.
- [2] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, 2013.
- [3] Spencer, J. W., "Fourier Series Representation of the Position of the Sun," 1971.
- [4] "Solar Hot Water | Energywise Living." [Online]. Available: http://www.energywiseliving.com.au/solar_hot_water.html. [Accessed: 14-Jun-2017].
- [5] "Solar Thermal Energy: Solar Thermal vs. Photovoltaic." [Online]. Available: http://www.solar-thermal.com/solar_vs_pv.html. [Accessed: 14-Jun-2017].
- [6] "How Solar Power Works - Sustainable Solar Services," *Solar Panels Melbourne*. .
- [7] "Industrial Solar: Fresnel Collector." [Online]. Available: <http://www.industrial-solar.de/content/>. [Accessed: 03-Jul-2017].
- [8] M. Gunther, "Linear Fresnel Technology," *Adv. CSP Teach. Mater. Enermena*, 2013.
- [9] D. A. Häberle, "Linear Fresnel Collectors linear Fresnel collector," in *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, R. A. Meyers, Ed. Springer New York, 2012, pp. 6031–6037.
- [10] "La Tecnología CSP Fresnel," *4E Chile*. .
- [11] R. Abbas, "Towards cost reduction in Concentrating Solar Power: Innovative design for an efficient Fresnel based solar field."
- [12] C. Zahler, T. Schwind, A. Häberle, and M. Berge, "Direct steam production in a linear concentrating Fresnel collector," *ESTEC Conf.*, 2009.
- [13] R. Leutz and A. Suzuki, "Nonimaging Fresnel Lenses Design and Performance of Solar Concentrators," 2001.
- [14] M. Eck, R. Uhlig, M. Mertins, A. Häberle, and H. Lerchenmüller, "Thermal Load of Direct Steam-Generating Absorber Tubes with Large Diameter in Horizontal Linear Fresnel Collectors," *Heat Transf. Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 42–48, Jan. 2007.
- [15] M. Rebelo B. and S. Salazar M., "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN COLECTOR SOLAR LINEAL DE FRESNEL PARA LA PRODUCCIÓN DE VAPOR EN BASE A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE QUITO," Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2015.
- [16] "Ribbon-cutting for the first Italian CSP Fresnel plant in the agrobusiness," *Csp-f Solar*, 20-May-2015. .
- [17] M. J. Montes, C. Rubbia, R. Abbas, and J. M. Martínez-Val, "A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power," *Energy*, vol. 73, pp. 192–203, Aug. 2014.
- [18] A. Häberle *et al.*, "The Solarmundo line focussing Fresnel collector. Optical and thermal performance and cost calculations," in *Proceedings of the International Symposium on*

Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, SolarPACES, Zürich, Sep, 2002, pp. 4–6.

- [19] “Solar Collector Efficiency - Apricus Solar Water Heater.” [Online]. Available: http://www.apricus.com/html/solar_collector_efficiency.htm#.WUfh_Gg1_IU. [Accessed: 20-Jun-2017].
- [20] Beer, Johnston, Mazurek, and Eisenberg, *MECANICA VECTORIAL PARA INGENIEROS ESTATICA*, Edición: 9. México; Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2013.
- [21] F. Beer, E. Johnston, J. Dewolf, and D. Mazurek, *MECANICA DE MATERIALES*, Edición: 6. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2013.
- [22] R. C. Hibbeler, *MECANICA DE MATERIALES*, Edición: 8. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2011.
- [23] “Cintac | Planchas, Vigas, Perfiles, Cañerías y Tubulares de Acero.” [Online]. Available: <http://www.cintac.cl/>. [Accessed: 07-Aug-2017].
- [24] “Impovar S.A Cañerías de Cobre.” [Online]. Available: <http://www.impovar.cl/>. [Accessed: 03-Sep-2017].
- [25] “Cobre profesional.” [Online]. Available: <http://elcobre.com/>. [Accessed: 03-Sep-2017].
- [26] D. M. E. Otero, “Aceros Otero. Venta de aceros y metales, soldaduras, herramientas, maquinas y equipos.” [Online]. Available: <http://www.acerosotero.cl/>. [Accessed: 01-Sep-2017].
- [27] “Propiedades del vidrio,” *Saint-Gobain Sekurit*. [Online]. Available: <http://www.saint-gobain-sekurit.com/es/glosario/propiedades-del-vidrio>. [Accessed: 05-Aug-2017].
- [28] “Tutoriales Arduino | Ejemplos, documentación y piezas.” [Online]. Available: <http://www.prometec.net/>. [Accessed: 16-Aug-2017].
- [29] R. A. Serway and J. W. Jewett Jr, *Física para Ciencias e Ingeniería*, 7 Tra edition., vol. 1, 2 vols. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., 2008.
- [30] L. G. Kraige and J. L. Meriam, *Mecanica Para Ingenieros*, Tercera. Barcelona: Reverte, 2000.
- [31] “Mecanica Plastica Ltda. – Plásticos Técnicos.” [Online]. Available: <http://www.mecanicaplastica.cl/>. [Accessed: 31-Aug-2017].
- [32] P. J. Pritchard, *Fox and McDonald’s Introduction to Fluid Mechanics*, 8 edition. Hoboken, NJ : Chichester: Wiley, 2011.
- [33] “Meteored.” [Online]. Available: <https://www.meteored.cl/>. [Accessed: 31-Aug-2017].