

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



"Diseño y fabricación de un prototipo de destilador solar para
agua marítima"

Trabajo de graduación presentado por Ian André Quan Castillo para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica
Industrial

Guatemala
2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



"Diseño y fabricación de un prototipo de destilador solar para
agua marítima"

Trabajo de graduación presentado por Ian André Quan Castillo para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica
Industrial

Guatemala
2023

Vo.Bo.:



(f)

Ing. Gustavo Barrera

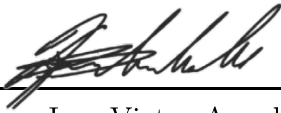
Tribunal Examinador:



(f)

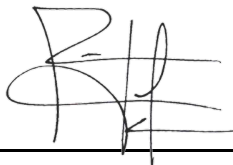
Ing. Gustavo Barrera

(f)



Ing. Victor Ayerdi

(f)



Ing. Rony Herrarte

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de enero de 2023.

Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	XI
Resumen	XIII
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Marco teórico	7
4.1. Recurso hídrico	7
4.2. Recurso solar	8
4.2.1. Potencial solar en Guatemala	9
4.3. Desalinización como fuente de agua potable	10
4.4. Principales tecnologías de desalinización	11
4.4.1. Evaporación instantánea multietapa (MSF)	11
4.4.2. Destilación multiefecto (MED)	12
4.4.3. Destilación por compresión de vapor (VCD)	12
4.4.4. Electrodiálisis/Electrodiálisis invertida (ED/EDR)	13
4.4.5. Ósmosis Inversa (RO)	14
4.4.6. Destilación solar (SD)	14
4.4.6.1. Proceso de funcionamiento	15
4.4.6.2. Tipos de destiladores solares	16
5. Metodología	21
5.1. Descripción de metodología	21
5.2. Definición de requisitos	23
5.3. Diseño	24

5.3.1.	Diseño conceptual	24
5.3.2.	Superficie de condensación y estructura	25
5.3.3.	Depósito o superficie de recolección de destilado	31
5.3.4.	Estructura de soporte	32
5.3.5.	Base de unión	33
5.3.6.	Bandeja de evaporación	34
5.3.7.	Selección de materiales	35
5.3.7.1.	Placas condensador	35
5.3.7.2.	Estructura de soporte, domo y base de unión	36
5.3.7.3.	Bandeja de evaporación	36
5.3.8.	Selección de sistema de alimentación	37
5.4.	Cálculos	40
5.4.1.	Cálculos geométricos	40
5.4.2.	Cálculos de resistencia	56
5.5.	Simulación y análisis	63
5.6.	Diseño y fabricación del prototipo	65
5.6.1.	Diseño del prototipo	67
5.6.1.1.	Dimensionamiento de las varillas	68
5.6.1.2.	Ensamble de domo en Autodesk Inventor ®	72
5.6.1.3.	Diseño e impresión de soportes para prensado de piezas	73
5.6.2.	Corte, lijado y perforación de varillas	77
5.6.3.	Ensamble de prototipo del domo	79
6.	Resultados	81
6.1.	Análisis de elementos finitos Matlab	81
6.2.	Análisis de elementos finitos ANSYS	82
6.3.	Factor de seguridad mínimo	83
6.4.	Porcentajes de error Matlab/ANSYS	83
6.5.	Prototipo de superficie de condensación	84
7.	Discusión de resultados	87
8.	Conclusiones	89
9.	Recomendaciones	91
10.	Bibliografía	93
11.	Anexos	97
11.1.	Matrices de elementos	97
11.2.	Mapa de irradiación en Guatemala	100
11.3.	Varas diseño inicial	101
11.4.	Geometría o acabado esperado	102
11.5.	Realización de cortes y perforación de varillas	103
11.6.	Soportes para prensado de varillas	108
11.7.	Prensado y ensamble de varillas	109
11.8.	Código de Matlab	111
11.9.	Planos de construcción	114

Lista de figuras

1.	Incidencia de la radiación solar en la superficie terrestre	8
2.	Participación porcentual de generación eléctrica mundial	8
3.	Diagrama esquemático de una unidad MSF	11
4.	Diagrama esquemático de una unidad MED	12
5.	Diagrama esquemático de una unidad VCD	12
6.	Diagrama esquemático de una unidad ED	13
7.	Diagrama esquemático de una unidad RO	14
8.	Diagrama esquemático de una unidad SD	15
9.	Ciclo natural del agua	16
10.	Destilador de vertiente simple	16
11.	Destilador de vertiente doble	17
12.	Destilador piramidal	17
13.	Destilador esférico	18
14.	Destilador escalonado	18
15.	Destilador multietapa	19
16.	Diseño conceptual de destilador solar	24
17.	Cúpula semiesférica de acrílico	25
18.	Domo formado por estructura en forma de arcos y planchas cuadradas	26
19.	Domo geodésico con estructura metálica y cubierta transparente	26
20.	Domo geodésico del Jardín Botánico de Missouri	27
21.	Diseño preliminar, estructura de domo en perfiles redondos, frecuencia II	28
22.	Diseño final, estructura de domo en perfiles T, frecuencia II	29
23.	Unión de 5 aristas, vista isométrica y vista de planta	30
24.	Unión de 6 aristas, vista isométrica y vista de planta	30
25.	Depósito inferior con forme de pirámide	31
26.	Depósito termoformado de acrílico, con endecágono como base	31
27.	Pata individual para soporte destilador	32
28.	Estructura de soporte para destilador	32
29.	Base de unión plana	33
30.	Soportes T para ensamble con bandeja de evaporación	33
31.	Bandeja de evaporación a partir de una sola lámina	34
32.	Detalle de la ranura a cada lado para ensamble con soportes T de la base	34

33.	Funcionamiento de válvula flotante, vista seccionada	38
34.	Válvula flotante	38
35.	Instalación con garrafón - Sello entre base y garrafón	39
36.	Instalación con garrafón - Acople directo a boquilla garrafón	39
37.	Domo geodésico del Jardín Botánico de Missouri	40
38.	Cara de poliedro con aristas fraccionadas	40
39.	Proyección de vértices a superficies de esfera	41
40.	Domos geodésicos icosaédricos variando la frecuencia	41
41.	Icosaedro inscrito en una esfera unitaria	42
42.	Dimensiones de icosaedro	43
43.	Pirámide pentagonal superior del icosaedro	44
44.	Apotema del pentágono base de pirámide presentada en Figura 43	45
45.	Coordenadas de puntos en triángulo segmentado	46
46.	Vectores proyectados en superficie esférica	47
47.	Triángulo esférico a partir de puntos proyectados	48
48.	Esfera icosaédrica frecuencia II	49
49.	Ángulo entre unión 6 y plano normal por la arista B	50
50.	Ángulo entre unión 6 y plano normal por la arista A	51
51.	Rotación de w_{10} a un ángulo θ_2 para obtención de w'_{10}	51
52.	Ángulo central entre proyecciones de aristas A	52
53.	Ángulo central entre proyecciones de aristas A	53
54.	Ángulo central entre proyecciones de aristas A	54
55.	Ubicación detalle A, unión 5	54
56.	Detalle A, longitud adicional por soldadura, unión 5	55
57.	Puntos en icosaedro, referencia para Matlab	56
58.	Etiquetas de nodos de armadura	58
59.	Etiquetas de elementos de armadura	59
60.	Diagrama de cuerpo libre armadura	60
61.	Fragmento de código en Matlab para elementos finitos	61
62.	Armadura generada en ANSYS	63
63.	Soportes fijos en los nodos 17 a 26	64
64.	Cargas aplicadas a la estructura	64
65.	Sierra ingletadora y sus partes	65
66.	Sierra ingletadora - Corte en inglete	66
67.	Sierra ingletadora - Corte en bisel	66
68.	Unión de elementos de estructura de metal	67
69.	Unión de elementos de estructura de madera	67
70.	Icosaedro de madera, formado por la unión de triángulos continuos	68
71.	Triángulos que conforman al domo	68
72.	Varas A & B que conforman el domo geodésico frecuencia II	69
73.	Ángulos axiales para varas A & B	70
74.	Ángulos planares	71
75.	Varillas ensambladas para triángulos base del domo	72
76.	Ensamble completo del domo	72
77.	Unión de piezas con prensa esquinera	73
78.	Prensa esquinera de ángulo variable	73
79.	Ángulos de triángulo	74
80.	Ángulos de inclinación	75

81.	Soportes para prensado de varillas	76
82.	Impresión 3D de soportes	76
83.	Cortes longitudinales para obtención de varillas con sierra de banco	77
84.	Cortes en inglete y bisel de varillas con sierra ingletadora	77
85.	Lijado de varillas para un mejor acabado superficial	78
86.	Perforación de agujeros para uniones pernadas	78
87.	Prensado de varillas para adhesión con pegamento	79
88.	Ensamble pernado de varillas correspondientes	79
89.	Ensamble de estructura con triángulos continuos	80
90.	Sellado y unión de paneles transparentes con estructura terminada	80
91.	Fuerza de compresión: 691.7 N, fuerza de tensión: 413.02 N	82
92.	Esfuerzos de compresión: 6.24 MPa, esfuerzo de tensión: 3.72 MPa	82
93.	Deformación direccional máxima: 0.0406 mm	83
94.	Prototipo de estructura de domo geodésico con Paneles para superficie de condensación	84
95.	Vértice de 6 aristas, punto de unión de 6 triángulos diferentes	84
96.	Paneles colocados en la parte interna del domo	85
97.	Unión de 6 paneles de plástico diferentes en un vértice	85
98.	Ensamble pernado para la unión de las varas del domo	86
99.	Irradiación solar global horizontal en Guatemala	100
100.	Primera versión de varas para estructura	101
101.	Dimensiones varas A & B para estructura	101
102.	Domo geodésico con placas de madera para superficie exterior	102
103.	Visualización de terminación de unión de triángulos del domo - vértice de 6 uniones	102
104.	Ajuste de ancho de varillas - sierra de banco	103
105.	Familiarización con ingletadora - ángulos de corte	103
106.	Familiarización con ingletadora - métodos de sujeción de piezas	104
107.	Pruebas de corte - ingletadora	104
108.	Revisión de ángulos de corte - ingletadora	105
109.	Varillas con longitud y cortes requeridos para perforación	105
110.	Clasificación de varillas para perforación	106
111.	Pruebas de corte - caladora	106
112.	Ajuste de ángulo de bisel - ingletadora	107
113.	Ajuste de ángulo de inglete - ingletadora	107
114.	Ángulo de triángulo - Soporte A_1A_1	108
115.	Ángulo de inclinación - Soporte A_1A_1	108
116.	Primeras iteraciones de soportes en impresora 3D	108
117.	Uso de soportes y prensas para pegado de varillas	109
118.	Prueba de perforación de agujeros y ensamble pernado con varillas de prueba	109
119.	Ensamble pernado - agarre apoyado de sargento de 6"	110
120.	Ensamble de domo geodésico - triángulos esféricos	110
121.	Código Matlab elementos finitos - página 1	111
122.	Código Matlab elementos finitos - página 2	112
123.	Código Matlab elementos finitos - página 3	113
124.	Código Matlab elementos finitos - página 4	114

Lista de cuadros

1.	Requisitos de diseño para destilador solar	23
2.	Tabla de perfiles T - Medidas estándar	29
3.	Materiales para placas de la superficie de condensación	35
4.	Propiedades físicas y mecánicas Lexan	35
5.	Propiedades físicas y mecánicas SAF 2507	36
6.	Propiedades físicas, mecánicas y térmicas aluminio 1100	37
7.	Factores de cuerda domo icosaédrico frecuencia II	48
8.	Cargas aplicadas a las uniones de la armadura	59
9.	Correspondencia de signos entre <i>software</i>	63
10.	Longitudes de aristas para el prototipo, frecuencia II	69
11.	Fuerzas axiales en elementos, Matlab	81
12.	Resultados de esfuerzos máximos y mínimos Matlab	81
13.	Fuerzas axiales en elementos, ANSYS	82
14.	Esfuerzos axiales en elementos, ANSYS	82
15.	Factores de seguridad de los elementos sometidos a máximo esfuerzo	83
16.	Porcentajes de error comparativos Matlab-ANSYS	83
17.	Matriz de elementos para lectura de Matlab	98
18.	Matriz de resultados para los esfuerzo y factores de seguridad de cada elemento	99

Se diseñó un sistema de destilación y purificación de agua que sea capaz de proveer agua potable y consumible utilizando como fuente principal agua proveniente del Océano Pacífico, en la Costa Sur de Guatemala. De esta manera se buscó una solución viable y efectiva a la escasez de agua natural apta para el consumo humano proveniente de ríos y lagos en zonas cercanas a la costa que debido a la presencia de sales y contaminantes varios como bacterias o sustancias químicas, consecuencia del desvío de ríos para riego de cultivos, desarrollo de actividades industriales, entre otras.

Se seleccionó un destilador semiesférico como base para el diseño del sistema, modificando la superficie superior por un domo geodésico frecuencia 2, elaborado con perfiles T y placas de policarbonato triangulares. Bajo una carga supuesta de 1000 N en la cúspide del domo, se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 73.5, con perfiles de acero inoxidable Sandvik SAF 2507 y una deformación máxima de 0.0431 mm .

Para el sistema de alimentación de agua se investigó distintas alternativas, seleccionando finalmente dos opciones, una con la utilización de una válvula de flotación y otra con la adaptación de un garrafón convencional con su base a través de tuberías y 1 válvula de bola.

Se realizó un prototipo de la superficie de condensación con el fin de observar el proceso de construcción, ensamble y geometría lograda para un domo geodésico frecuencia II, con su metodología y cálculos correspondientes descritos paso a paso.

Por la radiación solar presente en la región para desalinizar el agua, conociendo que Guatemala es una región con un gran potencial solar en comparación de muchos países a nivel global. Se recomienda continuar el alcance de este proyecto realizando ensayos físico-químicos, determinación de metales y otros descritos y mencionados en la norma COGUANOR NGO 29001:99, con el fin de cumplir con los parámetros establecidos para la determinación de la calidad de agua de consumo humano o agua potable.

CAPÍTULO 1

Introducción

El uso de la energía del Sol para la purificación de agua no es una técnica reciente, Aristóteles mismo describió un método para evaporar agua impura y luego condensarla para su uso, además se tiene registro histórico del trabajo de alquimistas árabes en el siglo XVI que trabajaron en un proceso de destilación solar (Masiwal y col., 2017). La primera planta que utilizó este método para la obtención de agua potable fue instalada en Las Salinas, Chile, en el año 1872, iniciativa de un ingeniero sueco llamado Charles Wilson. Instaló un destilador solar de aproximadamente $5,000 m^2$ de superficie capaz de producir 21,500 litros de agua dulce por día (Sarmiento, 2007).

El diseñador italiano Gabriele Diamanti comenzó a desarrollar, desde el 2005, un destilador de agua hecho de terracota, plástico reciclado y zinc anodizado, que produce hasta 5 litros de agua potable al día (RSE, 2011). Fue finalista en los premios Émile Hermes en su edición del 2011, un evento que galardona el trabajo de jóvenes innovadores en el área de diseño. Su destilador fue diseñado con el propósito de funcionar sin electricidad, filtros y requiriendo un mínimo de mantenimiento, todo esto con el objetivo de no tener un impacto ambiental negativo.

El eliodoméstico está pensado para su libre utilización, es decir, no tiene fines lucrativos ni comerciales. Por ello, Diamanti ha difundido su invento en los países menos desarrollados y que se ven afectados por la sequía o falta de agua potable a través de organizaciones no gubernamentales. Fue intencionalmente construido para que pueda ser producido por artesanos locales con materias locales y su uso es muy sencillo. Se llena el depósito de agua de alguna fuente de agua no potable y al cabo de 2 horas se puede recoger agua limpia y lista para ser consumida (Diamanti, s.f.).

Thierry Carlin, CEO de la empresa Marine Tech, encargada del diseño e ingeniería de soluciones innovadoras para problemas relacionados con el área marítima inventó un sistema que denominó Helio, ganador de la competencia Var Terre d’Innovation en el 2017. Este sistema se encarga de producir agua potable a partir de diferentes fuentes de agua que se considera no apta para el consumo humano como agua del mar, agua sucia, proveniente de ríos, lagos, estanques, etc. Tiene la ventaja de ser capaz de trabajar y dar resultados sin importar la posición geográfica donde se requiera, a un costo mínimo siempre y cuando se pueda abastecer de agua no potable para su destilación posterior (EcoInventos, 2020).

Dentro de las mayores ventajas que presenta este método de colecta de agua es que es autónomo, usa únicamente energía renovable para su funcionamiento, no contamina, y es de operación con costos mínimos. Para poder ser llenada continuamente, cuenta con un sistema de bomba de agua alimentado por un panel solar incorporado a cada unidad. Marine Tech afirma que cada esfera es capaz de producir 10 litros de agua al día, equivalente a lo necesario para el consumo de 5 personas, esto dependerá de la radiación solar presente en donde se encuentre instalado (Tech, s.f.-b).

Según el Instituto de Investigación para la Pequeña Agricultura Familiar (IPAF) en la región Noreste de Argentina lleva adelante también una prueba de validación de un sistema de destilado de agua por medio de radiación solar, similar en cuanto a funcionalidad que aquel inventado por Marine Tech. Arauco Schiffman, un investigador del IPAF, menciona que es importante el desarrollo y uso de este tipo de tecnologías en regiones donde si bien no hay falta de agua en cantidad, sí en calidad debido a que en Argentina existe una amplia zona con presencia de Arsénico geológico que evita que métodos como captación de agua de lluvia resultan ineficientes al no ser aptos para el consumo humano (Ramos, 2017).

Guatemala es un país que cuenta con un gran recurso hídrico, teniendo la capacidad de cubrir las necesidades de toda la población con un consumo de aproximadamente el 20 % o 21 % de la oferta total anual (Gálvez y col., 2009). Sin embargo, el uso indebido de este, en su mayoría por parte del sector industrial, juega un papel importante en la escasez de agua potable proveniente de fuentes naturales para el consumo humano. Siendo el principal problema la calidad y no cantidad de agua, se busca una solución que sea capaz de aprovechar el recurso hídrico existente, a través de la purificación de agua de fuentes naturales que se encuentran contaminadas. Según el IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, 2012), en el año 2009, al menos catorce ríos principales y cuatro lagos presentaron altos porcentajes de contaminantes físicos, materia orgánica, microorganismos, contaminantes tóxicos y materiales cancerígenos, lo que implica riesgos importantes al usar esas aguas para consumo humano y riego.

Según el *Manual de Educación Ambiental sobre el Recurso Hídrico en Guatemala* presentado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2009) la mitad de la población no cuenta con servicio de agua potable en su vivienda. Esto se debe a que el agua que tienen a su disposición no es tratada. Se registró entre el año 2000 y 2007, que más de 200,000 personas murieron por problemas digestivos relacionados con la contaminación del agua (Ibañez y col., 2009).

El sistema de destilación solar, a diferencia de los sistemas de captación de agua, provee una alternativa eficiente ante problemas relacionados con la presencia de contaminantes tóxicos y dañinos para el ser humano al hacer uso del proceso de evaporación del agua, parte importante del ciclo hidrológico (Ramos, 2017). Siendo este el principal problema en las zonas costeras de Guatemala se busca diseñar y construir un sistema capaz de desalinizar y purificar agua proveniente del Océano Pacífico, en la Costa Sur del país, una fuente hídrica similar a la utilizada para el proyecto elaborado por Marine Tech en Francia (Tech, s.f.-a). A fin de tener un indicador que permita establecer la eficiencia del prototipo, se tomará la norma COGUANOR NGO 29001:99 para la determinación de la calidad de agua de consumo humano o agua potable.

3.1. Objetivo general

Diseñar y prototipar un destilador solar, capaz de desalinizar y purificar agua salada proveniente del Océano Pacífico, en la Costa Sur de Guatemala.

3.2. Objetivos específicos

- Definir la geometría y tipo de destilador a construir a partir de las ventajas y requisitos de diseño establecidos.
- Realizar un listado de los materiales que cumplan con los requisitos de rendimiento y funcionalidad establecidos para cada uno de los componentes.
- Seleccionar un sistema de alimentación adecuado para el destilador.
- Simular, a través del método de elementos finitos, el comportamiento de la estructura metálica del domo bajo una carga de 1000 N en su cúspide.
- Diseñar y construir el prototipo de la estructura del condensador con el uso de madera de pino y planchas de policarbonato.

4.1. Recurso hídrico

Los recursos hídricos son todos aquellos depósitos o fuentes de agua dulce que están disponibles o potencialmente disponibles, y que pueden ser utilizados por el ser humano para satisfacer alguna necesidad. Representa uno de los recursos naturales más importantes no solamente para la vida en el planeta, sino para múltiples actividades llevadas a cabo por el ser humano.

Los recursos hídricos existentes son ríos, lagos, aguas subterráneas, glaciares y nieves perpetuas. La utilización de estos puede conllevar a su modificación o alteración de las propiedades y limitando así su uso posterior para otras actividades.

El uso del recurso hídrico se clasifica en:

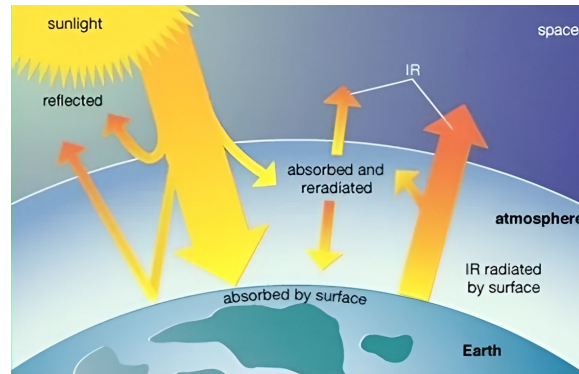
- **Consuntivo:** Es cuando el agua, una vez usada, no se devuelve al medio donde se ha captado o no se la devuelve de la misma manera que se ha extraído. Esto implica presencia de contaminantes tanto físicos, químicos.
- **No consuntivo:** Es cuando de manera contraria, el agua es devuelta al medio del que se extrajo tal y como se tomó. Ejemplos de este uso pueden ser actividades energéticas, recreativas, ambientales.

A diferencia de muchos países con una alta tasa de población carente de acceso a agua, debido a la falta del recurso hídrico, Guatemala es un país con un recurso hídrico basto. Se cuenta con más de 97,120 millones de metros cúbicos de agua anualmente cubriendo todo riesgo hídrico (SEGEPLAN & BID, 2006).

4.2. Recurso solar

El Sol representa la mayor fuente de energía renovable disponible en la tierra, con un potencial en el rango entre 4.37×10^5 y 1.38×10^7 TWh anual ya habiendo tomado en cuenta los efectos de la reflexión en la atmósfera solar (Belyakov, 2019). Del potencial solar disponible, en 2020, únicamente se aprovecharon 8.43×10^2 TWh (0.19%) generados a nivel mundial en centrales fotovoltaicas y otras tecnologías solares instaladas (IRENA, 2022).

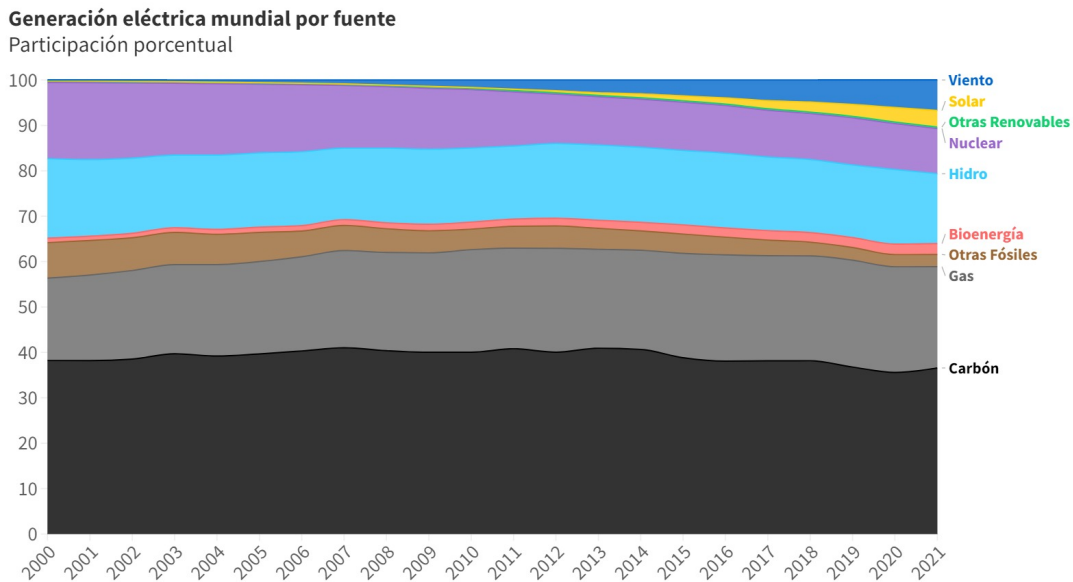
Figura 1: Incidencia de la radiación solar en la superficie terrestre



Fuente: (Ashok, s.f.)

Del total de energía mundial generada en 2021, tecnologías que hacen uso de energía solar representaron apenas 3.65%, evidenciando que hay una gran oportunidad para aprovechar de una mejor manera un recurso tan basto y que no requiere de algún medio de transporte para poder ser utilizado a diferencia de otros recursos (Jones, 2022).

Figura 2: Participación porcentual de generación eléctrica mundial



Fuente: (Jones, 2022)

El uso de la energía solar puede darse de diversas maneras, ya sea de forma pasiva o activa. Esto depende de si se aprovecha a partir de la utilización de dispositivos para capturar la luz y el calor que irradia el sol y transformándolo en otro tipo de energía o haciendo uso directo de esta.

- Energía solar fotovoltaica: Utiliza celdas fotovoltaicas, capaces de transformar la radiación solar directamente en energía eléctrica, ionizando y energizando electrones que al interactuar entre sí generan corriente eléctrica.
- Energía solar térmica: Utilizan colectores o captadores solares para transformar la radiación solar en calor. Sirven convencionalmente para calentar agua tanto para uso doméstico como sistemas de calefacción de aire o de agua de las tuberías, o para uso industrial.
- Energía solar termoeléctrica: Similar a la anterior, a diferencia de que utiliza concentradores, o lentes y espejos con el fin de redirigir la luz solar hacia una dirección común. Esta alta concentración de energía se utiliza para evaporar agua que posteriormente energizará turbinas de algún generador.
- Energía solar pasiva: Considera tanto la ubicación, orientación y construcción de viviendas y edificios para captar la radiación solar, almacenarla y luego distribuirla en forma de calor a través de transferencia de calor natural.

4.2.1. Potencial solar en Guatemala

Guatemala es un país que cuenta con un gran potencial solar (Figura 99), por encima incluso de países donde se han desarrollado múltiples proyectos de energía solar. Con un valor promedio nacional de radiación solar de 5.25 kWh/m^2 supera a China quien posee un valor promedio nacional de radiación solar de 4.13 kWh/m^2 (Energy Sector Management Assistance Program, 2020).

China, teniendo un menor potencial solar que Guatemala fue el país que en 2021, generando en total 327 TWh, con una potencia instalada de 306.97 GW en plantas de energía solar, tomó el primer lugar en contribución a la energía solar producida a nivel mundial. Esto por encima de Estados Unidos, Japón, Alemania, India y otros países que han tenido un progreso considerable en aprovechamiento de energías renovables en los últimos años, mientras que Guatemala generó 0.22 TWh, con una potencia instalada de 0.10 GW (Jones, 2022).

Esta potencia solar está determinada por una variedad de factores externos como latitud, clima, variación geográfica, variación de las horas de luz y la estación del año. Por otro lado, si bien esa potencia está disponible, la eficiencia del dispositivo utilizado, los materiales, el color de las superficies, la presencia de objetos alrededor y su interacción con el Sol y la orientación e inclinación del mismo, afectan que tanta energía es capaz de capturar y aprovechar.

4.3. Desalinización como fuente de agua potable

Con un 0.8 % del total del agua de la Tierra representado por fuentes de agua dulce, una de las mayores preocupaciones a nivel mundial es la escasez de este recurso tan importante y esencial para la vida. Con ello, el tratamiento de aguas residuales, agua de deshecho de procesos industriales, o incluso agua proveniente de ríos y lagos contaminados está siendo adoptado con rapidez. (Zhang y col., 2020)

Dadas las condiciones de vida, escasez de agua, o la inexistencia de una fuente limpia de agua para consumo, para el año 2010, alrededor de 780 millones de personas utilizaban fuentes no aptas para cubrir sus necesidades de consumo (Hulton & Organization, 2012). Esta situación, que lejos de mejorar, ha ido en declive, con 844 millones de personas careciendo de agua potable básica para el año 2015, incentivó a que dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, adoptados por los Estados Miembros de las Naciones Unidas en el año 2015, se incluyera el objetivo 6: Agua Limpia y Saneamiento (PNUD, s.f.).

Este tiene como fin, a través de la realización de inversiones adecuadas en infraestructura, proporcionar instalaciones sanitarias y fomentar prácticas de higiene para garantizar el acceso universal al agua potable segura y asequible para todos para el año 2030 (PNUD, s.f.).

Tomando en cuenta que, aproximadamente, el 96.5 % del agua se encuentra en los mares y océanos (Greenlee y col., 2009), la desalinización de agua como fuente de agua potable no solamente resulta una propuesta atractiva, sino es también viable y debido la investigación sistemática y desarrollo tecnológico de los últimos 30 años, los costos han ido en reducción a través de mejoras en los diseños y reducciones en el consumo de energía (Alkaisi y col., 2017).

El proceso de desalinización consiste en la separación de las sales y minerales de una disolución con una alta concentración para la obtención de agua apta para el consumo humano, uso industrial o agrícola, y por otro lado una disolución salobre (El-Dessouky & Ettouney, 2002).

Los sistemas de desalinización se clasifican basándose en su fuente de energía y en el proceso utilizado para la separación de las sales (Alkaisi y col., 2017).

Clasificación según fuente de energía:

- Térmica

- Mecánica

- Eléctrica

- Química

Clasificación según proceso utilizado:

- Evaporación-Condensación
- Filtración
- Cristalización

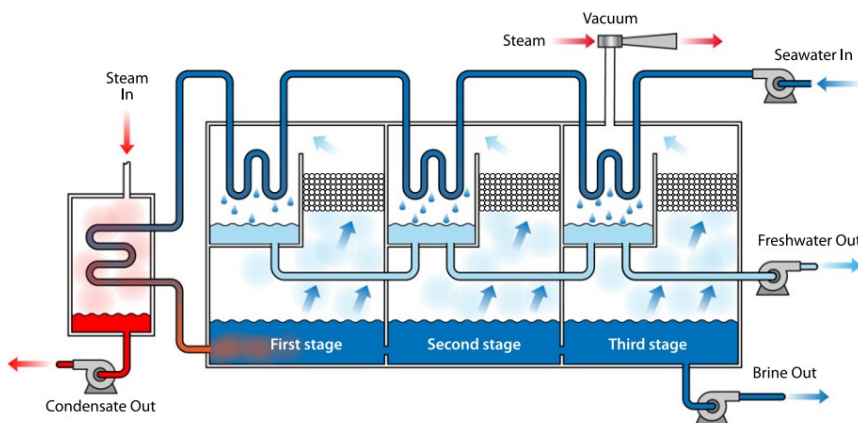
4.4. Principales tecnologías de desalinización

Existe una gran variedad de tecnologías actualmente en desarrollo para la desalinización, tales como la implementación de chimeneas solares, invernaderos, vacío natural, desalinización por adsorción, entre otras. Se abarcarán únicamente las tecnologías que en la actualidad son las más utilizadas a nivel mundial, representando en conjunto el 98 % del mercado (Hetal y col., 2014).

4.4.1. Evaporación instantánea multietapa (MSF)

Consiste en calentar y evaporar el agua con altas concentraciones de sal y posteriormente condensar el vapor para obtener agua pura. En una primera etapa se eleva tanto la temperatura como la presión del agua y posteriormente se pasa a otra cámara a una menor presión provocando que se genere vapor, el cual se extrae para ser condensado y obtener agua dulce. Esta etapa de enfriamiento se realiza por medio de transferencia de calor con el agua salada que entrará a la primera etapa (Hetal y col., 2014).

Figura 3: Diagrama esquemático de una unidad MSF



Fuente: (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013)

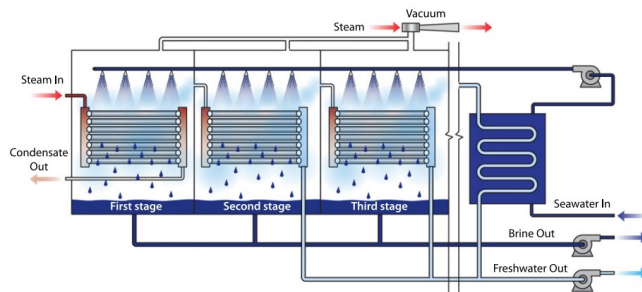
El agua con una mayor concentración de sal que permaneció en forma líquida es pasada a una siguiente etapa a una menor presión para extraer así más agua y el proceso se repite a lo largo de cámaras consecutivas hasta llegar a la presión atmosférica.

Esta es la tecnología más utilizada de las tres formas principales de destilación.

4.4.2. Destilación multiefecto (MED)

Tiene un principio de funcionamiento similar a las unidades MSF, excepto que en este caso se utiliza vapor para calentar el agua salada en la primera etapa y el vapor obtenido es usado en las siguientes etapas para evaporar el agua salada restante. El agua de mar o el agua salobre es utilizada para enfriar y condensar el vapor obtenido en cada una de las etapas permitiendo así que la temperatura disminuya progresivamente (Shatat & Riffat, 2014).

Figura 4: Diagrama esquemático de una unidad MED

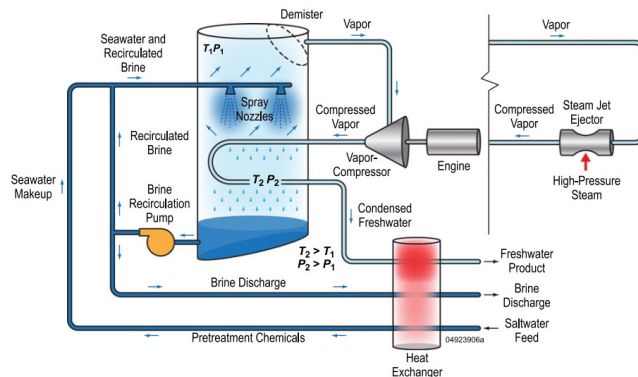


Fuente: (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013)

4.4.3. Destilación por compresión de vapor (VCD)

Este sistema utiliza alguna fuente de calor para calentar previamente el agua salada. Se rocía en un tanque o en una cámara para separar el vapor del agua con alta concentración de sal y el vapor luego es comprimido utilizando un compresor. Como resultado de esto, tanto la temperatura como la presión se aumentan (Saidur y col., 2011).

Figura 5: Diagrama esquemático de una unidad VCD



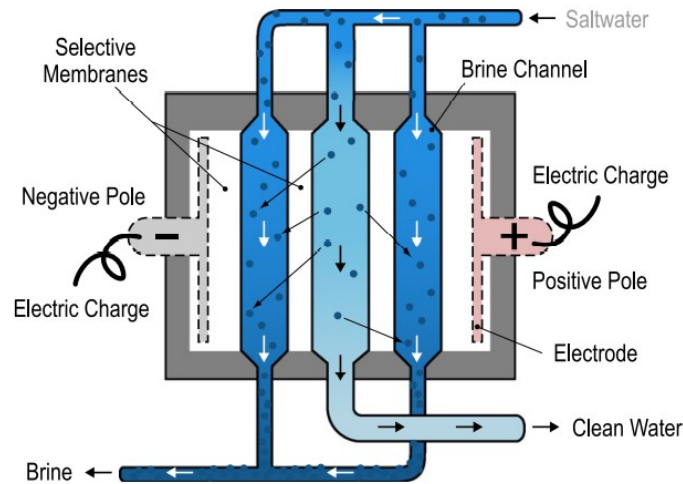
Fuente: (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013)

Luego, utilizando el agua de mar entrante, se enfría el vapor comprimido, condensándose y obteniendo así agua dulce. Este proceso se utiliza cuando no se requiere de una gran cantidad de agua desalinizada o en comunidades pequeñas.

4.4.4. Electrodialisis/Electrodialisis invertida (ED/EDR)

Dado que el agua salada de mar está compuesta de cationes y aniones, como en el caso de la sal de mesa común, con cationes de Sodio y aniones de Cloro, el proceso de electrodialisis utiliza un conjunto de membranas intercambiadoras de iones de manera selectiva (Tufa y col., 2019).

Figura 6: Diagrama esquemático de una unidad ED



Fuente: (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013)

De esta forma, bajo la influencia de una corriente directa, los iones positivos de sodio pasan por la membrana de cationes y los iones negativos de cloro pasan por la membrana de aniones conforme el agua pasa, formando dos flujos, uno con agua salobre y otro con agua dulce.

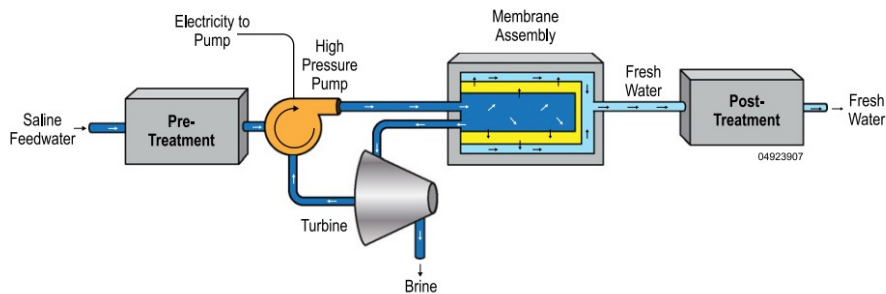
En aplicaciones industriales, las plantas de electrodialisis consisten de conjuntos de cientos de membranas. Una de las muchas ventajas de este método además de la alta obtención de agua dulce, es que el agua no pasa por ningún cambio de fase, reacción o uso de químicos para lograr la separación de las sales.

Un problema que puede ocurrir comúnmente es la acumulación de iones en las membranas, lo cual puede corregirse cambiando la dirección de la corriente inducida. A este proceso se le llama electrodialisis invertida (Tufa y col., 2015).

4.4.5. Ósmosis Inversa (RO)

El proceso de ósmosis consiste en el paso natural del agua a través de una membrana semi-permeable desde una solución con baja concentración hacia una con mayor concentración de algún tipo de soluto a fin de alcanzar el equilibrio de concentración como ocurre en los tejidos vivos como el del ser humano. La ósmosis inversa ocurre cuando se aplica un diferencial de presión al lado con mayor concentración, difundiéndose de esta manera al agua a través de la membrana semi-permeable (Tarnacki y col., 2012).

Figura 7: Diagrama esquemático de una unidad RO



Fuente: (Al-Karaghoulí & Kazmerski, 2013)

Las membranas utilizadas para la ósmosis inversa son fabricadas de materiales plásticos modernos, dispuestas en módulos. En la actualidad es el proceso que tiene la mayor participación en la desalinización de agua de mar, con un 45 % de participación global, y un 62 % de participación dentro de instalaciones renovables (Alkaisi y col., 2017).

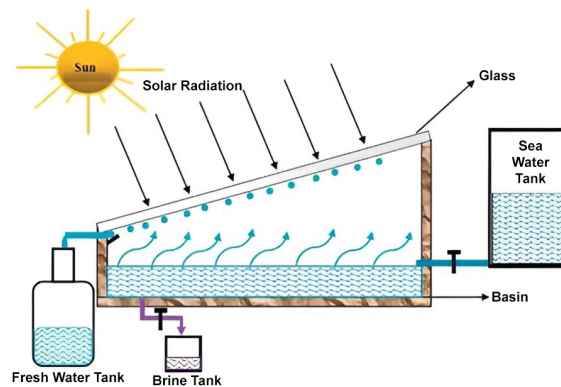
4.4.6. Destilación solar (SD)

Si bien el sistema de evaporación instantánea multietapa es uno de los más utilizados para el proceso de desalinización de agua, requiere de un equipo especializado y el proceso de evaporación y de condensación se realizan en etapas separadas o recámaras diferentes. Por otro lado, dentro de los desalinizadores térmicos por evaporación se tienen los llamados procesos directos. Estos tienen la ventaja de requerir un menor espacio y de esa forma son aplicaciones más eficientes para comunidades pequeñas u hogares individuales.

Los sistemas de desalinización solar son simples, no requieren de dispositivos con gran complejidad de fabricación o de diseño, son baratos en comparación con los demás sistemas y no requieren de una gran cantidad de energía para funcionar, solamente de la disponibilidad de radiación solar, un recurso renovable y gratuito. Además de ello, al no requerir de algún tipo de químico para el proceso, no producen ningún tipo de gas invernadero que pueda ser perjudicial para el medio ambiente.

Los desalinizadores solares consisten básicamente de un recipiente plano de color negro idealmente, lleno con una película de agua salada con cierta profundidad y cubierto con un cristal inclinado para facilitar tanto la transmisión de radiación solar como la condensación y transporte de las gotas hacia un recipiente colector, separado del agua salada entrante.

Figura 8: Diagrama esquemático de una unidad SD



Fuente: (Alnaimat y col., 2018)

4.4.6.1. Proceso de funcionamiento

La destilación es un proceso que consiste en la purificación o separación de dos o más componentes de una mezcla en estado líquida o disuelta. Esto se logra calentando el líquido hasta su punto de ebullición, y luego se capta el vapor en forma de condensado (KNF, s.f.). Un destilador solar tiene como objetivo emular de forma acelerada el proceso natural del agua como se observa en la Figura 9. Específicamente las primeras tres etapas:

- **Evaporación:** La radiación solar entra al dispositivo a través del cristal transparente o de la cubierta. Cierta porcentaje de esta radiación es absorbida por el cristal, otra es reflejada según las propiedades del material utilizado y del ángulo de incidencia y otra parte se transmite llegando a la platina o recipiente negro, calentándolo. En este recipiente se coloca una película significativa de agua salada que es calentada tanto por la radiación solar como por la transferencia de calor que ocurre con la platina, alcanzando su punto de ebullición y así, evaporando el agua y dejando atrás la sal y otros elementos presentes en el agua.
- **Condensación:** El vapor de agua por convección natural sube hasta encontrarse con la superficie interior de la cubierta y comienza a condensarse conforme aumenta la concentración de vapor en esa región.
- **Precipitación:** Con la formación progresiva de gotas de agua cada vez de mayor tamaño, la adhesión entre las moléculas de agua y la superficie colectora no es lo suficientemente fuerte como para resistir su peso, y debido a que la superficie colectora presenta cierta inclinación en el diseño, no cae verticalmente nuevamente sobre la placa, sino se desliza por la superficie colectora hacia algún canal de recolección.

Posteriormente, el agua colectada se lleva a través de tuberías a algún depósito separado y cerrado para evitar que nuevamente el agua almacenada se evapore. Por otro lado, la bandeja con el agua salada presentará una mayor concentración de sales y contaminantes conforme pase el tiempo, por lo que eventualmente debe retirarse, limpiarse la bandeja o tener algún tipo de sistema de drenado de la salmuera.

Figura 9: Ciclo natural del agua



Fuente: (Consortio de Aguas de Asturias, s.f.)

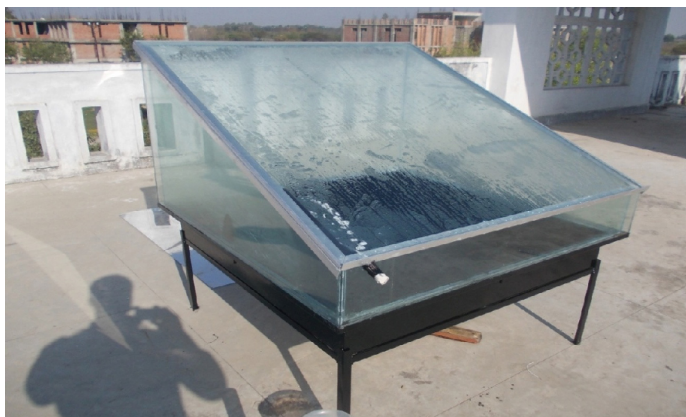
4.4.6.2. Tipos de destiladores solares

La construcción de los destiladores solares puede variar según los requisitos de diseño, materiales, geometría deseada y accesorios que se deseen agregar para mejorar la eficiencia o tasa de producción de agua destilada. Estos pueden clasificarse según la geometría o funcionalidad de su cubierta de condensación de la siguiente manera:

1) Destilador solar de una vertiente

Es el más sencillo de todos en cuanto a su estructura y geometría al tener una sola cubierta con pendiente. Esto provocará que toda el agua condensada llegue hacia la parte más baja de su superficie en donde se coloca el colector de agua dulce. La inclinación de la cubierta puede variar, sin embargo se recomienda que esta sea mayor a 10 grados para que el agua pueda escurrir por la superficie hasta la parte inferior sin gotear sobre la bandeja con agua salada, perdiendo así el agua obtenida.

Figura 10: Destilador de vertiente simple



Fuente: (Rai y col., 2013)

2) Destilador solar de dos vertientes

Resulta de una modificación del destilador de vertiente simple, permitiendo que el área expuesta al sol sea mayor al no tener una pared alta que pueda interferir o bloquear la entrada. Mantiene una construcción o estructura simple, con dos canales colectores, uno a cada lado de las placas inclinadas. Es el modelo que más se utiliza por su facilidad para construcción y así mismo poder utilizar la estructura de una carpa para este propósito, existiendo invernaderos con pozas en el suelo para destilar agua.

Figura 11: Destilador de vertiente doble



Fuente: (Sabando, 2017)

3) Destilador solar piramidal

Una alternativa con una estructura más robusta o sólida al estar conformada por triángulos estructurales. También tiene la ventaja de aprovechar todas las paredes laterales como condensadores a diferencia de los dos destiladores anteriores, permitiendo así que toda el agua que sea evaporada, se pueda recuperar y aprovechar para su uso posterior.

Figura 12: Destilador piramidal



Fuente: (Rodrigues, 2022)

4) Destilador solar esférico

Uno de los diseños más complejos en cuanto a su construcción debido a que toda su superficie es curva y requiere de materiales especiales que puedan ser termoformados o que pueda obtenerse una forma esférica desde su fabricación. Por ello, normalmente están contruidos de acrílico o de policarbonato pero para ello se requiere de maquinaria especializada para asegurar uniformidad en su superficie y que mantenga su forma esférica.

Figura 13: Destilador esférico



Fuente: (Velez, 2022)

Logra una alta tasa de evaporación debido a su geometría, permitiendo la entrada de radiación desde cualquier ángulo. También puede aprovecharse su geometría para colocar colectores o concentradores solares por debajo del nivel del ecuador de la esfera y así aprovechar también la parte baja de la esfera como superficie de entrada de radiación solar.

5) Destilador solar escalonado

Uno de los sistemas que presenta mayor eficiencia térmica, alcanzando temperaturas más altas en las bandejas que los destiladores planos. Esto puede atribuirse a la menor presencia de aire dentro del dispositivo o al aumento de área en conjunto de los escalones respecto a una bandeja plana (Abdullah, 2013).

Figura 14: Destilador escalonado

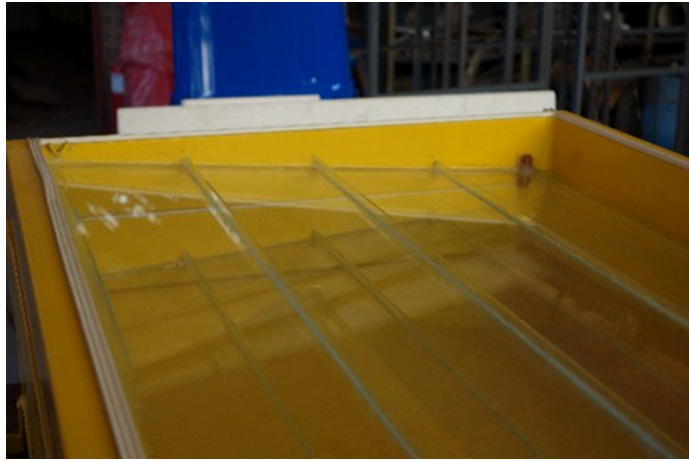


Fuente: (Farshchi Tabrizi y col., 2016)

6) Destilador solar de múltiples etapas

Más allá de las ventajas geométricas, área de condensación o área de captura de radiación solar, el destilador multietapa toma en consideración ventajas termodinámicas. Consta de una serie de bandejas o superficies de evaporación inclinadas, una sobre otra, con el fin de aprovechar las temperaturas alcanzadas por el agua al evaporarse. También se les llama destiladores con regeneración, debido a que de la misma manera que en los ciclos termodinámicos de potencia, utilizan la temperatura elevada de un flujo para precalentar otro que se encuentra en otra etapa.

Figura 15: Destilador multietapa



Fuente: (Franco y col., 2013)

En la Figura 15 se observa que el destilador posee dos vidrios inclinados en sentido contrario, uno por encima del otro. El agua evaporada de la bandeja inferior, al encontrarse con la superficie superior que también posee agua, se condensa más rápidamente porque se encuentra a una menor temperatura en comparación con las superficies de condensación de los modelos anteriores. Esto es debido a que el agua absorbe parte de ese calor. Por el otro lado, el agua de la bandeja superior, aprovecha el calor liberado por el vapor de agua inferior cuando es condensado y se precalienta, requiriendo así, menos calor para evaporarse.

5.1. Descripción de metodología

Con el fin de brindar una alternativa para el abastecimiento de agua para consumo humano en las zonas costeras de Guatemala, se diseñó un desalinizador de agua marítima que permita obtener agua potable y consumible a partir de agua salada tomada directamente del mar. Existen múltiples factores que hacen que una fuente de agua no sea apta para el consumo humano, por lo que se investigó acerca de qué parámetros deben cumplirse para que el resultado sea satisfactorio y pueda darse uso del destilador. Estos parámetros se encuentran detallados en la norma COGUANOR NGO 29001:99.

Se encontró que según la norma se deben realizar un conjunto de pruebas al agua a la salida del sistema para la determinación de su calidad, tales como: ensayos físicos, ensayos químicos, determinación de metales, determinación de materiales inorgánicos no metálicos, determinación de sustancias biocidas y características bacteriológicas. Cada una de estas pruebas pueden ser realizadas en la Universidad del Valle de Guatemala.

Para el diseño del destilador, se investigó sobre los distintos tipos de destiladores existentes, sus rangos de aplicación y los métodos que se utilizan. Se seleccionó un destilador solar en forma de cúpula y dado que se utilizará en la zona costera, donde factores como la presencia de árboles, palmeras, fuertes vientos pueden provocar un daño considerable al dispositivo, se diseñó específicamente a partir de un domo.

Se modeló en Autodesk Inventor un domo geodésico para obtener una geometría cercana a una esfera, tomando perfiles rectos y perfiles T para su construcción. Para ello, se investigó sobre los cálculos requeridos para el dimensionamiento del domo, y se diseñaron las uniones que se colocan en cada vértice del domo para sostener y acoplar las aristas.

Por otra parte, considerando los procesos de transferencia de calor involucrados en colectores solares, dispositivos que utilizan los mismos medios y recursos para un propósito similar, calentar agua, se determinaron los materiales aptos para las planchas del domo, que permitan un óptimo paso de radiación solar. En cuanto al resto del dispositivo, se determinaron los materiales que cumplieran con requisitos tales como ser inocuos de grado alimenticio y que fueran capaces de resistir las condiciones ambientales presentes en la costa.

Se investigó sobre distintas alternativas para el sistema de alimentación de agua del dispositivo, tomando en cuenta que no requiera de un mantenimiento exhaustivo o especializado y de un elevado costo como es el caso con bombas de agua

Con las dimensiones y geometría definida para el domo geodésico se procedió a realizar cálculos de resistencia a través de un planteamiento de elementos finitos con ayuda de los programas Matlab y ANSYS. Se utilizó el planteamiento de una armadura en tres dimensiones con sus soportes fijos y bajo una carga de 1000 N aplicados en el nodo de la cúspide del domo.

Se diseñó y construyó un prototipo para la superficie de evaporación y el domo a partir de pino cepillado y placas plásticas transparentes para formar la superficie interior por donde el condensado se deslizará hacia el depósito de recolección. Para ello se hicieron cálculos geométricos a fin de determinar los ángulos de corte requeridos para cada arista del domo y poder ser realizados con el uso de una sierra ingletadora. Así mismo se diseñó soportes para el prensado de las varillas y su correcta fijación con pegamento para madera, imprimiéndose en 3D y utilizando prensas plásticas y sargentos para sujetar firmemente cada varilla a su soporte correspondiente.

5.2. Definición de requisitos

Cuadro 1: Requisitos de diseño para destilador solar

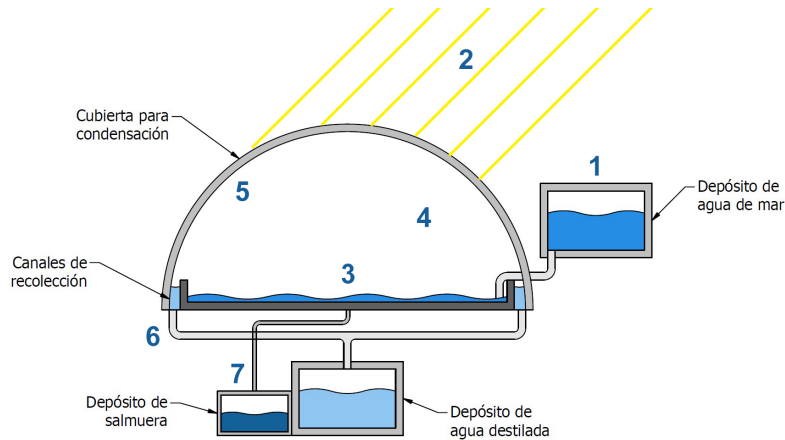
Categoría	Código	Requisito
Funcionalidad	DG-F01	Debe poder destilar exitosamente el agua que se coloque en el sistema
	DG-F02	Debe tener un cobertor con el cual pueda detenerse su operación
	DG-F03	Debe ser un diseño modular que permita su opcional adición de concentradores solares
	DG-F04	Debe tener contenedores para almacenar tanto el agua contaminada como la purificada
Rendimiento	DG-R01	Debe ser capaz de desalinizar agua, cumpliendo con la norma COGUANOR NGO 29001:99
	DG-R02	Debe poder destilar y purificar por lo menos 10 litros de agua diarios
	DG-R03	Debe tener un contenedor de al menos 20 litros para el agua purificada
	DG-R04	Debe tener un contenedor de por lo menos 10 litros para agua salada
	DG-R05	La estructura y partes metálicas deben resistir a la corrosión a fin de tener una vida útil más prolongada
	DG-R06	El domo del desalinizador debe soportar los efectos de la radiación y no tornarse amarillento
	DG-R07	Las piezas metálicas exteriores deben tener una capa de pintura transparente que evite que estas alcancen temperaturas mayores a 50°
Restricciones	DG-C01	Debe poder ser transportado, por módulos, por 2 personas sin utilización de ningún tipo de equipo auxiliar
	DG-C02	Debe ocupar un área no mayor a 2 metros cuadrados
	DG-C03	Debe ser armada con tornillos y roscas de fácil adquisición en ferreterías
	DG-C04	Debe ser de fácil limpieza, no requiriendo productos de limpieza que no se puedan adquirir en tiendas
	DG-C05	Debe tener una base sólida y estable que impida que pueda ser volcado por algún niño o perro de gran tamaño
	DG-C06	Debe poder ser montado y desmontado por 2 personas con la utilización de llaves de corona, destornilladores y vicegrip

5.3. Diseño

5.3.1. Diseño conceptual

El concepto de diseño parte de la consideración de las distintas fases o etapas de la destilación. En la Figura 16 se muestra un diseño conceptual con las fases o partes importantes en el proceso.

Figura 16: Diseño conceptual de destilador solar



Fuente: Elaboración propia

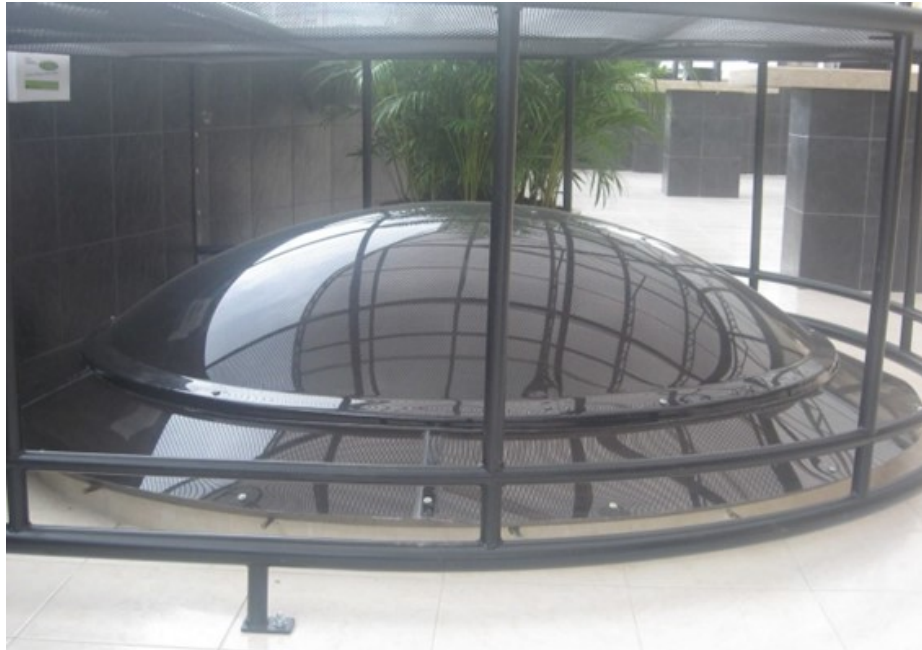
1. Sistema de alimentación de agua salada: Se debe colocar tanto un depósito como un medio para alimentar de agua salada de forma constante al dispositivo a fin de que siempre haya agua que destilar sobre la bandeja de evaporación.
2. Estructura del destilador: Los rayos solares incidentes tendrán como primer contacto y como barrera de entrada la superficie externa del dispositivo, se buscó una alternativa que permita el paso óptimo de la radiación.
3. Bandeja de evaporación: Los rayos solares llegan a la bandeja, calentándola, por lo que se debe buscar que esta pueda no solamente absorber toda la radiación incidente posible sino transferir ese calor al agua de la mejor manera posible.
4. Área interior del destilador: El vapor de agua debe tener un camino libre entre la bandeja de evaporación y la superficie interior de condensación.
5. Superficie de condensación: Debe estar sellada herméticamente para evitar la salida de vapor al exterior del dispositivo y no tener gradas o zanjas que funcionen como goterones.
6. Sistema de colección: Ya sea por medio de tuberías o de un depósito inferior que recoja toda el agua destilada que se precipite a través de las paredes.
7. Depósito de salmuera: Debe colocarse una salida para la acumulación de sales en la bandeja y así facilitar o postergar su continua limpieza.

5.3.2. Superficie de condensación y estructura

El diseño en el cual se vio inspirado el destilador solar presente es Helio de Marine Tech Francia. Una cápsula esférica termoformada, separada en dos mitades, perñada, con una bandeja en el centro de esta donde se posiciona el agua salada por destilar y por el proceso de evaporación por radiación solar, el vapor al tocar la superficie de la cápsula en la parte superior se condensa y por la forma esférica, las gotas de agua caen deslizándose por la superficie hasta la parte inferior de la esfera, evadiendo por completo la bandeja central.

Debido a que el funcionamiento del destilador partirá de la evaporación de agua presente dentro del domo, sobre una bandeja y su posterior condensación al tocar la superficie de la cubierta, se conservará la forma esférica para que el agua condensada pueda colectarse al deslizarse hacia abajo por el domo y ser almacenada en algún depósito. Bajo ello se tienen tres propuestas iniciales:

Figura 17: Cúpula semiesférica de acrílico



Fuente: (Domos Luz, s.f.)

En la Figura 17 se presenta un domo termoformado con el que se tiene la ventaja de ser una sola pieza y no presentar ninguna dificultad con que la superficie interna pueda provocar algún tipo de interferencia al paso de las gotas de agua condensada. Sin embargo, para obtener esa geometría debe llevarse un proceso de termoformado del material, específicamente termoformado de acrílico, un material que presenta una alta dilatación por temperatura, lo que podría provocar que se presenten grietas debido a que estará expuesto a altas temperaturas. Su resistencia al impacto es entre 6 y 20 veces más resistente que el vidrio. Otro problema que presenta es que en caso se dañe, se debe reemplazar por completo toda la pieza.

Por otro lado, está la opción de construir una estructura que pueda aproximadamente dar la forma de cúpula para la superficie de condensación, sin la necesidad de termoformar el material o curvarlo. Esta alternativa se puede lograr con la construcción de un domo como los que se presentan en las Figuras 18 & 19.

Figura 18: Domo formado por estructura en forma de arcos y planchas cuadradas



Fuente: (Chapeau vert, s.f.)

Otra de las ventajas de esta alternativa sobre la cúpula de acrílico es que debido a que la base es una estructura metálica, se pueden colocar las planchas del material que se desee y si se daña alguna placa, puede sustituirse únicamente esa parte. Además, al no requerir que el material de la cubierta sea flexionado, puede utilizarse policarbonato, que tiene una resistencia al impacto de aproximadamente 250 veces la del vidrio. Este material es el utilizado para la fabricación de los escudos antidisturbios.

Figura 19: Domo geodésico con estructura metálica y cubierta transparente



Fuente: (Vargas, 2017)

Dado que el destilador se desea utilizar en la costa pacífico de Guatemala, y por la baja resistencia al impacto por parte del acrílico, material utilizado para domos en casas y construcciones y especulativamente el mismo material utilizado en Helio, se tomó la decisión de utilizar policarbonato. Esto debido a que se considera que en el área objetiva de instalación/utilización hay presencia de árboles y palmeras, corriendo el riesgo de la caída de algún coco o rama que pueda fácilmente dañar la integridad de la cúpula.

La desventaja que presenta el policarbonato respecto al acrílico es que no puede ser termoformado en Guatemala debido a que se requiere de maquinaria muy especializada a la que no se tiene acceso hasta el momento en el país. Con esto en mente, se tomó la decisión de realizar un domo a partir de un esqueleto de metal en el cual se puedan colocar planchas planas sin necesidad de deformarlas y así también tener la facilidad de cambiar piezas individuales del domo si en caso se dañan por algún impacto.

Figura 20: Domo geodésico del Jardín Botánico de Missouri



Fuente: (Window to the World, 2013)

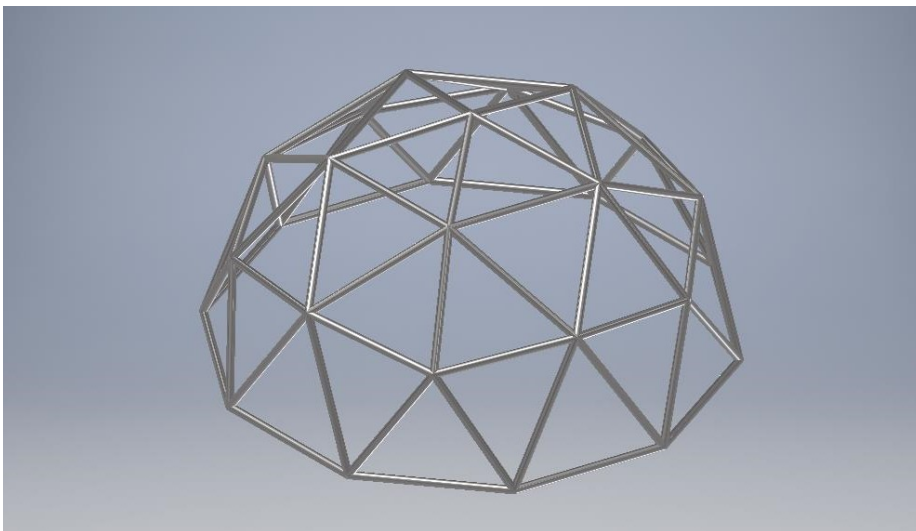
Comparando entre ambos tipos de geometrías para los domos con estructuras, el domo geodésico al ser una estructura formada por triángulos presentará una mejor resistencia a las cargas que puedan aplicarse, tal y como sucede con las estructuras de los puentes. Específicamente se seleccionó un domo geodésico basado en un icosaedro.

Tomando tanto la facilidad de cambio de partes dañadas, el uso del policarbonato, un material con mayor resistencia al impacto, y la resistencia estructural que presentan los domos geodésicos, se seleccionó como base para el diseño de la cúpula del destilador solar. El diseño y los componentes seleccionados para la elaboración del domo, su soporte y el depósito de recolección del agua ya destilada se basaron en la búsqueda del correcto funcionamiento del destilador de agua.

Los domos geodésicos son estructuras frecuentemente utilizadas en el campo no solo de la arquitectura por su estética y diseño futurista, sino como una preferencia por parte de los ingenieros civiles por su buena transmisión de cargas a través de sus elementos hasta la base de la estructura, permitiendo soportar cargas elevadas.

Como se explicará detalladamente, un domo geodésico parte no solamente de un sólido base, sino de la frecuencia de la estructura, que es el número de divisiones de igual tamaño que se hacen a las aristas del poliedro base a fin de obtener un domo más cercano a una esfera. Ahora bien, se buscó cuidar de manera simultánea ocupar la menor superficie posible en la estructura con el fin de poder aprovechar de mejor manera la entrada de radiación solar al sistema, por lo que se seleccionó un domo frecuencia II.

Figura 21: Diseño preliminar, estructura de domo en perfiles redondos, frecuencia II



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

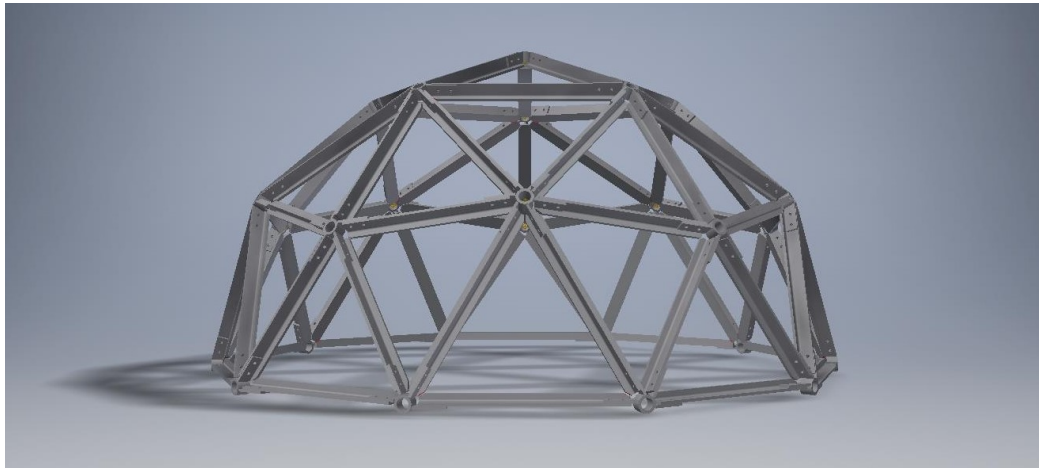
Si bien la construcción con perfiles redondos permite facilidad de las uniones en los vértices si se cuenta con codos en donde cada tubo simplemente se inserte, presentan otras dificultades:

- Considerando que se deben ensamblar las placas de policarbonato a la estructura del domo, los perfiles redondos no brindan una buena superficie de sujeción, ya que las placas tendrían únicamente 1 línea de contacto con la superficie cilíndrica del tubo.
- En caso se busque que la estructura sea soldada, los cortes necesarios para las uniones es complejo en geometría y además la sujeción de los tubos al momento de realizar las soldaduras resultaría impráctico.
- Esto da lugar a que las placas puedan moverse más fácilmente ante alguna carga, requiriendo así el uso de algún sellante como silicón para brindar más soporte entre el tubo y la placa.

Derivado de las razones anteriores, se determinó que la mejor alternativa fue la utilización de perfiles T. En estructuras y muebles, los perfiles T son ensamblados con el alma apuntando hacia el interior de la estructura, no solamente por un tema de esteticismo sino para evitar que el alma quede expuesta pudiendo causar accidentes. Además, se aprovecha la superficie plana de las alas para colocar placas o planchas cuando se requieren paredes.

Para esta aplicación en específico, la ubicación del alma hacia el interior del domo resultaría en la acumulación de gotas de agua que posteriormente gotearían, cayendo nuevamente en la bandeja de evaporación y desperdiciando así el agua destilada que se condensó en la superficie. Por ello, se ensambló con el alma del perfil apuntando hacia afuera.

Figura 22: Diseño final, estructura de domo en perfiles T, frecuencia II



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

El perfil seleccionado según los tamaños estándar disponibles en el país, fue un perfil T $3/4 \times 3/4 \times 1/8$. Bajo las cargas que soportará se encuentra sobredimensionado, pero su selección se debió a que se requiere de un ancho considerable de las alas para poder realizar la unión con las placas transparentes.

Cuadro 2: Tabla de perfiles T - Medidas estándar

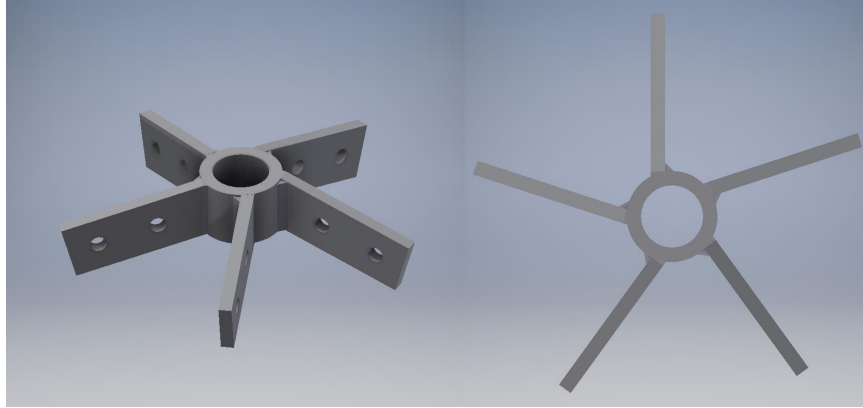
Perfil	Dimensiones (in)			Peso lb/ft	Área in ²
	b	h	t		
$3/4 \times 3/4 \times 1/8$	0.75	0.75	0.125	0.59	0.172
$3/4 \times 3/4 \times 3/16$	0.75	0.75	0.1875	0.84	0.246
$1 \times 1 \times 1/8$	1	1	0.125	0.8	0.234
$1 \times 1 \times 3/16$	1	1	0.1875	1.2	0.339

Fuente: (Montanstahl, 2022)

Se decidió que la unión entre perfiles y vértices fuese por medio de pernos con el fin de poder cumplir con el requisito de ser desmontable si en caso se requiera trasladarlo con mayor facilidad.

Para las uniones entre aristas del domo, se diseñó 4 tipos de uniones, tomando como base las uniones donde se intersectan 5 y 6 aristas. Para las uniones inferiores, debido a que el domo quedará de forma semiesférica, se requieren de uniones para 4 aristas. Sin embargo, éstas resultan únicamente de remover alas a la unión de 6 aristas.

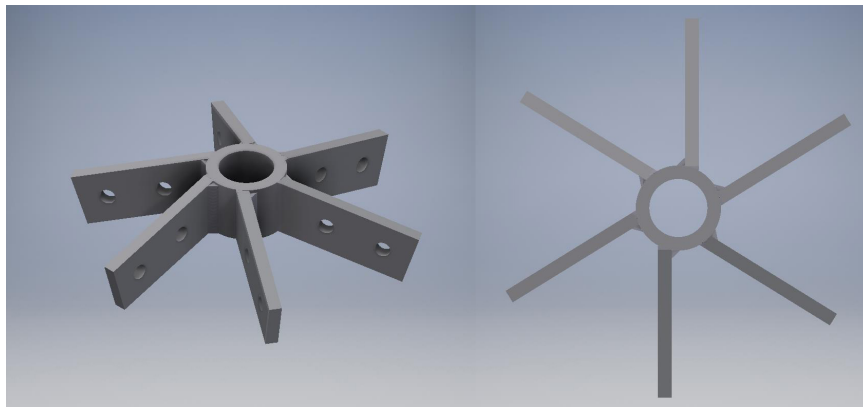
Figura 23: Unión de 5 aristas, vista isométrica y vista de planta



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

En el caso de la unión de 5 aristas, todas las alas tienen el mismo ángulo de entrada y la misma geometría. Por otro lado, la unión de 6 aristas posee 2 tipos de alas, dependiendo del tipo de arista a la que se dirigirá. Esto se explicará más adelante a mayor detalle.

Figura 24: Unión de 6 aristas, vista isométrica y vista de planta



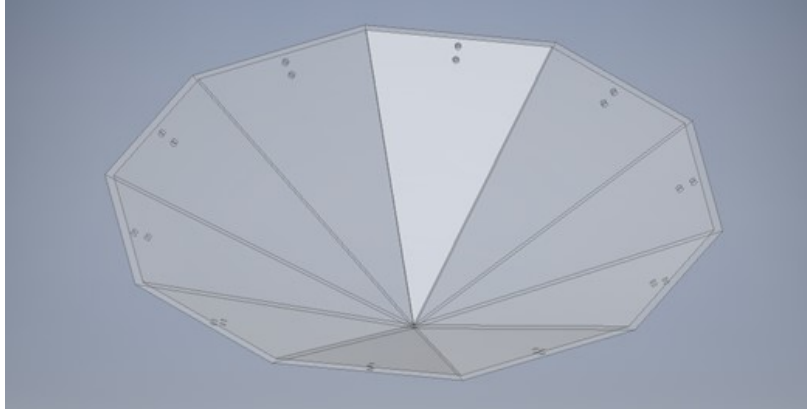
Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Como se mencionó anteriormente, los vértices se unirán a las aristas por medio de 2 pernos, con el fin de evitar cualquier tipo de rotación o de traslape como se observa en cada una de las alas de las uniones.

5.3.3. Depósito o superficie de recolección de destilado

Por otro lado, para el depósito inferior en donde caerán las gotas condensadas en la superficie del domo, se consideró realizar una figura piramidal (25) a partir de las mismas planchas de policarbonato lexán y unir las a la base estructural por medio de placas metálicas pernadas a la base de la estructura.

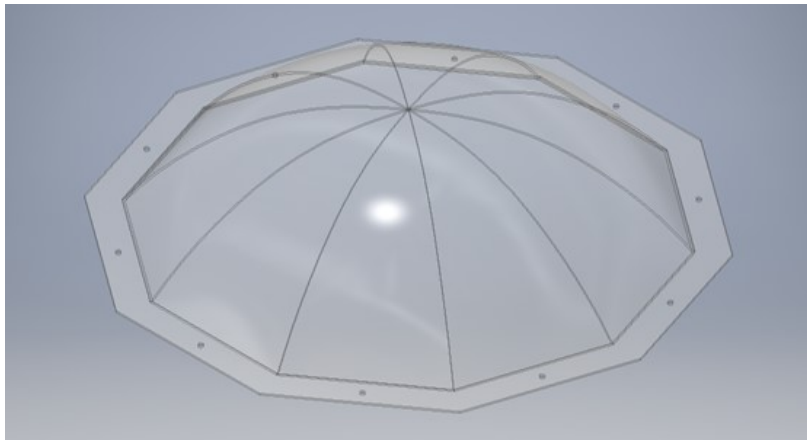
Figura 25: Depósito inferior con forme de pirámide



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Sin embargo, al considerar que es necesario unir cada plancha y sellarla para evitar cualquier fuga de agua, adicional al hecho de que deberá soportar el peso del agua, se decidió finalmente tomar un depósito termoformado, similar al de la Figura 17.

Figura 26: Depósito termoformado de acrílico, con endecágono como base



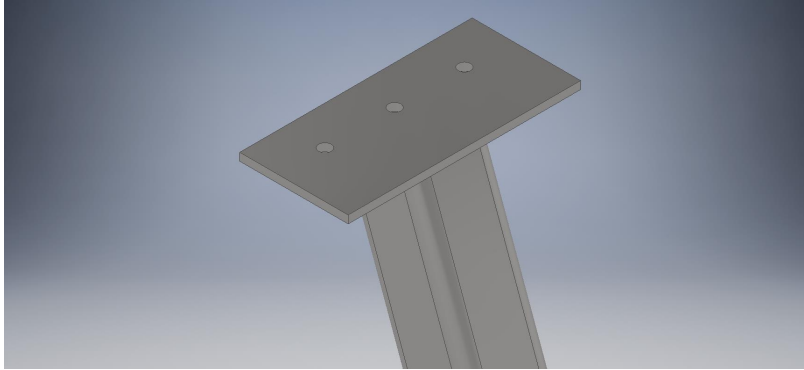
Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Al ser una sola pieza termoformada tiene la ventaja de poder partir de cualquier geometría de la base deseada. Por ello, se seleccionó una base endecagonal, distinto a la base cuadrada o circular convencional de los domos de acrílico. Esto para facilitar el ensamble con las demás partes del destilador y mejorar el sello en su perifería con la base de unión.

5.3.4. Estructura de soporte

Tanto la estructura del domo como el depósito inferior deben estar elevados del nivel del suelo, no solamente para evitar el contacto con el suelo y así evitar que este se ensucie más fácilmente con tierra o polvo, sino también para permitir una distancia considerable en caso se deseen colocar reflectores para aumentar la radiación incidente en la placa de evaporación.

Figura 27: Pata individual para soporte destilador

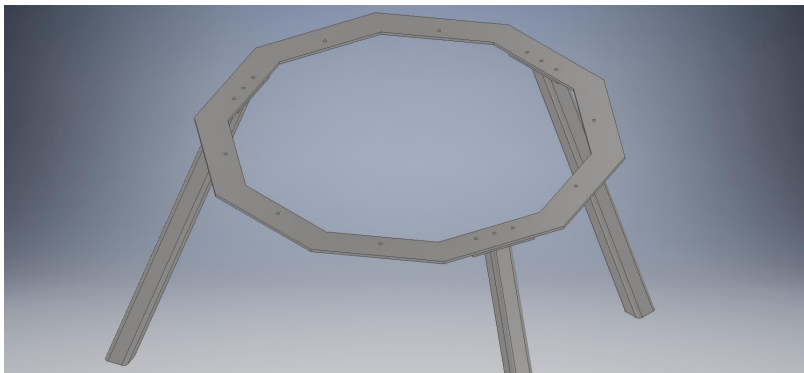


Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Teniendo como ubicación objetivo para el uso del destilador la costa sur del país, específicamente en áreas rurales, a fin de brindar una mayor estabilidad, se diseñó la estructura de soporte en forma de tripode.

Esto es así debido a que para definir un plano geométrico, se requieren de 3 puntos en el espacio, y un cuarto punto quedaría como una variable libre. Traducido del lenguaje algebraico a una situación física, una mesa de 4 patas rígidas que se encuentra en una superficie irregular, estará siempre apoyada en 3 de las 4 patas y la otra quedará libre o cojeando.

Figura 28: Estructura de soporte para destilador

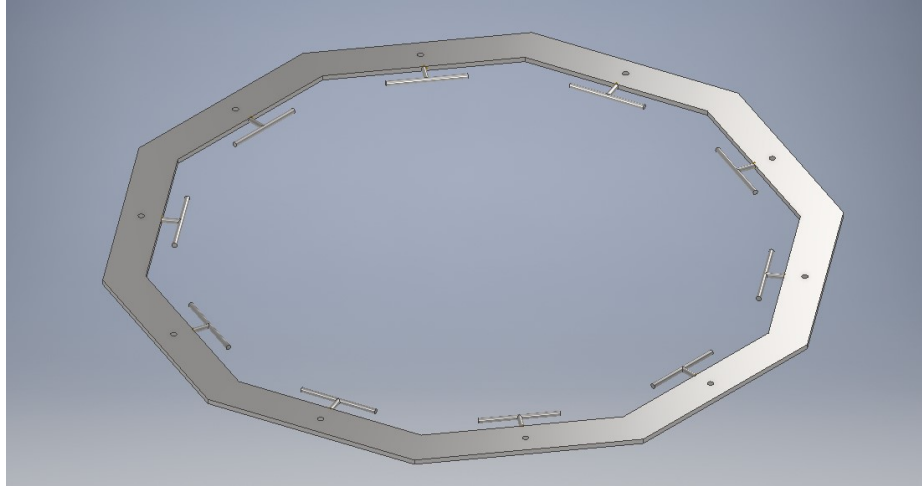


Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

5.3.5. Base de unión

Con el fin de poder tener un punto de unión entre los diferentes componentes del destilador, se realizó una base con forma de endecágono con un grosor de 5 mm. A esta base de unión o placa base se atornillarán las patas de la estructura, el depósito inferior, la estructura del domo y la bandeja de evaporación. Para su construcción, a fin de no desperdiciar una lámina completa por el corte del centro, se propone soldar 10 platinas trapezoidales.

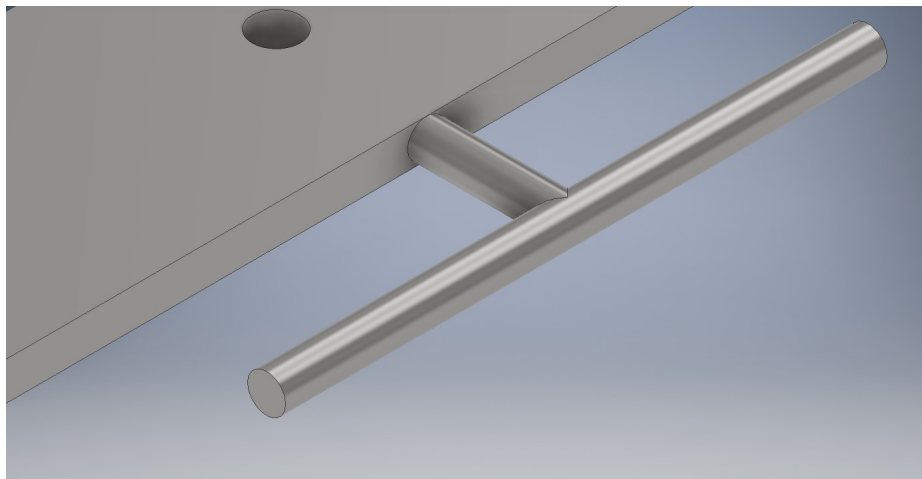
Figura 29: Base de unión plana



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Además, ésta servirá como soporte para la bandeja de evaporación que estará ubicada en el centro del domo. Para ello, con la utilización de soportes T hechos con varilla de hierro lisa, se logrará dejar un espacio entre la bandeja y el perímetro interior de la base y de esta forma el agua destilada pueda gotear desde la superficie superior hacia el depósito inferior.

Figura 30: Soportes T para ensamble con bandeja de evaporación

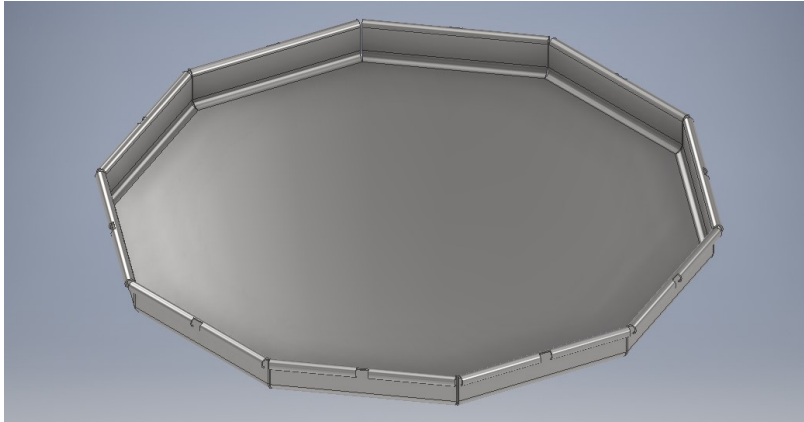


Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

5.3.6. Bandeja de evaporación

Debido a que la bandeja contendrá agua el 100 % del tiempo que el destilador esté en uso, debe tener la menor cantidad de aberturas o uniones por donde el agua pueda escapar. Por ello, se diseñó a partir de una sola lámina de metal con dobleces para las paredes y las ranuras por donde se ensamblarán los rayos para poder ser desmontada fácilmente.

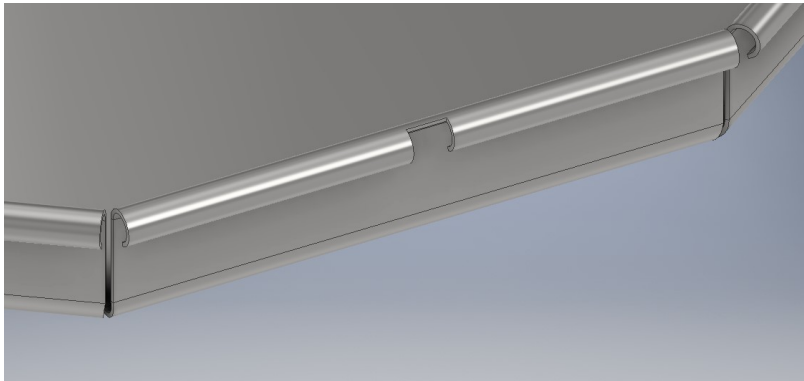
Figura 31: Bandeja de evaporación a partir de una sola lámina



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc

Esto a su vez facilita su manufactura al no requerir de ángulos de doblez complicados de obtener como sucedería si ésta consistiera de una lámina endecagonal para el fondo y una lámina rectangular doblada 10 veces para el perímetro de la bandeja. De esta forma también se elimina la necesidad de ensamblar múltiples partes, siendo necesario únicamente sellar o soldar las ranuras entre aletas para evitar la salida de agua.

Figura 32: Detalle de la ranura a cada lado para ensamble con soportes T de la base



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc

Para permitir un ensamble sencillo de la bandeja, se realizó un reborde en cada una de las paredes, realizando un corte en el centro a fin de dejar una ranura para que la barra radial de las T no interfiera con el resto del reborde, como se observa en la Figura 32.

5.3.7. Selección de materiales

5.3.7.1. Placas condensador

Dado que la superficie de condensación se realizará a partir de la construcción de un domo geodésico y en la parte interna se colocarán placas triangulares planas, en el Cuadro 3 se presentan los distintos materiales considerados.

Cuadro 3: Materiales para placas de la superficie de condensación

Material	Ventajas	Desventajas
Vidrio laminado	Resistente por la capa plástica flexible de polivinyl butiral	Pesado, quebradizo o más propenso a sufrir daños en su integridad, no resiste fuego o choques térmicos. Costo elevado
Vidrio templado	Mejores propiedades mecánicas que el vidrio convencional. No se derrite o quiebra bajo altas temperaturas, aún si la llama está siendo directamente aplicada	Costo elevado, pesado
Polycarbonato	Ligero, bajo costo, alta calidad óptica, puede utilizarse en aplicaciones planas y curvas	No tiene protección UV lo que provocará que se torne amarillento perdiendo sus propiedades de transmisión
Polycarbonato con revestimiento	Ligero, resistente al desgaste y a la radiación UV, protegido contra amarilleo = menor pérdida de transmisión de la luz, alta resistencia al impacto (alrededor de 250 veces la del vidrio)	Solo se puede utilizar en aplicaciones planas ya que no puede formar en frío
Polycarbonato Alveolar	Ligero, bajo costo, puede contribuir a la reducción de pérdidas por conducción	Vida útil limitada, bajas propiedades mecánicas
Acrílico	Alta resistencia al impacto, entre 10 a 20 veces el del vidrio. Es moldeable bajo tratamientos especializados	Costo elevado

Fuente: Elaboración propia, recopilación de información de proveedores nacionales

Por su alta resistencia al impacto, ser ligero, una alta transmisión de luz y además su alta resistencia al desgaste respecto a los demás materiales, se seleccionó el polycarbonato.

Cuadro 4: Propiedades físicas y mecánicas Lexan

Propiedad	Valor	Unidad
Físicas		
Transmisión de Luz*	88	%
Gravedad específica	1.20	—
Mecánicas		
S_y	62	MPa
S_{ut}	65.5	MPa
E	2.38	GPa
Resistencia al impacto	270	Nm
Resistencia a la abrasión**	1-3	%

*Con un espesor de 3mm

**Mide el porcentaje de cambio de opacidad debido a la abrasión

Fuente: (SABIC, s.f.)

5.3.7.2. Estructura de soporte, domo y base de unión

Dado que el dispositivo se desea posicionar en la zona costera expuesto a una atmósfera altamente corrosiva por la presencia de agua salada, así como exposición al Sol durante todo el día, se seleccionó un acero inoxidable dúplex conocido comercialmente con el nombre Sandvik SAF 2507 o UNS S32750, utilizado frecuentemente en plantas de desalinización, refrigeración con agua salada, componentes mecánicos que requieren de una alta resistencia a cargas, entre otras. Cuenta con las siguientes propiedades (Sandvik, 2021):

- Excelente resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión por cloruro.
- Excelente resistencia a la picadura y corrosión por rendija.
- Alta resistencia a la erosión y corrosión por fatiga.
- Alta resistencia a la corrosión en general.
- Alta resistencia mecánica.
- Buena soldabilidad

Cuadro 5: Propiedades físicas y mecánicas SAF 2507

Propiedad	Valor	Unidad
S_y	480	MPa
S_{ut}	800	MPa
E	194	GPa
ν	0.3	—
ρ	7800	kg/m^3

Fuente: (Sandvik, 2021)

5.3.7.3. Bandeja de evaporación

La bandeja es el primer componente que tiene una labor directa en el proceso de destilación y es la encargada no solamente de contener el agua salada, sino también tiene un efecto en la cantidad de calor que el agua es capaz de absorber para su eventual evaporación. Por ello, la selección del material debe ser tomando en consideración los siguientes criterios:

- Alta conductividad térmica
- Resistente a la corrosión
- Baja reflectividad

El aluminio es un candidato ideal para este propósito, resistente a la corrosión, una gran capacidad de absorción y conductividad térmica, soporta las temperaturas a las cuales se someterá en el destilador, no emite olores y baja toxicidad, razón por la cual es utilizado en la industria alimentaria.

Además, según los resultados obtenidos en una evaluación de prototipos de destiladores solares para el departamento de ingeniería ambiental de la universidad Manuela Beltran, el aluminio fue el material que contribuyó a una mayor eficiencia de destilación (Burbano, 2014)

Cuadro 6: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas aluminio 1100

Propiedad	Valor	Unidad
Físicas		
ρ	2710	kg/m^3
Mecánicas		
S_y	>25	MPa
S_{ut}	75	MPa
E	68.9	GPa
ν	0.33	–
Térmicas		
c	904	J/kgK
k	222	W/mK

Fuente: (Matweb, s.f.)

Aunque posee un alto nivel de reflectividad, esto se resuelve a través de aplicar una capa de pintura epóxica negra a la superficie con el fin que esta no sea tóxica al momento de interactuar con el agua. Esto además aumentaría su absorción a la radiación, tanto la solar incidente como la radiación por calor de los alrededores.

5.3.8. Selección de sistema de alimentación

El sistema de alimentación será no solo el encargado de que siempre haya agua disponible para evaporar en la bandeja de evaporación, sino también debe mantener un nivel adecuado de agua para evitar que por la masa de agua expuesta en el destilador, requiera de mayor cantidad de energía para ser evaporada.

Esto puede lograrse a través de bombas automáticas, con un sistema manejado por sensores que midan el nivel del agua, puede ser a través de un accionamiento manual, como una bomba manual o simplemente una llave. Sin embargo, una representa un costo elevado, adicional a la disponibilidad de electricidad, y la otra el tiempo y atención por parte del usuario final.

Por ello, se proponen dos alternativas de sistema automático, que no requieren de ningún tipo de fuente eléctrica ni accionamiento de un humano, solamente su instalación y llenado del depósito grande de agua de mar.

Válvula de flotador

Utilizadas en tanques de almacenamiento de agua o líquidos en aplicaciones industriales, alimenticias y la que se propone específicamente en todos los WC. A través de un flotador y el nivel graduado, la válvula se cierra cuando sobrepasa el nivel requerido de agua si necesidad de algún accionamiento eléctrico o manual. En la Figura 33 se observa el principio de funcionamiento para una válvula industrial y en la Figura 34 el tipo de válvula que se propone para su uso en el destilador.

Figura 33: Funcionamiento de válvula flotante, vista seccionada



Fuente: (CSA ATHENA, 2017)

La ventaja que presenta ésta alternativa es que no se requiere de ningún tipo de válvula adicional que impida el paso de agua hacia la bandeja de evaporación, provocando que el nivel de agua exceda el deseado y el depósito de agua salada se puede abrir y llenar libremente sin afectar el funcionamiento del sistema completo.

Figura 34: Válvula flotante



Fuente: (Center Fertin, s.f.)

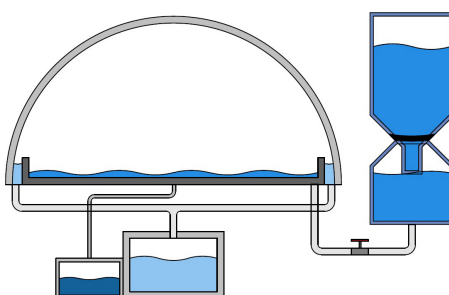
Una ventaja adicional, es que el depósito puede ser del tamaño que se desee, sin importar la altura de este o el volumen de agua que almacena.

Garrafón de agua

Los dispensadores de agua aprovechan el vacío o presión manométrica negativa que se crea dentro del recipiente para evitar que el agua fluya, a menos que se permita la entrada de aire. Esto se logra cuando, la boquilla del garrafón ya no tiene contacto con el agua del depósito inferior. Bajo esta alternativa se proponen dos variaciones:

- Instalación de un sello hermético: Para evitar la entrada o salida de aire en la unión entre la base y el garrafón y que esto provoque que el agua fluya libremente, se requiere colocar un sello hermético entre ambos.

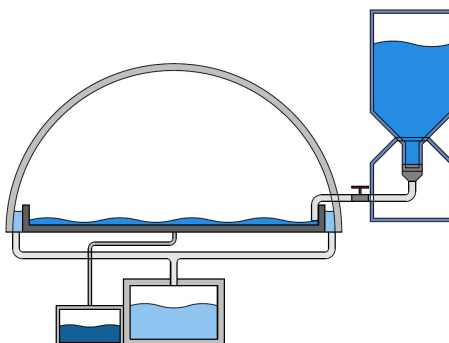
Figura 35: Instalación con garrafón - Sello entre base y garrafón



Fuente: Elaboración propia

- Instalación directa a boquilla del garrafón: Para evitar problemas con el funcionamiento del sello, se puede colocar la tubería directamente a la boquilla del garrafón a través de algún acople de rosca o similar que permita cambiar el recipiente cuando se requiera. El depósito inferior solo funcionaría como soporte del garrafón.

Figura 36: Instalación con garrafón - Acople directo a boquilla garrafón



Fuente: Elaboración propia

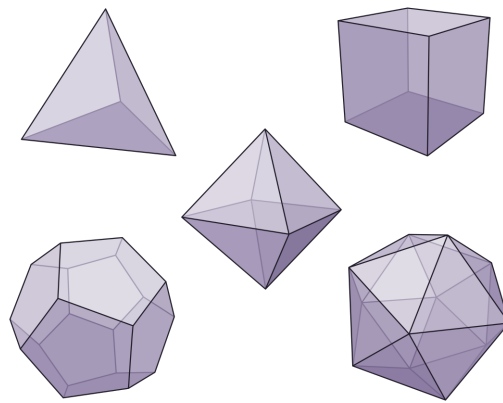
En ambos casos se requiere de la instalación de una válvula manual entre el depósito y la bandeja para evitar que fluya el agua mientras se está montando el nuevo garrafón con agua salada

5.4. Cálculos

5.4.1. Cálculos geométricos

Las dimensiones y diseño de cada una de las partes que forman la estructura del domo utilizado para protección del sistema de destilación y que brindará el soporte para los paneles de policarbonato, fueron calculadas a través del proceso de diseño de domos geodésicos a partir de sólidos platónicos, los cuales son cuerpos geométricos convexos, con todas sus caras regulares e iguales entre sí.

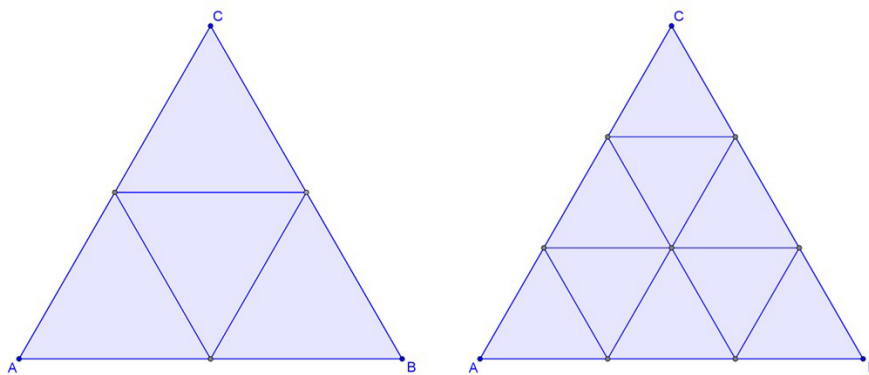
Figura 37: Domo geodésico del Jardín Botánico de Missouri



Fuente: (Fernández, 2021)

Un domo geodésico se genera a partir de fraccionar cada una de las caras del poliedro base, inscrito en una esfera con radio igual al deseado en el domo. Idealmente se toman como base aquellos que sus caras son triángulos, ya que cada una de las aristas de los triángulos se dividen en segmentos de igual tamaño como se observa a continuación:

Figura 38: Cara de poliedro con aristas fraccionadas

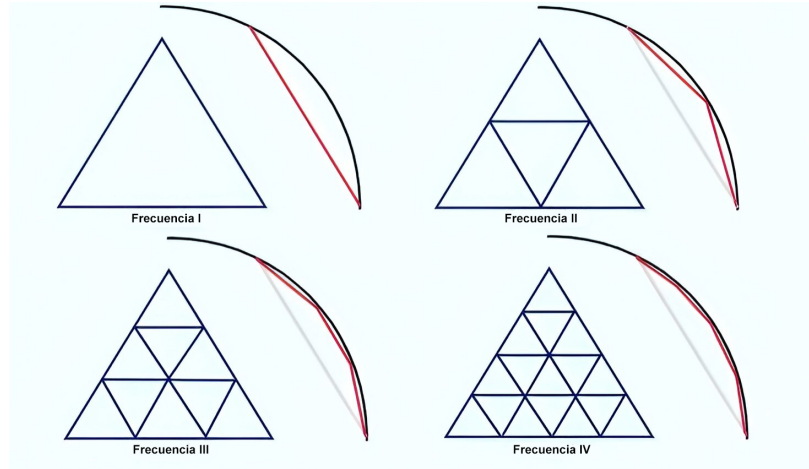


Fuente: Elaboración propia

Dependiendo de que tanto se desee que el domo se aproxime a una esfera, se aumentará la frecuencia del domo, la cual establece en cuantos segmentos se dividirá cada una de las aristas. En la Figura 38 se observan divisiones frecuencia II y frecuencia III respectivamente.

Luego se deben proyectar cada uno de los vértices nuevos obtenidos en el poliedro hacia la superficie de la esfera, conservando la dirección del vector que va desde el centro del poliedro hacia el vértice que se desea proyectar y variando únicamente su longitud.

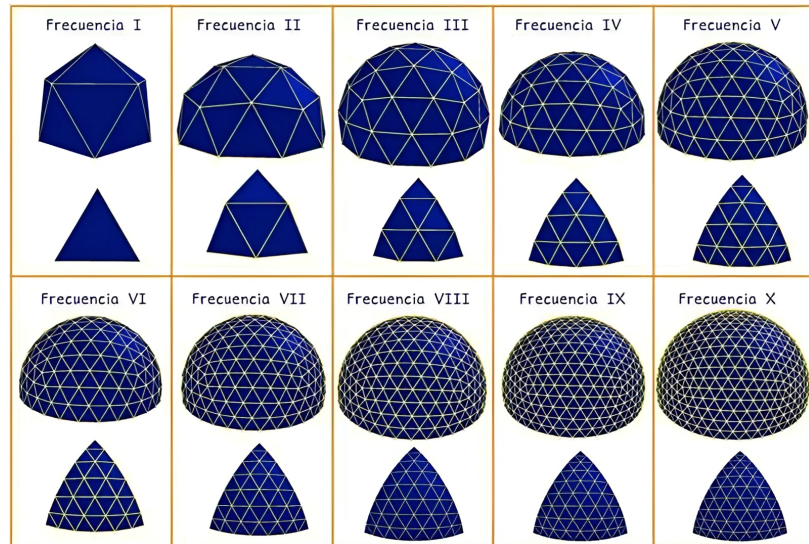
Figura 39: Proyección de vértices a superficies de esfera



Fuente: (Domorama, s.f.)

A cada uno de los triángulos proyectados hacia la esfera, se les llama triángulos esféricos y realizando el procedimiento para cada cara del poliedro obtenemos un cuerpo que se apega de mejor manera a la superficie de una esfera.

Figura 40: Domos geodésicos icosaédricos variando la frecuencia

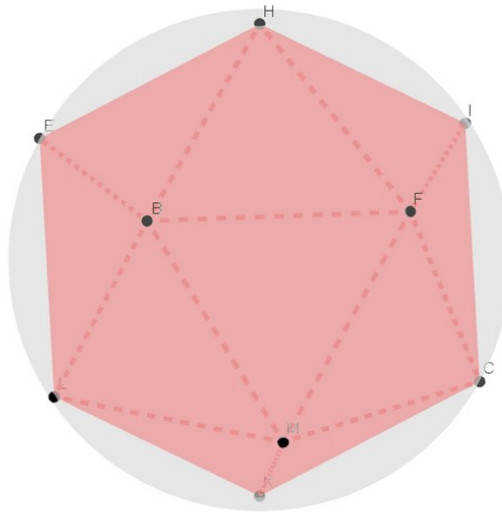


Fuente: (Márquez, s.f.)

Poliedro base inscrito en esfera

Con el objetivo de poder variar posteriormente el radio esférico del domo con mayor facilidad sin necesidad de volver a realizar todo el procedimiento, se inscribirá el poliedro en una esfera de radio 1, y de esa manera a cada una de las longitudes obtenidas se les llama factores de cuerda. Debido a que están basadas en un radio esférico de 1 unidad, si se desean las longitudes de las aristas para construir un domo de radio 5 m, por ejemplo, solo se multiplica cada factor de cuerda por 5 y de esa manera se tiene la longitud modificada.

Figura 41: Icosaedro inscrito en una esfera unitaria



Fuente: Elaboración propia

Según la teoría, para un icosaedro con aristas de longitud l se tienen las siguientes dimensiones.

Longitud de arista:

$$l = 1$$

Altura de los triángulos base del icosaedro:

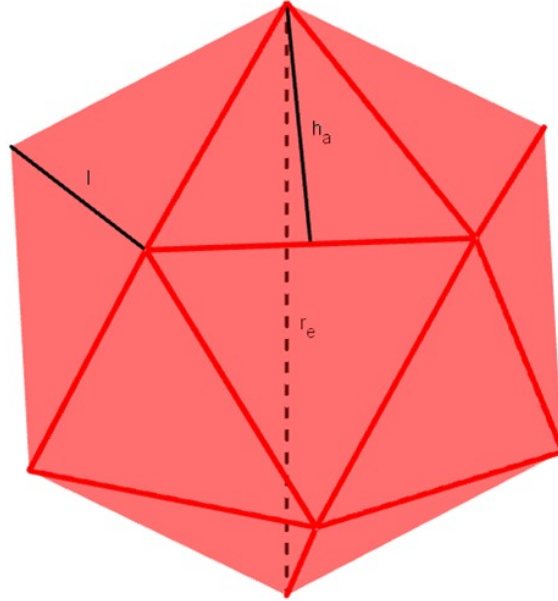
$$h_a = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Distancia entre el centro geométrico hacia cada vértice:

$$r_e = \frac{\sqrt{\phi^2 + 1}}{2}$$

En donde $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ es el número áureo. A la distancia entre centro y vértices se le llamara r_e dado que también es el radio de la esfera en la que está inscrito el poliedro.

Figura 42: Dimensiones de icosaedro



Fuente: Elaboración propia

Debido a que lo que se desea es que el radio de la esfera sea $r_e = 1$, se divide cada dimensión presentada anteriormente dentro del valor del radio obteniendo:

Distancia entre el centro geométrico hacia cada vértice:

$$r_e = 1 \tag{1}$$

Longitud de arista:

$$l = \frac{2}{\sqrt{\phi^2}} \tag{2}$$

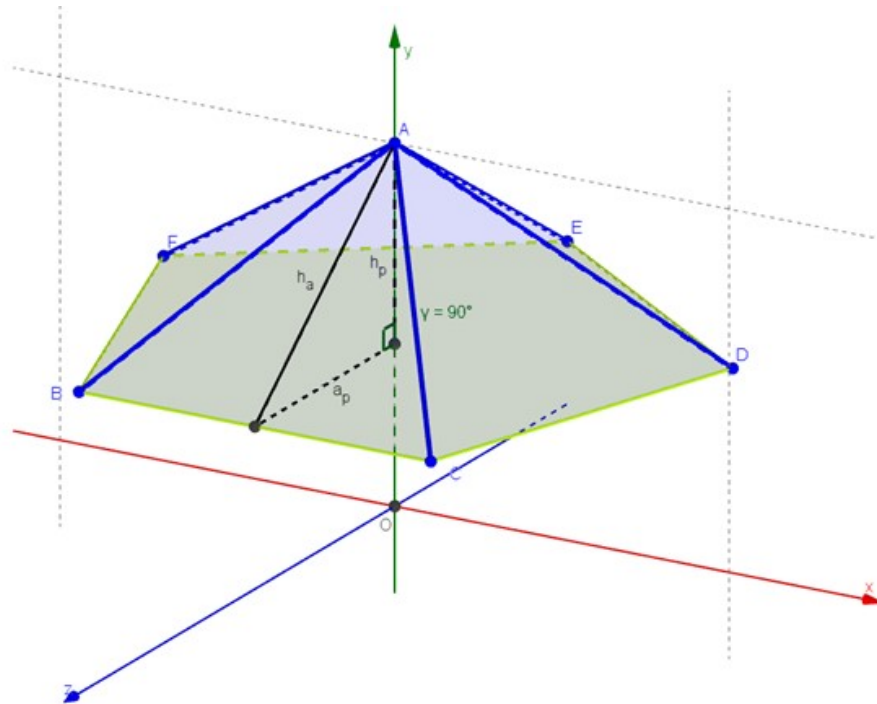
Altura de los triángulos base del icosaedro:

$$h_a = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{\phi^2 + 1}} \tag{3}$$

Luego, del icosaedro inscrito se toma únicamente una cara, para obtener los factores de cuerda que se replicarán en cada triángulo esférico. Para ello se considerará únicamente una de las pirámides pentagonales de las puntas.

Obtención coordenadas vértices

Figura 43: Pirámide pentagonal superior del icosaedro



Fuente: Elaboración propia

Se obtienen las coordenadas de los puntos $B(b_x, b_y, b_z)$ & $C(c_x, c_y, c_z)$ a partir del punto A que sabemos se encuentra en la coordenada $A(0, 1, 0)$.

- Coordenada X

Como se puede observar en la Figura 43, la base de la pirámide es un pentágono regular, con aristas de longitud l , con ello se puede calcular la coordenada en el *eje X* para cada uno de los puntos, partiendo desde el origen, $l/2$ hacia la derecha e izquierda.

- Coordenada Z

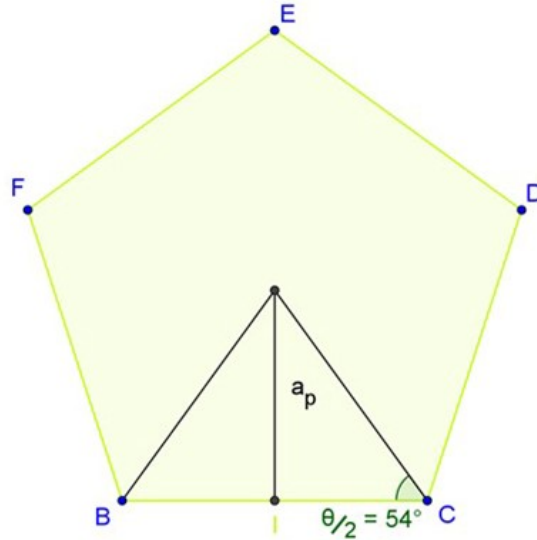
La distancia desde el centro de una de las aristas de un polígono regular hasta su centro se le llama apotema (a_p). Esta servirá para obtener la coordenada en el *eje Z* de los puntos.

- Coordenada Y

Y finalmente, teniendo la altura de cada cara h_a y la apotema a_p se puede calcular la altura de la pirámide h_p , la cual servirá para obtener la coordenada en el *eje Y*.

Cálculo de dimensiones requeridas

Figura 44: Apotema del pentágono base de pirámide presentada en Figura 43



Fuente: Elaboración propia

La ecuación para obtener la apotema, tomando en cuenta que

$$\theta = \frac{180^\circ (n - 2)}{n} \quad (4)$$

es la medida de los ángulos internos de un polígono regular, con n el número de lados. Se forman 2 triángulos rectángulos, por lo que:

$$a_p = \frac{l}{2} \tan(\theta/2) \quad (5)$$

Como se observa en la Figura 43, se crea un triángulo rectángulo con hipotenusa h_a y los catetos siendo h_p & a_p , se puede calcular el valor de la altura de la pirámide

$$h_p = \sqrt{h_a^2 - a_p^2} \quad (6)$$

Con las medidas anteriores las coordenadas para los puntos A & B son:

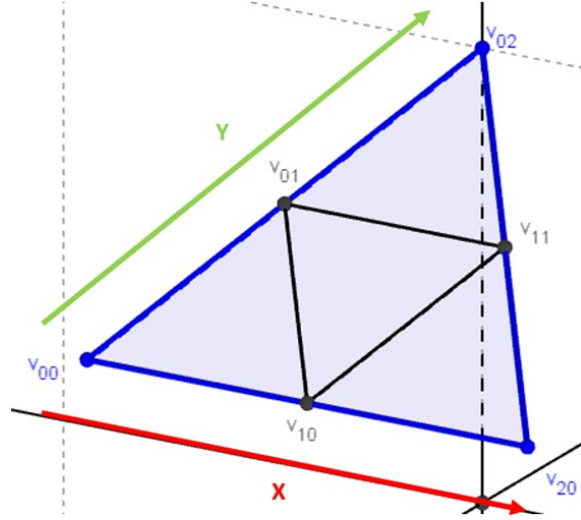
$$B = \left(-\frac{l}{2}, 1 - h_p, a_p\right)$$

$$C = \left(\frac{l}{2}, 1 - h_p, a_p\right)$$

Obtención coordenadas vértices adicionales

Tanto A , B & C son puntos que se encuentran sobre la superficie de la esfera circunscrita al icosaedro. Pero dado que se realizará un domo frecuencia II, obtendremos las coordenadas de los puntos medios entre cada vértice, como se observa en la Figura 45.

Figura 45: Coordenadas de puntos en triángulo segmentado



Fuente: Elaboración propia

El punto medio se obtiene sacando el promedio de las coordenadas de los puntos extremos por lo cual:

$$v_{10} = \left(\frac{v_{00} + v_{20}}{2} \right) = \left(\frac{l/2 + (-l/2)}{2}, \frac{(1 - h_p) + (1 - h_p)}{2}, \frac{a_p + a_p}{2} \right)$$

$$v_{01} = \left(\frac{v_{00} + v_{02}}{2} \right) = \left(\frac{0 + (-l/2)}{2}, \frac{1 + (1 - h_p)}{2}, \frac{0 + a_p}{2} \right)$$

$$v_{11} = \left(\frac{v_{20} + v_{02}}{2} \right) = \left(\frac{0 + (l/2)}{2}, \frac{1 + (1 - h_p)}{2}, \frac{0 + a_p}{2} \right)$$

Simplificando se obtiene:

$$v_{10} = (0, 1 - h_p, a_p) \tag{7}$$

$$v_{01} = \left(-\frac{l}{4}, 1 - \frac{h_p}{2}, \frac{a_p}{2} \right) \tag{8}$$

$$v_{11} = \left(\frac{l}{4}, 1 - \frac{h_p}{2}, \frac{a_p}{2} \right) \tag{9}$$

Proyección de vectores a superficie esférica

Cada uno de los puntos anteriores deben ser proyectados a la superficie de la esfera, lo cual se realizó normalizando cada vector, a fin de obtener vectores de longitud 1 a través de la siguiente fórmula:

$$\vec{w}_{ij} = \frac{\vec{v}_{ij}}{|\vec{v}_{ij}|}$$

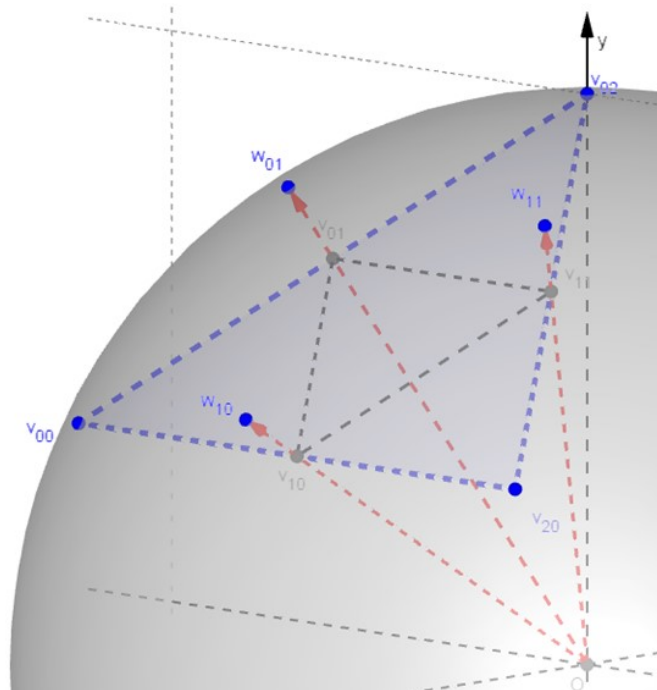
En donde \vec{w}_{ij} es el vector normalizado de \vec{v}_{ij} y $|\vec{v}_{ij}|$ es su módulo, obteniendo así:

$$w_{10} = \frac{(0, 1 - h_p, a_p)}{\sqrt{0^2 + (1 - h_p)^2 + a_p^2}} \quad (10)$$

$$w_{01} = \frac{\left(-\frac{l}{4}, 1 - \frac{h_p}{2}, \frac{a_p}{2}\right)}{\sqrt{\left(-\frac{l}{4}\right)^2 + \left(1 - \frac{h_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{a_p}{2}\right)^2}} \quad (11)$$

$$w_{11} = \frac{\left(\frac{l}{4}, 1 - \frac{h_p}{2}, \frac{a_p}{2}\right)}{\sqrt{\left(\frac{l}{4}\right)^2 + \left(1 - \frac{h_p}{2}\right)^2 + \left(\frac{a_p}{2}\right)^2}} \quad (12)$$

Figura 46: Vectores proyectados en superficie esférica

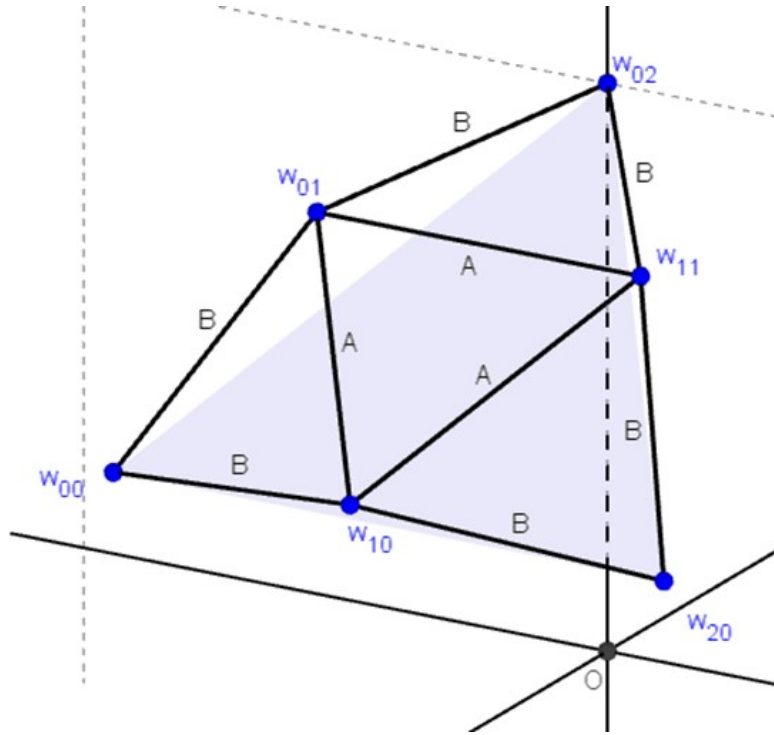


Fuente: Elaboración propia

Factores de cuerda

En la Figura 47 se observa el triángulo segmentado, pero ya en su forma esférica, con cada vértice sobre la superficie de la esfera. Cada una de las nuevas aristas tienen una longitud modificada, pero dada la simetría del triángulo, todas las aristas del perímetro tienen la misma longitud entre ellas, a estas se les etiquetará como B . Las aristas que se encuentran en el centro de triángulo tienen una longitud diferente, a estas se les etiquetará como A .

Figura 47: Triángulo esférico a partir de puntos proyectados



Fuente: Elaboración propia

Los factores de cuerda no son otra cosa más que la distancia entre vértices, la cual puede obtenerse a partir de:

$$d_{w_{ij}, w_{kl}} = \sqrt{(w_{kl_x} - w_{ij_x})^2 + (w_{kl_y} - w_{ij_y})^2 + (w_{kl_z} - w_{ij_z})^2} \quad (13)$$

Sabiendo que únicamente se tienen dos segmentos distintos se calculó la distancia entre w_{02} & w_{01} en el caso de la *arista B* y la distancia entre w_{01} & w_{11} en el caso de la *arista A*.

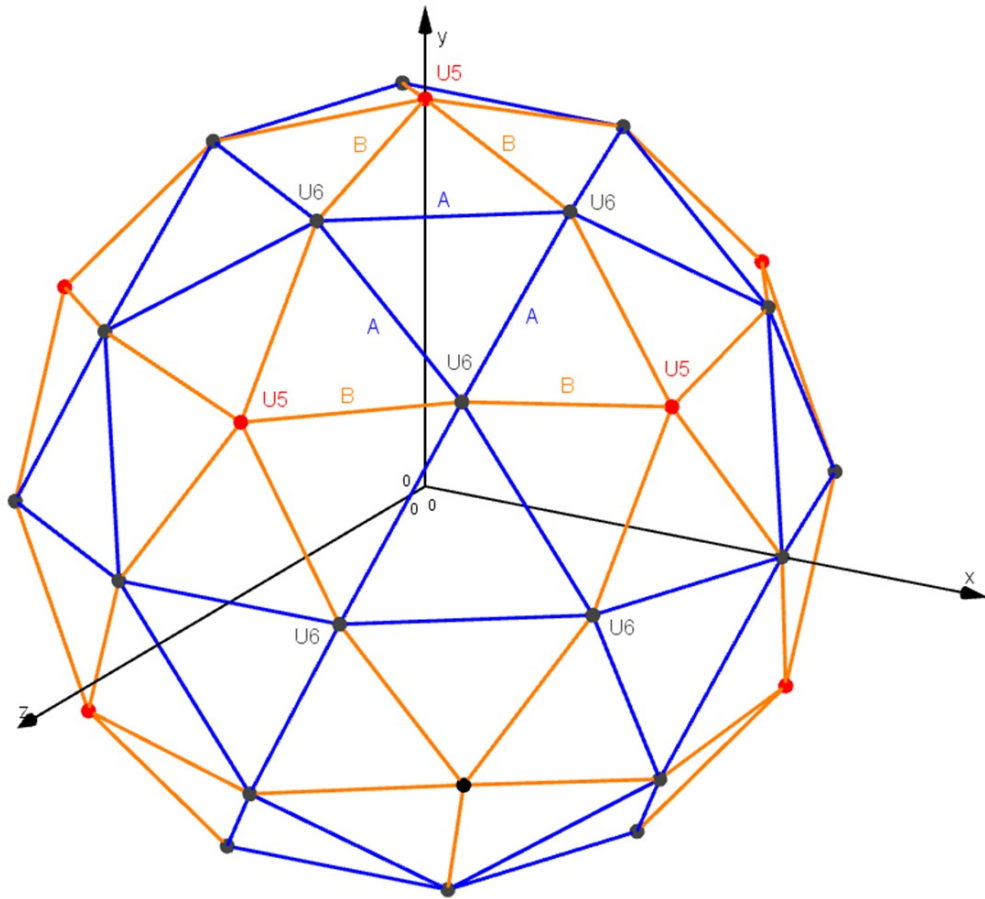
Cuadro 7: Factores de cuerda domo icosaédrico frecuencia II

Segmento	Factor de cuerda Aproximado
A	0.6180339887
B	0.5465330578

Determinación de ángulos en uniones

Como se observa en la Figura 48, a lo largo de toda la geometría se tienen únicamente 2 tipos de uniones, $U5$, las uniones en las que interceptan 5 aristas B y las $U6$, en las que interceptan 4 aristas A y 2 aristas B . Con el propósito de diseñar dichas uniones, se deben medir los ángulos entre cada arista y un plano tangente a la esfera en el punto de unión y los ángulos centrales que determinan la dirección que tomará cada arista respecto a la unión.

Figura 48: Esfera icosaédrica frecuencia II



Fuente: Elaboración propia

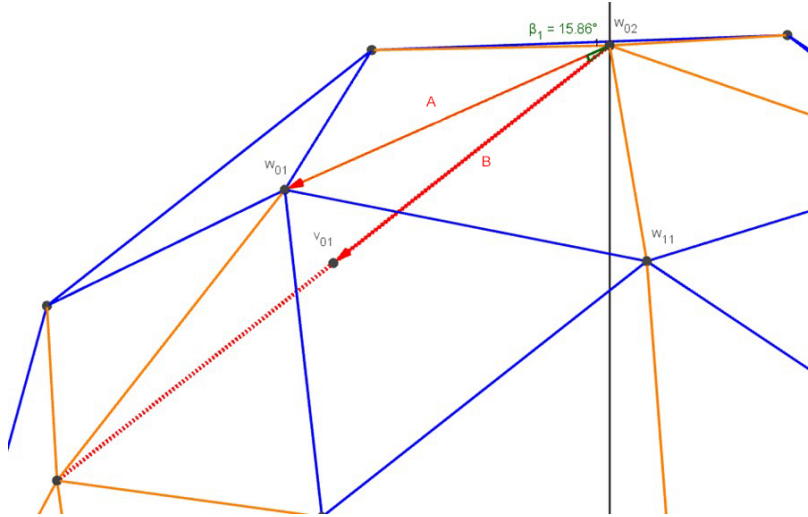
Cabe resaltar que, en el caso de las $U5$, todos los ángulos de inclinación son iguales (β_2). Por otro lado, en el caso de las $U6$ debido a que no es la punta de una figura regular, varían los ángulos. Específicamente se tendrán 2, los ángulos entre el plano tangente y las aristas A (α_1) y los ángulos entre el plano tangente y las aristas B (β_1).

Para los ángulos centrales se presenta el mismo caso, a los pertenecientes a la unión $U5$ se les nombró θ_2 y para los pertenecientes a la unión $U6$, se les llamó θ_{1A} al que se comprende entre aristas A y θ_{1B} a los que se ubican entre arista A & B .

Ángulos de la unión 6

Como se mencionó anteriormente, la unión 6 posee 2 ángulos distintos. En la Figura 49 se presentan los vectores $\vec{A} = w_{01} - w_{02}$ & $\vec{B} = v_{01} - w_{02}$ que formarán el ángulo β_1 .

Figura 49: Ángulo entre unión 6 y plano normal por la arista B



Fuente: Elaboración propia

Teniendo los vectores, se utiliza la siguiente ecuación para obtener el ángulo entre vectores:

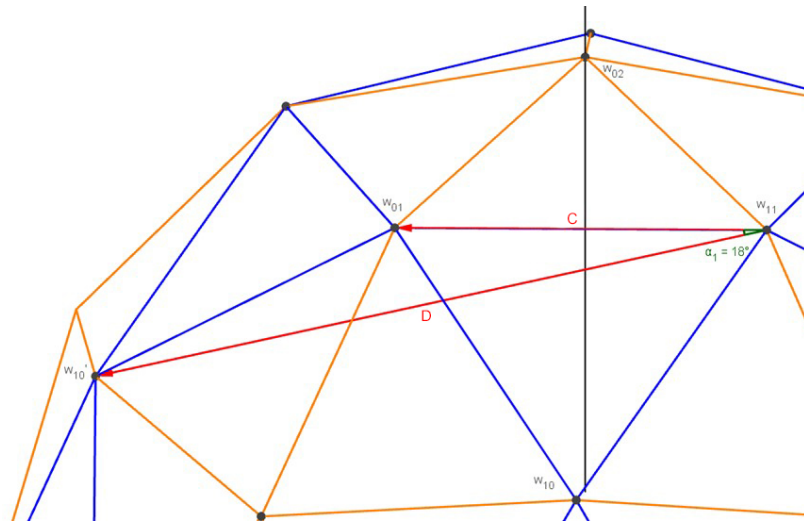
$$\vec{A} * \vec{B} = |A| |B| \cos \beta_1 \quad (14)$$

Se despeja para el ángulo entre ambos vectores obteniendo finalmente el ángulo tangencial:

$$\beta_1 \approx 15.859^\circ$$

Por otro lado, para la obtención del ángulo α_1 debe obtenerse primeramente la coordenada del punto w'_{10} , como puede observarse en la Figura 50, tiene la misma posición que el punto w_{01} pero en su triángulo esférico respectivo, a 72° rotando alrededor del *eje Y*.

Figura 50: Ángulo entre unión 6 y plano normal por la arista A



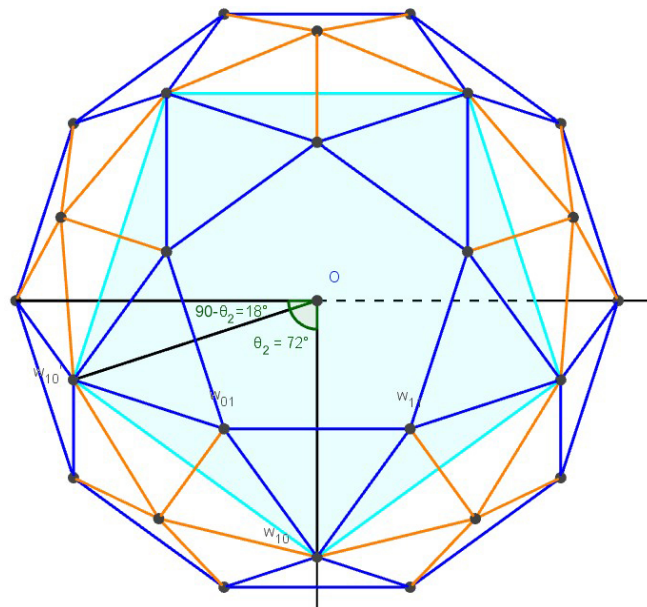
Fuente: Elaboración propia

Dado que tanto w_{10} como w'_{10} comparten la misma distancia hacia el eje Y , las coordenadas del nuevo vértice pueden definirse como:

$$w'_{10_x} = -w_{10_z} \cos(90 - \theta_2)$$

$$w'_{10_z} = w_{10_z} \sin(90 - \theta_2)$$

Figura 51: Rotación de w_{10} a un ángulo θ_2 para obtención de w'_{10}



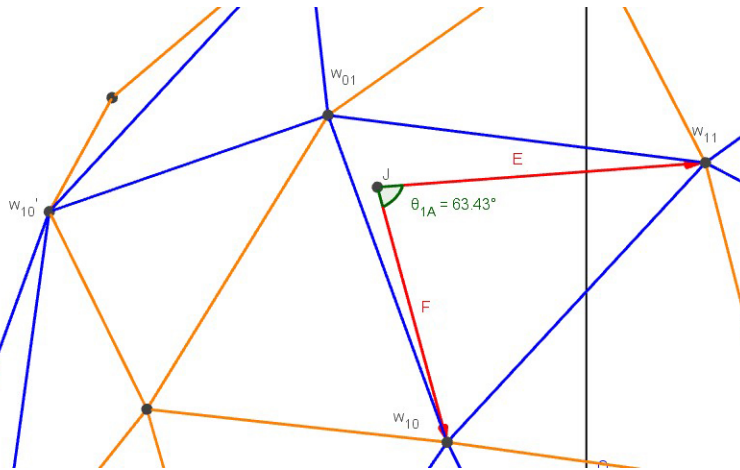
Fuente: Elaboración propia

Con los vectores $\vec{C} = w_{01} - w_{11}$ & $\vec{D} = w'_{10} - w_{11}$ observados en la Figura 50, obtenemos el segundo ángulo tangencial:

$$\alpha_1 = 18^\circ$$

En el caso de los ángulos centrales, es necesario obtener los puntos medios entre vértices opuestos. En el caso de la unión 6, debido a la diferencia de longitudes entre las aristas A & B , no se tiene un solo punto. El punto J presentado en la Figura 52 es el punto medio entre w'_{10} & w_{11} .

Figura 52: Ángulo central entre proyecciones de aristas A



Fuente: Elaboración propia

Con ayuda de los vectores $\vec{E} = w_{11} - J$ & $\vec{F} = w_{10} - J$ observados en la Figura 52, obtenemos el ángulo central:

$$\theta_{1A} \approx 63.435^\circ$$

Sabiendo que la suma de los ángulos centrales es $2\theta_{1A} + 4\theta_{1B} = 360^\circ$, el ángulo faltante es:

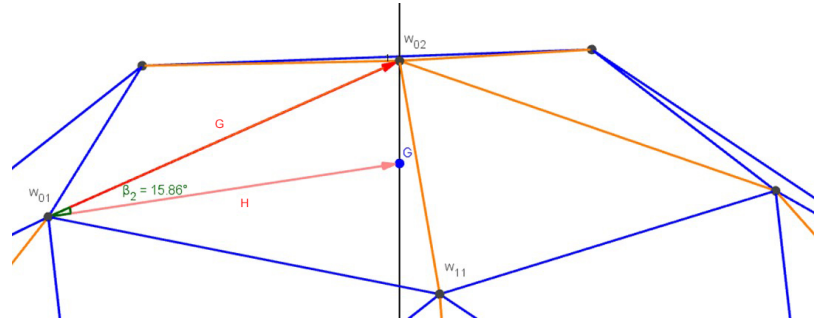
$$\theta_{1B} \approx 58.282^\circ$$

Ángulos de la unión 5

Tomando el pentágono superior de la esfera, se obtienen las coordenadas del punto G mostrado en la Figura 53. Este punto se encuentra sobre el *eje Y* con una coordenada igual a los vértices de la base de la pirámide pentagonal. Se tomó específicamente el punto w_{01} presentado en la Figura 47.

$$G = \left(0, \frac{1 - \frac{h_p}{2}}{\sqrt{\left(-\frac{l}{4}\right)^2 + \left(1 - \frac{h_p}{2}\right)^2 \left(\frac{a_p}{2}\right)^2}}, 0 \right) \quad (15)$$

Figura 53: Ángulo central entre proyecciones de aristas A



Fuente: Elaboración propia

A partir de los tres puntos, se determinan los vectores $\vec{G} = w_{02} - w_{01}$ & $\vec{H} = G - w_{01}$ y se obtiene el ángulo tangencial:

$$\beta_2 \approx 15.859^\circ$$

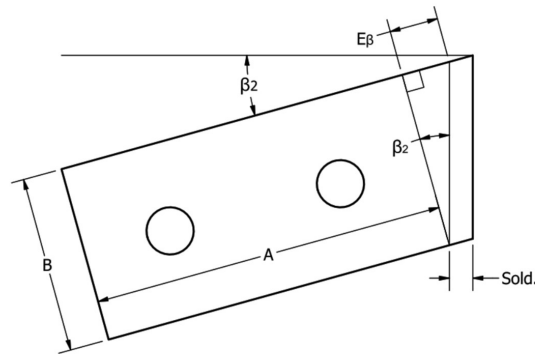
El ángulo central para la unión 5 debido a que presenta el origen de una pirámide pentagonal regular, simplemente resulta de:

$$\theta_2 = \frac{360^\circ}{n} = 72^\circ \quad (16)$$

Dimensionamiento de las alas de las uniones

Para las alas de las uniones se utilizarán perfiles planos y estos estarán soldados a un tubo central que brindará el soporte. Debido a esto, debe dimensionarse correctamente la longitud de cada ala a fin de que luego de realizar el corte por su inclinación y realizar la soldadura, se mantenga la longitud deseada de contacto con las aristas o perfiles T.

Figura 54: Ángulo central entre proyecciones de aristas A



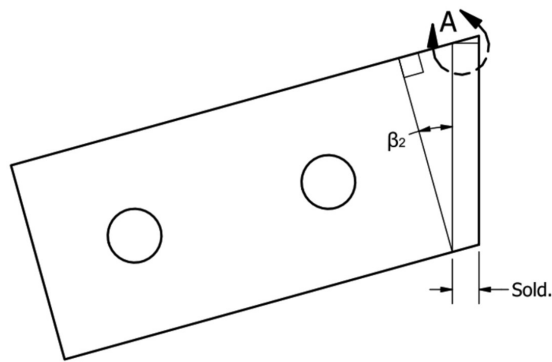
Fuente: Elaboración propia

Por la inclinación, la longitud inicial del perfil debe ser mayor que la longitud A , siendo lo que se desea que esté en contacto entre el ala con cada arista. Sabiendo que el ancho del perfil es B y tomando en cuenta β_2 , se tiene que la longitud extra por la inclinación es:

$$E_\beta = B * \tan \beta_2 \quad (17)$$

Adicional a ello, debe considerarse también la longitud adicional debido a la soldadura. En la Figura 56 se observa en detalle la parte superior derecha (Detalle A).

Figura 55: Ubicación detalle A, unión 5

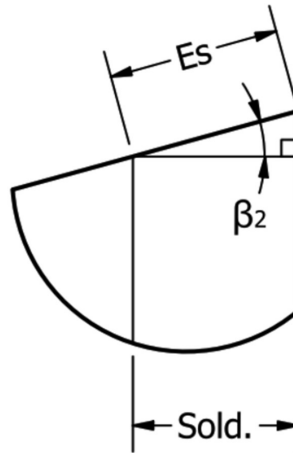


Fuente: Elaboración propia

Sabiendo que la base del triángulo formado es el ancho de la soldadura, se tiene que la longitud extra por soldadura es:

$$E_s = Sold / \cos \beta_2 \quad (18)$$

Figura 56: Detalle A, longitud adicional por soldadura, unión 5



Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento se repite con las alas para las aristas A & B en la unión 6, variando únicamente el ángulo de inclinación (α_1 & β_1). Y como se mencionó anteriormente, a pesar de estar desglosados los cálculos para uniones de 5 y 6 aristas, las uniones inferiores observadas en la Figura 22, de 4 aristas, son únicamente uniones 6 sin 2 de sus alas.

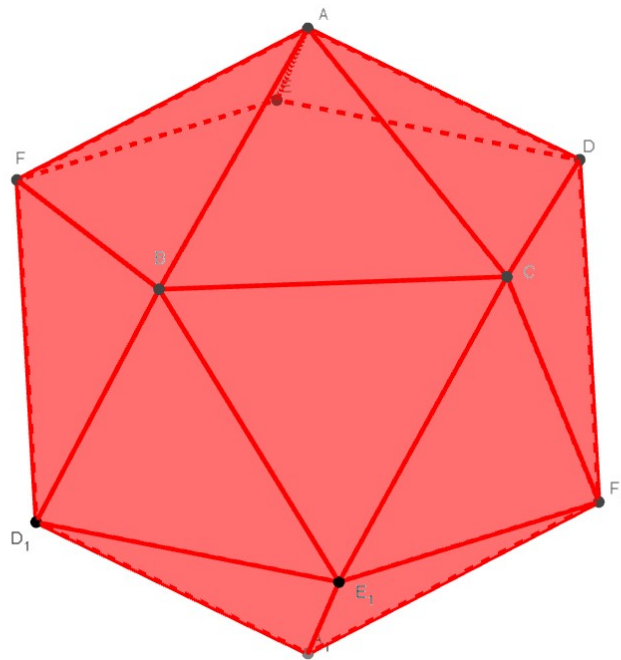
5.4.2. Cálculos de resistencia

Planteamiento de elementos finitos

Una de las principales ventajas de los domos geodésicos es que representan una construcción sólida, ya que las fuerzas aplicadas son distribuidas al resto de los elementos. Debido a que está construido por triángulos estructurales, la única figura que mantiene su forma por naturaleza, le brinda una estabilidad única, tal y como sucede con la mayoría de los puentes construidos hoy en día.

Al ser una estructura que está formada en su gran mayoría por elementos rectos de área transversal constante, puede realizarse una aproximación mediante el cálculo de armaduras. Para ello es necesario como primer paso, ubicar cada uno de los nodos donde se unirán los elementos de la estructura en el espacio y con el fin de no tener errores por aproximación, se realizó un código en Matlab realizando transformaciones de rotación y traslación a partir de un punto.

Figura 57: Puntos en icosaedro, referencia para Matlab



Fuente: Elaboración propia

El punto A es el mismo que la punta de la pirámide pentagonal presentada en la Figura 43, con coordenadas $(0, 1, 0)$.

A partir de este punto, utilizando los valores obtenidos en las ecuaciones 2, 5 y 6, se obtiene la coordenada de B y posteriormente dado que los puntos C , D , E y F se encuentran sobre el mismo plano, rotando 72° entre cada punto se utilizó el mismo procedimiento cambiando el punto inicial del que se quiere partir para realizar la rotación respecto al *eje Y*. Para ello se utilizó:

$$P_{inicial} = T_{rotación,-Y} * P_{final} \quad (19)$$

$$T_{rotación,-Y} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & -\sin(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_2) & 0 & \cos(\theta_2) \end{bmatrix}$$

Ya que se desea saber la coordenada del punto C , se multiplicó el vector B por la inversa de la matriz de rotación respecto al *eje Y*, y se utilizó el mismo procedimiento para los demás puntos:

$$C = T_{rotación,-Y}^{-1} * B$$

$$D = T_{rotación,-Y}^{-1} * C$$

$$E = T_{rotación,-Y}^{-1} * D$$

$$F = T_{rotación,-Y}^{-1} * E$$

Posterior a ello, se realizó una reflexión respecto al origen y así se obtuvieron las coordenadas de los 5 puntos inferiores (B_1, C_1, D_1, E_1, F_1). Para ello se utilizó la siguiente matriz:

$$T_{centro} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Luego, se realizó el procedimiento de punto medio entre los puntos adyacentes, y normalización, tal y como se describió anteriormente, almacenando cada uno de los vectores obtenidos en una matriz de puntos P que posteriormente se exporta a un archivo Excel para su uso posterior en ANSYS.

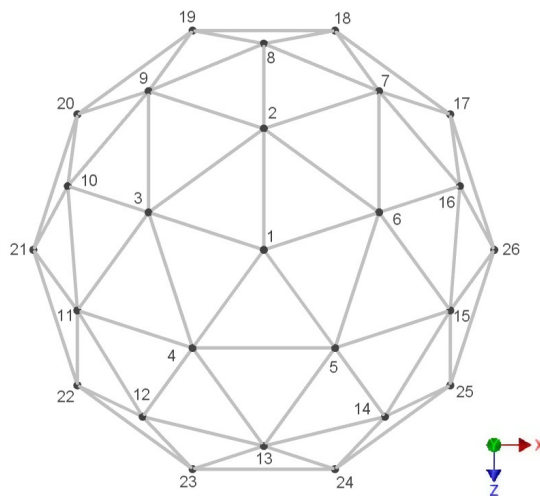
En una hoja de Excel se realizó la Tabla 17 con la siguiente información de cada uno de los 65 elementos que conforman la armadura del domo:

- Identificación del elemento
- Nodo i
- Nodo j
- Coordenadas (X, Y, Z) del nodo i
- Coordenadas (X, Y, Z) del nodo j
- Longitud en mm del elemento
- Coseno respecto a *eje X*
- Coseno respecto a *eje Y*
- Coseno respecto a *eje Z*
- Área transversal del elemento
- Módulo de elasticidad del material del elemento
- Constante de resorte o de rigidez equivalente del elemento

Tanto las coordenadas de los nodos como los cosenos respecto a los tres ejes se obtuvieron a partir del código realizado en Matlab.

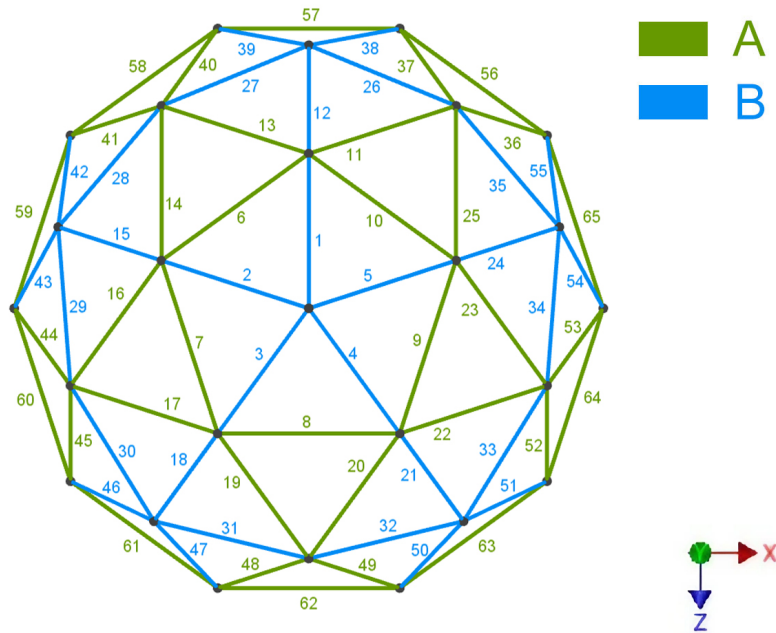
En las figuras 58 y 59 se presentan las etiquetas para cada uno de los nodos y los elementos que conforman la armadura para una mejor identificación al momento de su referencia a lo largo de este documento.

Figura 58: Etiquetas de nodos de armadura



Fuente: Elaboración propia

Figura 59: Etiquetas de elementos de armadura



Fuente: Elaboración propia

Teniendo cada uno de los datos anteriores se obtuvo la matriz de rigidez equivalente global, realizando una revisión fila por fila, tomando los índices como parámetro de ubicación. Para el vector de fuerzas, se tomó como supuesto que las fuerzas del peso distribuidas están siendo simplificadas de forma que cada nodo soporta la mitad del peso de cada uno de los elementos que une. Esto con el fin de poder tomar como supuesto que los elementos se encuentran sometidos únicamente a fuerzas de tensión y compresión. Adicionalmente, se supuso que una persona de 1000 N de peso (aproximadamente 225 libras) se encuentra parada en el nodo 1.

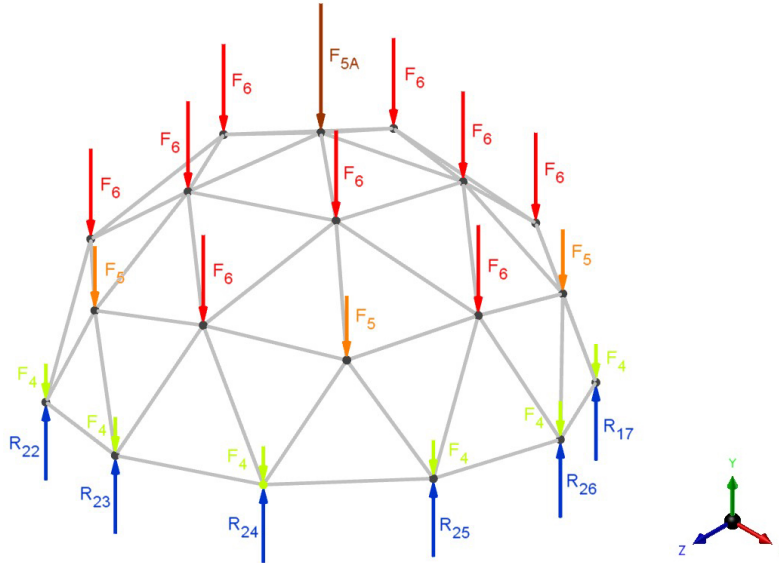
Ya que se tienen únicamente 2 longitudes distintas para los elementos de la estructura completa, las cargas en los nodos estarán en función de la cantidad de cada tipo de arista a las que este dé soporte, teniendo:

Cuadro 8: Cargas aplicadas a las uniones de la armadura

Tipo de unión	Carga aplicada
4	3.64 N
5	4.70 N
6	6.14 N
5, nodo 1	1004.70 N

Como condiciones frontera, se estableció que los nodos de la base, del 56 al 65, se encontraban restringidos de todo movimiento, ya que se encontrarán empotrados en la base del domo.

Figura 60: Diagrama de cuerpo libre armadura



Fuente: Elaboración propia

La fuerza F_{5A} representa tanto el peso repartido de los cinco elementos que sostiene el nodo 1 así como el peso adicional de 1000 N .

Para obtener los desplazamientos globales de los nodos, se utilizó la siguiente ecuación:

$$U = K_e^{-1} * F \quad (20)$$

En donde,

- $U = \text{Vector Desplazamientos Globales}$
- $K_e = \text{Matriz de Rigidez Equivalente}$
- $F = \text{Vector de Fuerzas}$

Es importante tomar en cuenta que debido a que se tienen condiciones frontera, se operó únicamente con una matriz global simplificada, removiendo las filas y columnas correspondientes a las coordenadas correspondientes de los nodos que tienen alguna condición frontera.

Luego, se convierten las coordenadas globales a locales a través de la siguiente ecuación:

$$u = T^{-1} * U \quad (21)$$

En donde T es la matriz de transformación y se define como:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_x) & 0 \\ \cos(\theta_y) & 0 \\ \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) \\ 0 & \cos(\theta_y) \\ 0 & \cos(\theta_z) \end{bmatrix}$$

Y finalmente, para obtener los esfuerzos axiales a los que está sometido cada elemento, se debe tomar en cuenta el cambio en la longitud de cada elemento:

$$\sigma = E \left(\frac{u_{ix} - u_{jx}}{L} \right) \quad (22)$$

Siendo u_{ix} el desplazamiento en el *eje x* local del nodo *i*, y u_{jx} el desplazamiento en el *eje x* local del nodo *j*.

A continuación, se presenta un fragmento del código en Matlab para el análisis de elementos finitos. En el apartado Anexos se presenta el código completo.

Figura 61: Fragmento de código en Matlab para elementos finitos

Código MATLAB para elementos finitos

```
%Programa para cálculo de esfuerzos por el método de Elementos Finitos
%Elementos que conforman la armadura del domo de colección en 3D

%Definición de constantes y longitudes
phi = (1+sqrt(5))/2;
l = 2/sqrt(phi^2+1);
h_a = sqrt(3/(phi^2+1));
theta = deg2rad(180*(5-2)/5);
theta2 = deg2rad(360/5);
a_p = l/2*tan(theta/2);
h_p = sqrt(h_a^2 - a_p^2);
r = 400;

Tmatriz_rot = [cos(theta2) 0 -sin(theta2) ; 0 1 0 ; sin(theta2) 0 cos(theta2)]
%Puntos Icosaedro mitad superior a partir de rotación con matriz de
%rotación
P(:,1) = [0 ; 1 ; 0];
P(:,8) = [0 ; 1-h_p ; -sqrt((1/2)^2 + (a_p)^2)];
P(:,10) = Tmatriz_rot\P(:,8);
P(:,12) = Tmatriz_rot\P(:,10);
P(:,14) = Tmatriz_rot\P(:,12);
P(:,16) = Tmatriz_rot\P(:,14);
```

Fuente: Elaboración propia

Teoría de la energía de distorsión

Tomando en cuenta que el material de la estructura es un material dúctil que presenta el mismo valor de resistencia a la fluencia en tensión y en compresión, se selecciona como teoría de falla ED. Para ello, es necesario calcular el esfuerzo equivalente de Von Mises:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

Dado que los elementos se consideran únicamente a tensión o compresión, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

Por lo que:

$$\sigma' = \sigma_1 = \sigma_{m\acute{a}x}$$

Con lo cual obtenemos que el factor de seguridad del elemento que se encuentra a mayores esfuerzos es:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (24)$$

El factor de seguridad indica, a partir de la resistencia por fluencia del material, la sobre capacidad que el material tiene de soportar las cargas a las cuales se le está sometiendo. Así un valor de $n = 2$ nos indica que el material es capaz de soportar 2 veces la carga aplicada, antes de fallar.

5.5. Simulación y análisis

Con el fin de poder realizar un análisis, igualmente estático de la estructura, pero sin los supuestos de que los elementos están sometidos únicamente a tensión. Tal y como se mencionó anteriormente, se exportó un archivo de Excel con las coordenadas de cada uno de los nodos para poder utilizarlas en DesignModeler de ANSYS.

Con el fin de simplificar la simulación, no se incluyeron los elementos horizontales de la base. Esto dado que los nodos que los unen se encontrarán como un apoyo fijo, provocando que estos no soporten ningún tipo de fuerza.

Para el correcto análisis y comparación de los resultados obtenidos en ANSYS contra aquellos presentados en Matlab debe mencionarse que las fuerzas y esfuerzos axiales tienen una diferente interpretación en ambos.

A continuación, se presenta una tabla con el fin de poder tener una mejor noción de dichas diferencias.

Cuadro 9: Correspondencia de signos entre *software*

Signo de fuerza o esfuerzo	Matlab	ANSYS
+	Compresión	Tensión
-	Tensión	Compresión

Armadura

Figura 62: Armadura generada en ANSYS

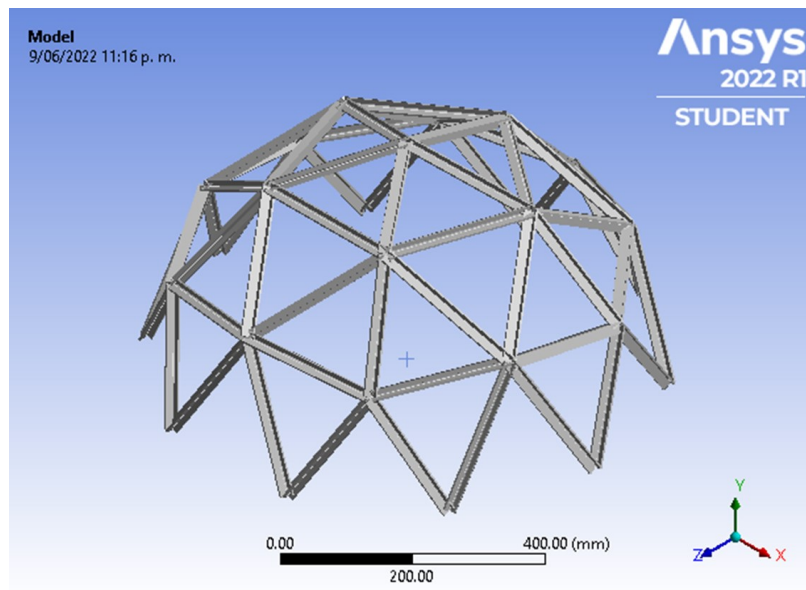


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Soportes

Sabiendo que la estructura se encontrará fija sobre la base, con los nodos 17 a 26 empotrados, se colocaron soportes fijos para cada uno de estos nodos.

Figura 63: Soportes fijos en los nodos 17 a 26

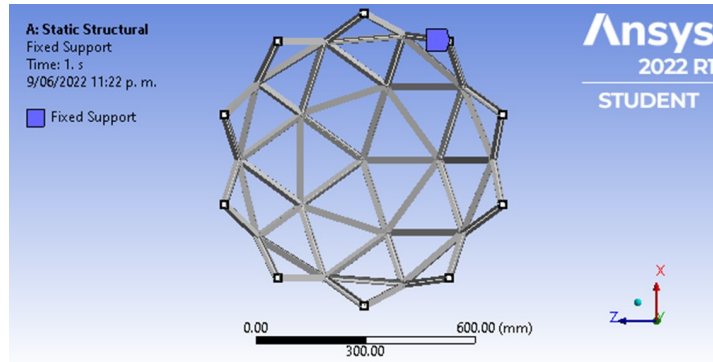


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Cargas

Al igual que el análisis en Matlab, se colocó una carga de 1000 N en el nodo 1 verticalmente hacia abajo, representada por el vector rojo, y en este caso, se incluyó el efecto causado por la gravedad, lo cual provoca la inclusión de cargas distribuidas en cada uno de los elementos, representado por el vector amarillo.

Figura 64: Cargas aplicadas a la estructura

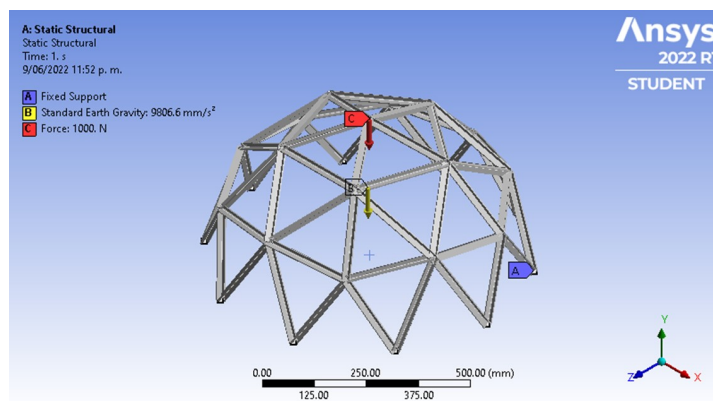


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Mallado

Debido a que el análisis es a partir de la suposición de elementos rectos de área constante, el mallado no afecta al aumentar o disminuir respecto al generado automáticamente por ANSYS. Esto puede comprobarse ya que se obtienen los mismos resultados independientemente del mallado.

5.6. Diseño y fabricación del prototipo

El prototipo de la superficie de condensación se realizó con la utilización de varillas de madera, con el fin de reducir costos dado que se trata de una primera iteración. El propósito de esta primera iteración es observar el resultado en la geometría e identificar las dificultades que tendría el ensamble de las placas con los perfiles T del diseño.

Figura 65: Sierra ingletadora y sus partes



Para la elaboración de los cortes de cada varilla o arista del domo, se contó con el acceso a una sierra ingletadora. Ésta no solamente brindará una mayor precisión y uniformidad en la realización de los cortes sino también permite la realización de cortes tanto en inglete, como en bisel. En la Figura 65, se presenta una sierra con sus partes principales.

Ángulos de corte de la sierra

La sierra ingletadora es capaz de realizar cortes variando dos ángulos, lo que da una mayor flexibilidad en cuanto a la construcción de geometrías más complejas.

- Corte en inglete

Permite variar el ángulo de corte, rotando el dispositivo alrededor del *eje Y*.

Figura 66: Sierra ingletadora - Corte en inglete



- Corte en bisel

Permite variar el ángulo de corte, rotando el dispositivo alrededor del *eje Z*.

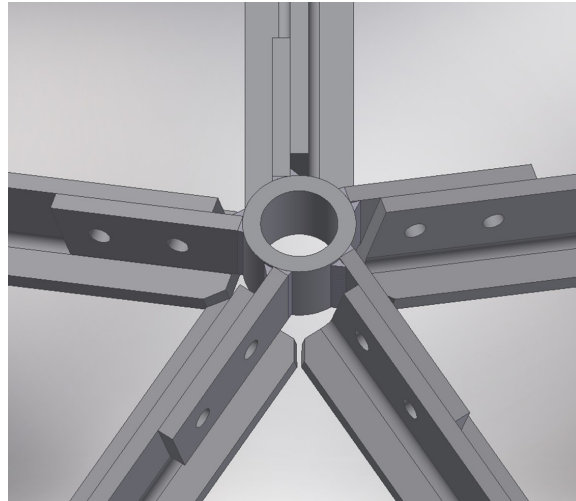
Figura 67: Sierra ingletadora - Corte en bisel



5.6.1. Diseño del prototipo

Debido a que el prototipo será de madera, se puede realizar un ensamble seguro sin la necesidad de alguna pieza que sostenga de forma radial a cada uno de los elementos tal y como en el caso de la estructura metálica.

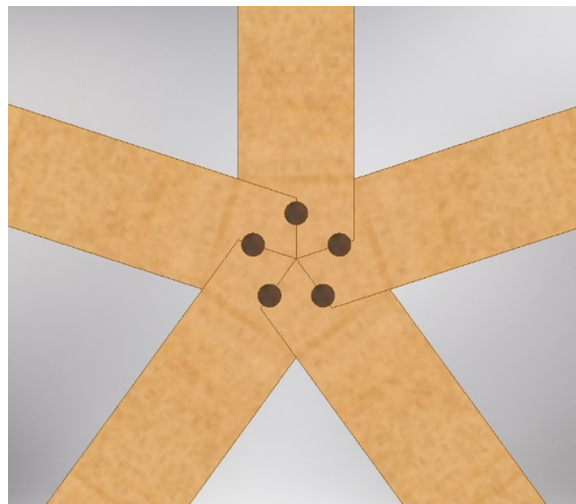
Figura 68: Unión de elementos de estructura de metal



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Inicialmente se propuso recortar cada varilla a modo que encajen las piezas en el vértice como se muestra en la Figura 69, utilizando pegamento blanco y clavijas para asegurar una unión firme, y así mismo facilitar el ensamble de la estructura completa.

Figura 69: Unión de elementos de estructura de madera

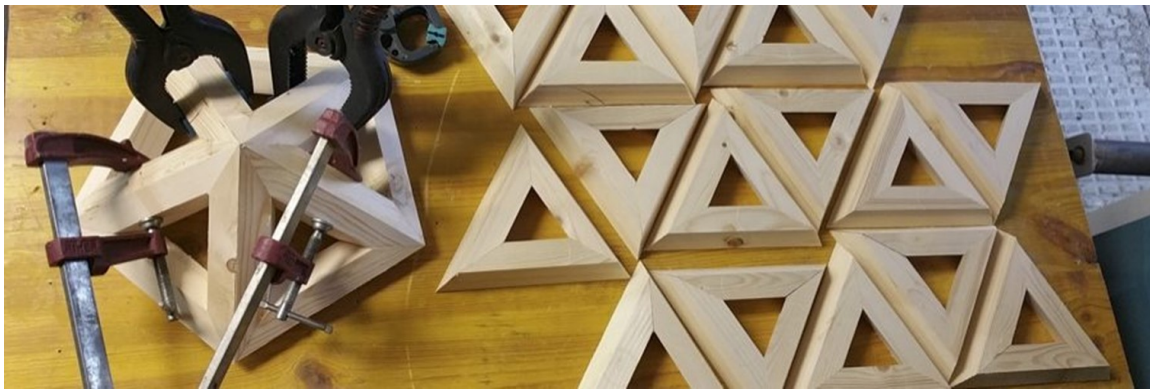


Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Se realizaron algunas pruebas de corte para la geometría de los puntos de unión. Se observó que luego de realizar los cortes mostrados en la Figura 101, el espacio disponible par la colocación de los tarugos de madera era muy poca, tomando en consideración que el menor diámetro de tarugos disponibles es de $\frac{1}{4}$ ".

Por otro lado, el cambio de ángulos entre superficies representó un alto nivel de dificultad en la realización de los distintos cortes sin dañar alguna otra parte de las varas y una alta complejidad en la realización del ensamble debido a que se requirió de tener las cinco piezas juntas para evitar movimientos o traslaciones indeseadas. Por estas razones se optó por un cambio de diseño del prototipo, dividiendo cada arista en dos para obtener un resultado similar al siguiente:

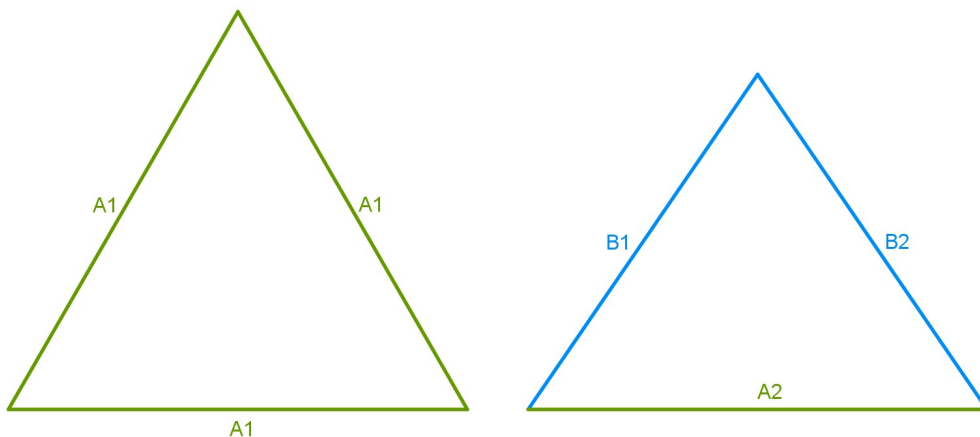
Figura 70: Icosaedro de madera, formado por la unión de triángulos continuos



5.6.1.1. Dimensionamiento de las varillas

Cada arista del domo ensamblado, está compuesto por lados de triángulos continuos. Sabiendo que el domo lo conforman dos longitudes de aristas diferentes, y dos tipos de triángulos, como se observa en la Figura 59, a cada arista se le asignarán dos tipos de varillas con nomenclatura diferente en dependencia de a cual de los tipos de triángulos pertenece.

Figura 71: Triángulos que conforman al domo



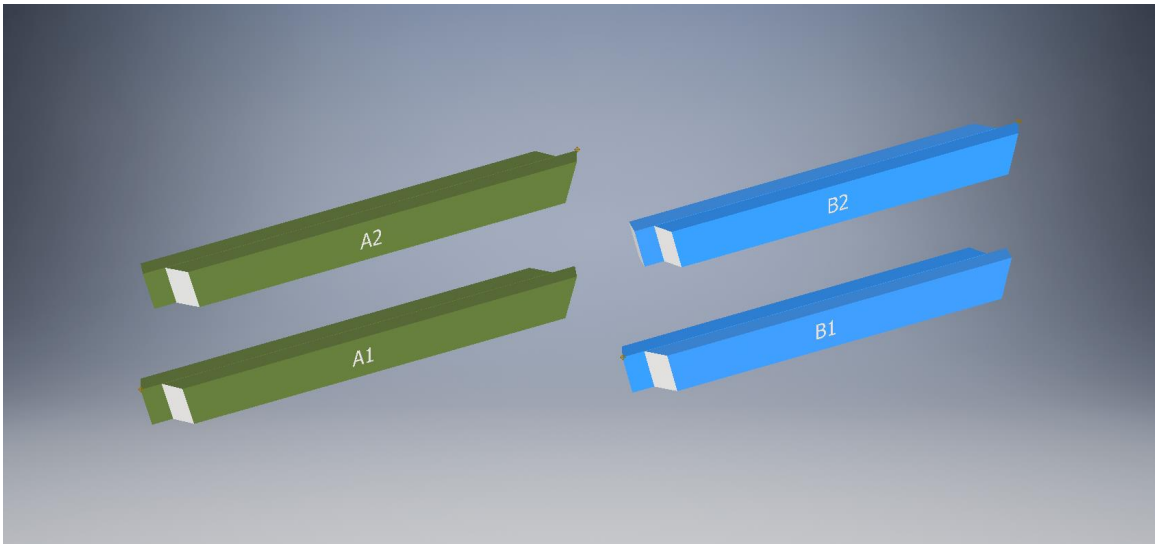
La longitud de cada arista va en función del radio deseado para el domo, así como de los factores de cuerda presentados en el Cuadro 7. Con un prototipo de 0.5 m de radio las longitudes base quedan:

Cuadro 10: Longitudes de aristas para el prototipo, frecuencia II

Arista	Longitud (cm)
A	30.9
B	27.3

Se conservó el mismo diseño planteado inicialmente para cada arista presentado en la Figura 100 con el fin que en los vértices las superficies de unión puedan dar una geometría más estable para su ensamble, así como facilitar la unión de los triángulos del domo como se explicará posteriormente.

Figura 72: Varas A & B que conforman el domo geodésico frecuencia II



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Para su correcta identificación a lo largo del documento, a cada mitad de la arista se le llamará varilla A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , y a la unión de ambas varillas se le llamará vara $A&B$. Esto es importante debido a que los ángulos de corte varían dependiendo de a qué triángulo pertenecen, a pesar de ser parte de la misma vara. En la figura anterior se presentan ambos lados de ambas varas

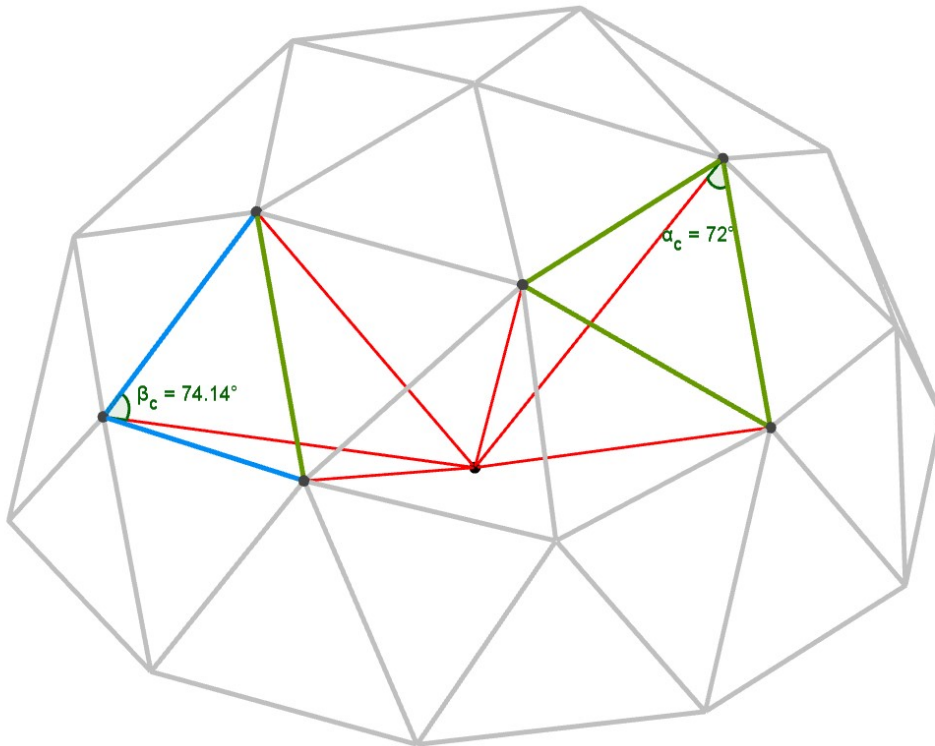
Ángulos de corte

Para la fabricación de cada una de las varillas, se requiere de dos ángulos de corte:

- Ángulo axial

Es el ángulo que se forma entre cada arista y una línea que va desde uno de sus extremos hasta el centro del domo. Este se relaciona con la curvatura del domo, ya que si no se considera en la construcción, al ensamblar los triángulos quedarían formando una superficie completamente plana y no curva como se desea. Éste ángulo estará relacionado con el ángulo de inglete de la sierra.

Figura 73: Ángulos axiales para varas A & B



Para las varas tipo A, el ángulo α_c es el complemento del ángulo α_1 .

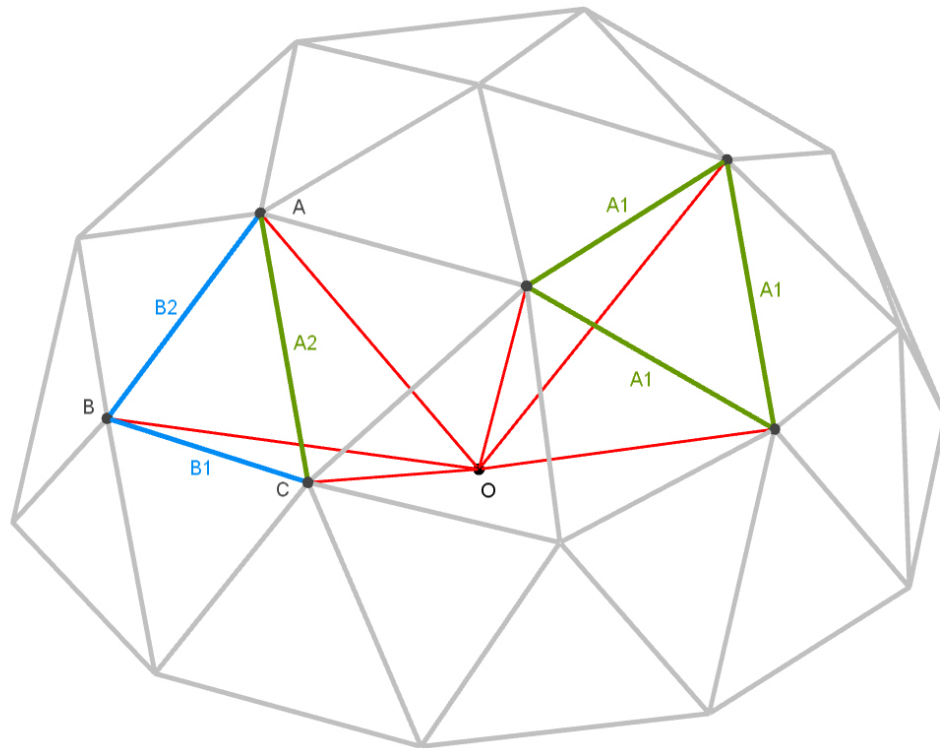
Para las varas tipo B, el ángulo β_c es el complemento de los ángulos β_1 & β_2

Estos ángulos son los mismos calculados como ángulos tangenciales en la sección "Determinación de ángulos en uniones"

- Ángulo planar

Es el ángulo requerido para la formación de los triángulos. Tomando en cuenta que las piezas no se originan de un prisma triangular, sino de una pirámide triangular truncada, este ángulo no es el mismo que los ángulos internos del triángulo. Para cada vértice, es el ángulo que se forma entre los planos de las caras laterales de la pirámide. Este ángulo estará relacionado con el ángulo de bisel de la sierra.

Figura 74: Ángulos planares



Para una mejor visualización, si tomamos el plano ABO y el plano ACO , el ángulo planar para la intersección de las varillas B_2 y A_2 será el ángulo entre ambos planos. Así tendremos:

Para la intersección entre A_1 y A_1 , el ángulo planar es θ_{1A} .

Para la intersección entre B_1 y A_2 , el ángulo planar es θ_{1B} .

Para la intersección entre B_2 y A_2 , el ángulo planar es θ_{1B} .

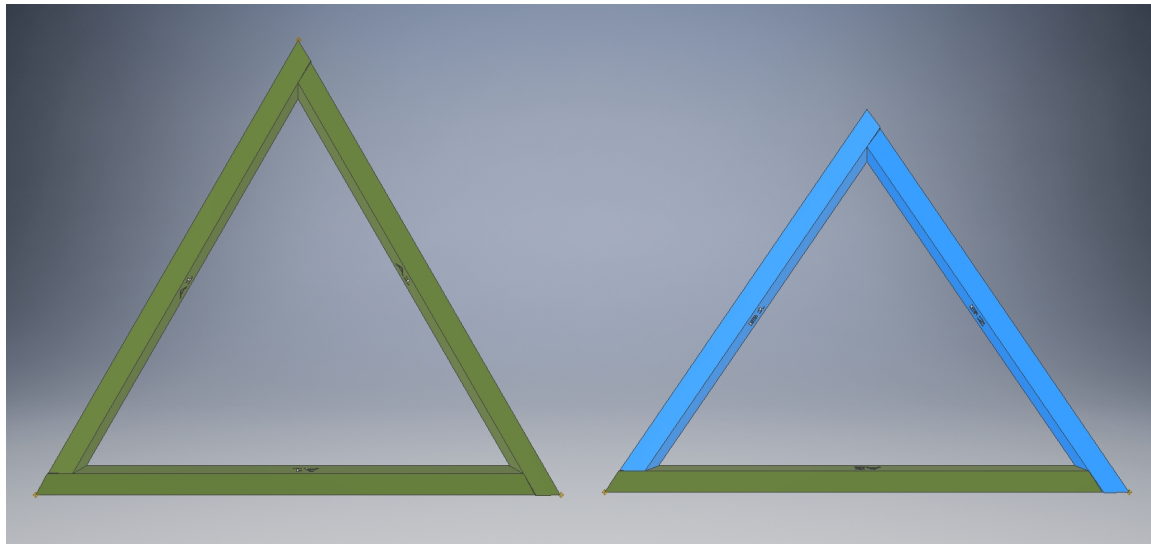
Para la intersección entre B_1 y B_2 , el ángulo planar es θ_2 .

Estos ángulos son los mismos calculados como ángulos centrales en la sección "Determinación de ángulos en uniones"

5.6.1.2. Ensamble de domo en Autodesk Inventor [®]

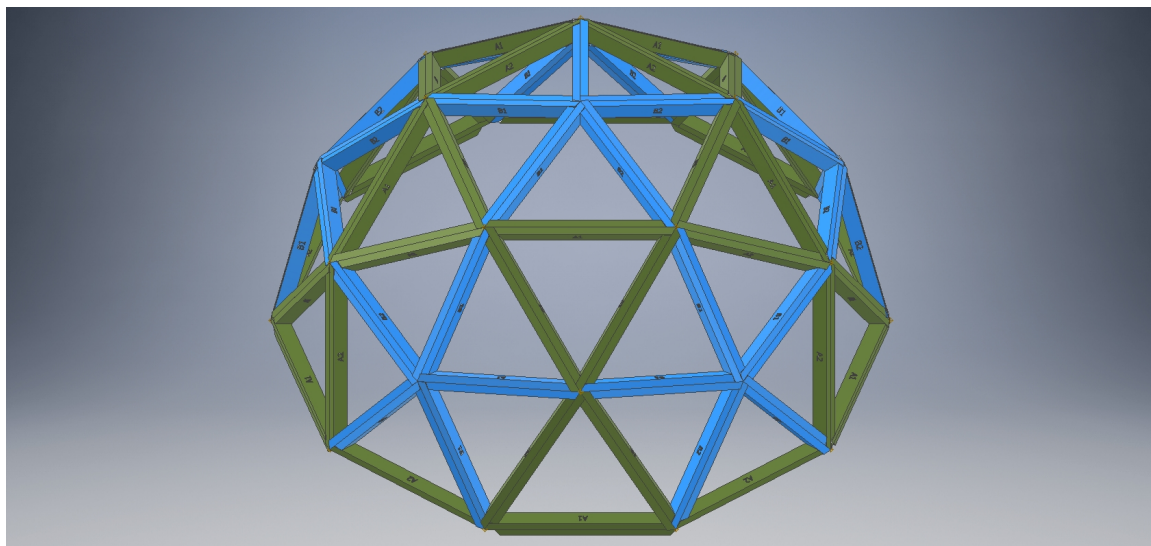
Con la utilización de planos, se realizaron los cortes dentro del programa Autodesk Inventor [®] y así previo a realizar los cortes verdaderos, hacer un ensamble preliminar tanto de los triángulos como del domo completo.

Figura 75: Varillas ensambladas para triángulos base del domo



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Figura 76: Ensamble completo del domo



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

5.6.1.3. Diseño e impresión de soportes para prensado de piezas

La unión de las varillas para la formación de cada uno de los triángulos del domo, se realizó con la utilización de cola para madera. Convencionalmente se utilizan prensas esquineras o sargentos para la sujeción de ambas piezas (Figura 77) y de esta manera no solamente mantenerlas unidas a presión durante el tiempo de secado del pegamento sino también asegurarse que las piezas no se muevan entre sí, asegurando un mejor pegado.

Figura 77: Unión de piezas con prensa esquinera



Debido a que la unión no es a 90° , se consideró la utilización de una prensa esquinera graduada.

Figura 78: Prensa esquinera de ángulo variable



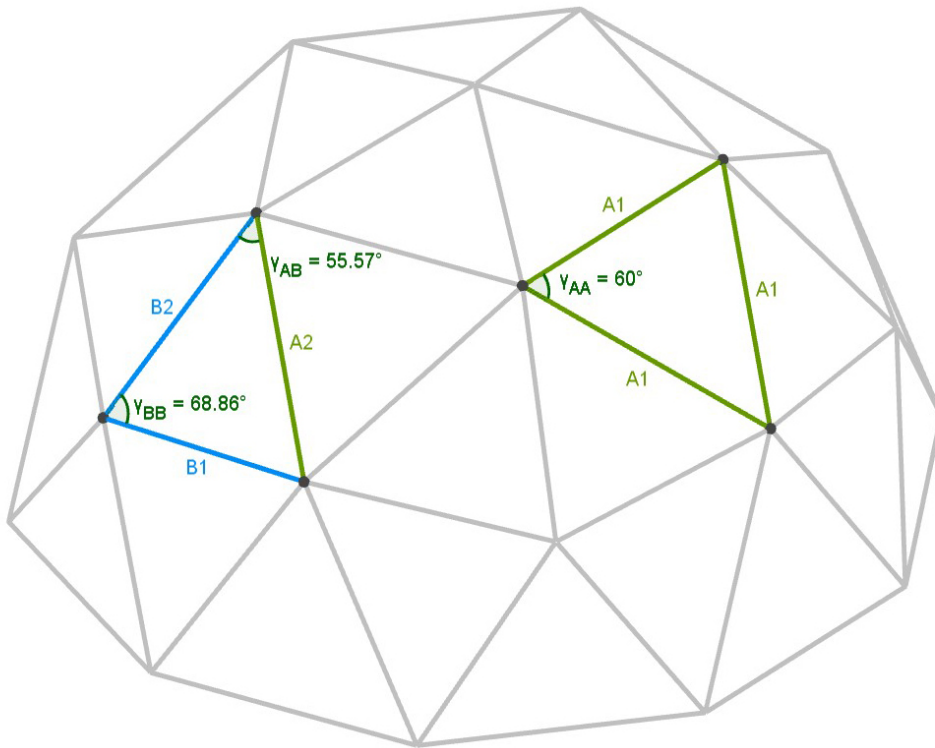
Sin embargo, no solamente se requiere que el ángulo sobre el plano de la mesa entre las varillas sea distinto a 90° sino también las varillas deben estar rotadas respecto a su eje axial. Actualmente no existe una prensa que permita la modificación de estos ángulos, por lo que se requirió diseñar soportes y así realizar el prensado a los ángulos requeridos para cada unión de las varillas.

Para el diseño de los soportes para la unión de las varillas se utilizó 2 ángulos:

- Ángulo de triángulo

Es el ángulo formado entre las aristas de los triángulos o también llamados ángulos internos de los triángulos que conforman al domo. Este ángulo está relacionado con el ángulo de unión entre las varillas.

Figura 79: Ángulos de triángulo



Para la intersección entre A_1 y A_1 , el ángulo de triángulo es γ_{AA} .

Para la intersección entre B_1 y A_2 , el ángulo de triángulo es γ_{AB} .

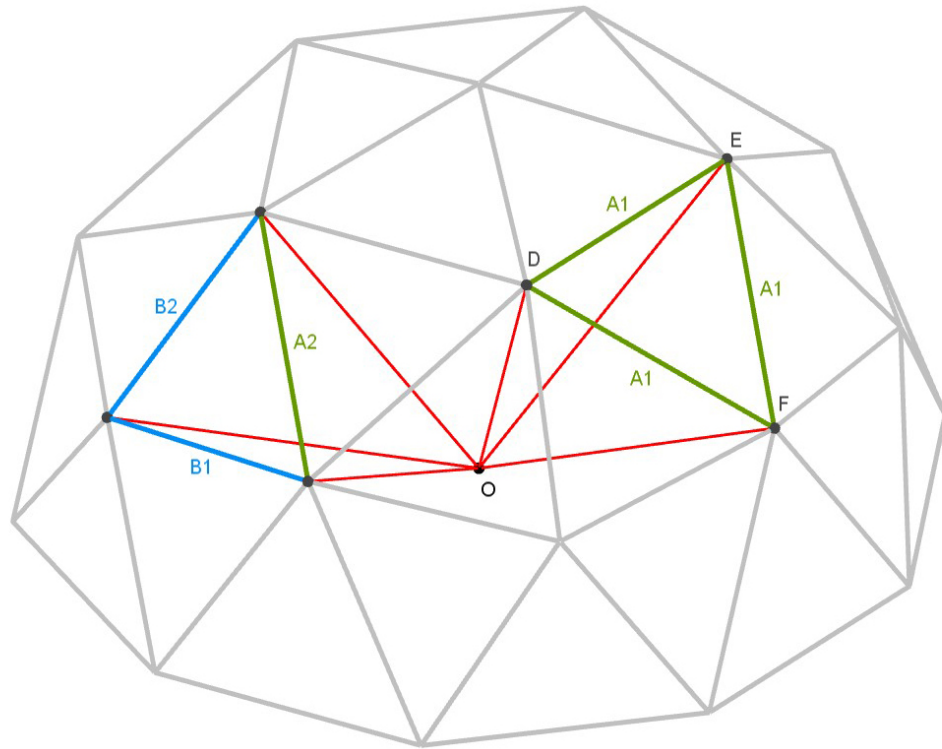
Para la intersección entre B_2 y A_2 , el ángulo de triángulo es γ_{AB} .

Para la intersección entre B_1 y B_2 , el ángulo de triángulo es γ_{BB} .

- Ángulo de inclinación

Es el ángulo formado entre los planos o caras laterales de las pirámides triangulares y el triángulo de la base. Este ángulo está relacionado con el ángulo de inclinación que requiere cada varilla respecto a su eje axial.

Figura 80: Ángulos de inclinación



Igualmente para una mejor visualización, si tomamos el plano DEO y el plano DEF , el ángulo de inclinación para la varilla A_1 será el ángulo entre ambos planos. Así tendremos:

Para la varilla A_1 , el ángulo de inclinación es δ_{1A} .

Para la varilla A_2 , el ángulo de inclinación es δ_{2A} .

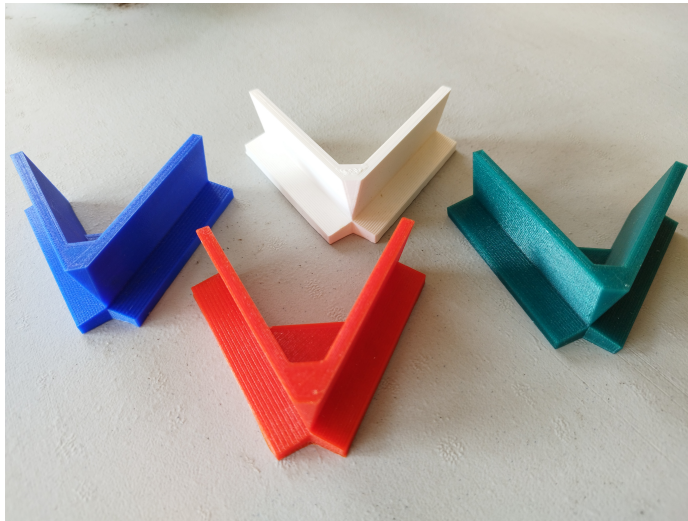
Para la varilla B_1 , el ángulo de inclinación es δ_{1B} .

Para la varilla B_2 , el ángulo de inclinación es δ_{2B} .

A partir de los dos tipos de ángulos anteriores y las distintas combinaciones de intersecciones de varillas se diseñó sus respectivos soportes, presentados en la Figura 81.

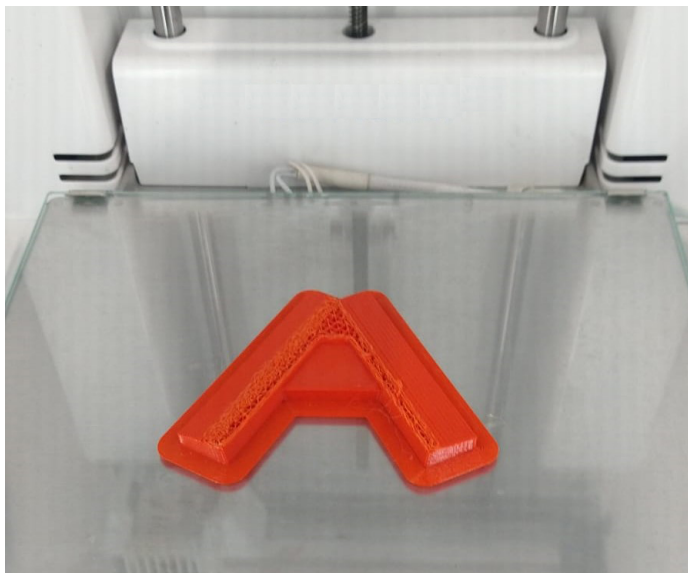
- Soporte verde: A_1A_1
- Soporte azul: A_2B_1
- Soporte rojo: A_2B_2
- Soporte blanco: B_1B_2

Figura 81: Soportes para prensado de varillas



Para su fabricación, fue necesario la utilización de impresoras 3D debido a la complejidad de la geometría.

Figura 82: Impresión 3D de soportes



5.6.2. Corte, lijado y perforación de varillas

Con las dimensiones establecidas se procedió a realizar el corte de planchas de madera de pino para obtener las varillas individuales como se observa en la Figura 83. Se estableció un grosor de $\frac{1}{2}$ " y un ancho de 1".

Figura 83: Cortes longitudinales para obtención de varillas con sierra de banco



Luego de tener las varillas con el grosor y ancho establecidos, con la sierra ingletadora, ajustando los ángulos de bisel y de inglete según el tipo de varilla que se está cortando, se realizaron los cortes dejando las varillas a la longitud necesaria.

Figura 84: Cortes en inglete y bisel de varillas con sierra ingletadora



Posterior a ello, se utilizó una lijadora orbital para afinar las superficies que entrarían en contacto de las varillas y acercar el grosor de cada uno lo más posible a la medida requerida con el fin que las uniones en los vértices no causen interferencia unas con otras.

Figura 85: Lijado de varillas para un mejor acabado superficial



Para el correcto ensamble de las varillas, a partir de coordenadas establecidas respecto a las longitudes de cada una, se perforaron 2 agujeros comenzando con una broca de $\frac{3}{16}$ " para evitar grietas en la madera y posteriormente se realizó la perforación final con una broca de $\frac{1}{4}$ ". Esto se logró con la utilización de un taladro de mesa, con el propósito de lograr una perforación perpendicular a la superficie de la varilla.

Figura 86: Perforación de agujeros para uniones pernadas



5.6.3. Ensamble de prototipo del domo

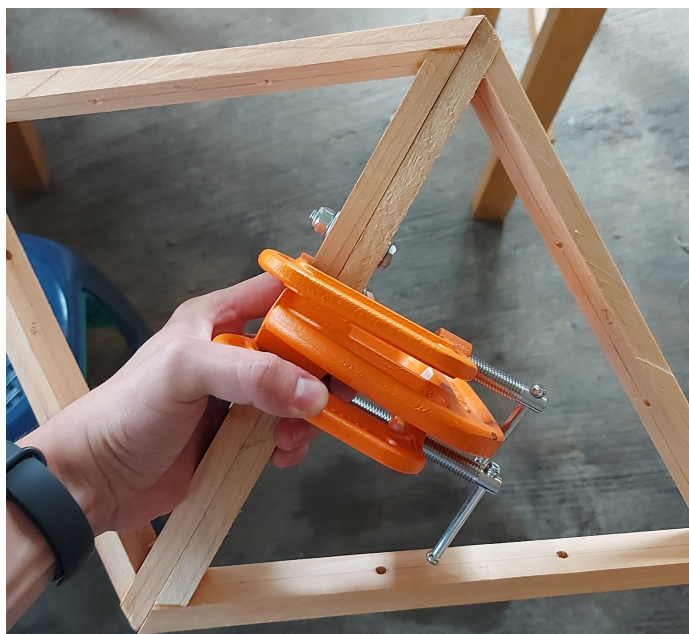
Con ayuda de los soportes diseñados e impresos en 3D y prensas de resorte, se aplicó cola blanca en las uniones de los triángulos del domo como se observa en la Figura 87.

Figura 87: Prensado de varillas para adhesión con pegamento



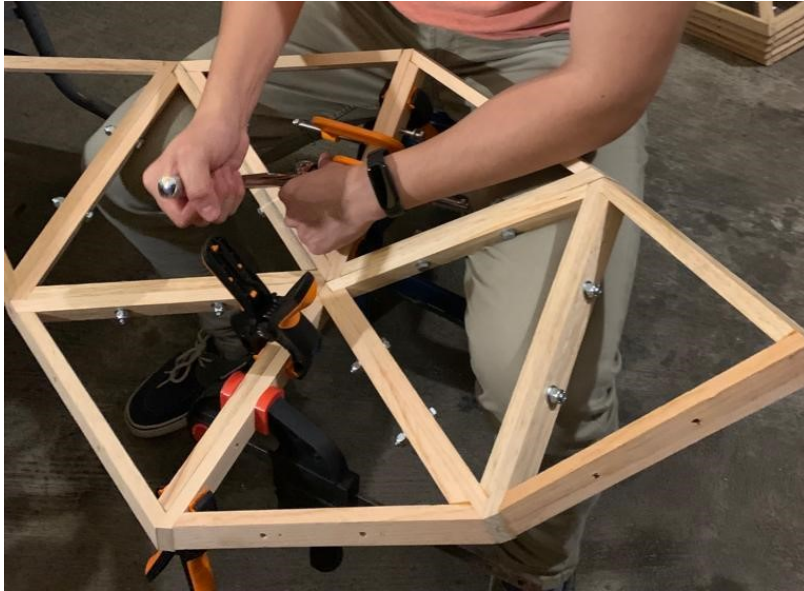
Con los triángulos pegados, se buscan los lados o varillas correspondientes para ser unidas por medio de el uso de pernos de 1/4" y tuercas de seguridad, con roldanas intermedias a fin de brindar una mayor área y así reducir la presión soportada por las fibras de la madera.

Figura 88: Ensamble pernado de varillas correspondientes



Sucesivamente se ensambló uno a uno los triángulos aledaños según la identificación de varillas establecida.

Figura 89: Ensamble de estructura con triángulos continuos



Finalmente, con la estructura ensamblada por completo, se pegó y selló con silicón grado marítimo para peceras y tuberías, las placas transparentes previamente recortadas según las medidas de cada uno de los dos tipos de triángulos. Se colocó masking tape con el fin de evitar presencia de silicón en la mitad de las superficies donde se pegaría el triángulo aledaño.

Figura 90: Sellado y unión de paneles transparentes con estructura terminada



6.1. Análisis de elementos finitos Matlab

Cuadro 11: Fuerzas axiales en elementos, Matlab

Elemento	Tipo de fuerza	Valor
1,2,3,4,5	Compresión	735.33 N
6,7,8,9,10	Tensión	465.48 N

Cuadro 12: Resultados de esfuerzos máximos y mínimos Matlab

Elemento	Tipo de esfuerzo	Valor
1,2,3,4,5	Compresión	6.53 MPa
6,7,8,9,10	Tensión	4.13 MPa

Deformación direccional en el *eje Y* de la cúspide del domo:

$$U_{m\acute{a}x} = 0.0431 \text{ mm}$$

Los resultados completos para cada uno de los elementos se presenta en el Cuadro 18.

6.2. Análisis de elementos finitos ANSYS

Cuadro 13: Fuerzas axiales en elementos, ANSYS

Elemento	Tipo de fuerza	Valor
1,2,3,4,5	Compresión	691.70 N
6,7,8,9,10	Tensión	413.02 N

Figura 91: Fuerza de compresión: 691.7 N, fuerza de tensión: 413.02 N

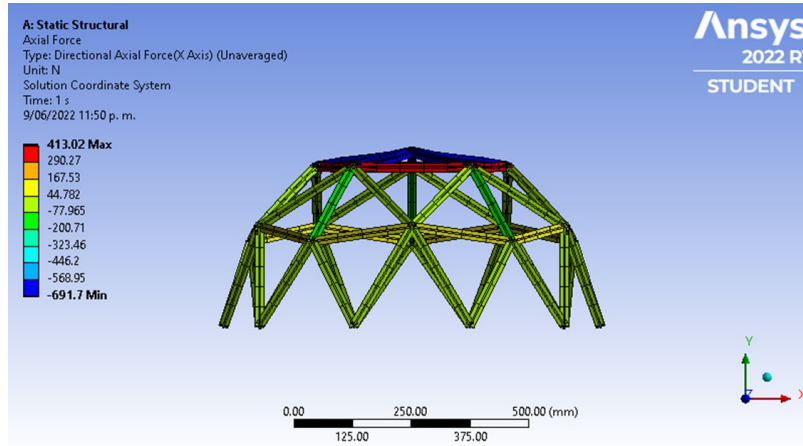


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Cuadro 14: Esfuerzos axiales en elementos, ANSYS

Elemento	Tipo de esfuerzo	Valor
1,2,3,4,5	Compresión	6.24 MPa
6,7,8,9,10	Tensión	3.72 MPa

Figura 92: Esfuerzos de compresión: 6.24 MPa, esfuerzo de tensión: 3.72 MPa

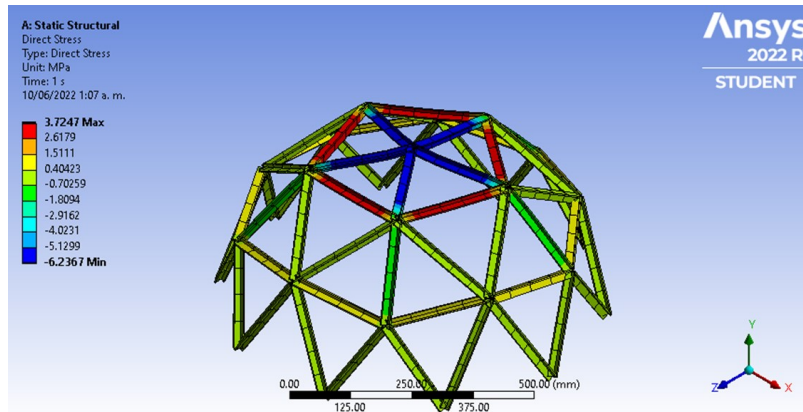


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Figura 93: Deformación direccional máxima: 0.0406 mm

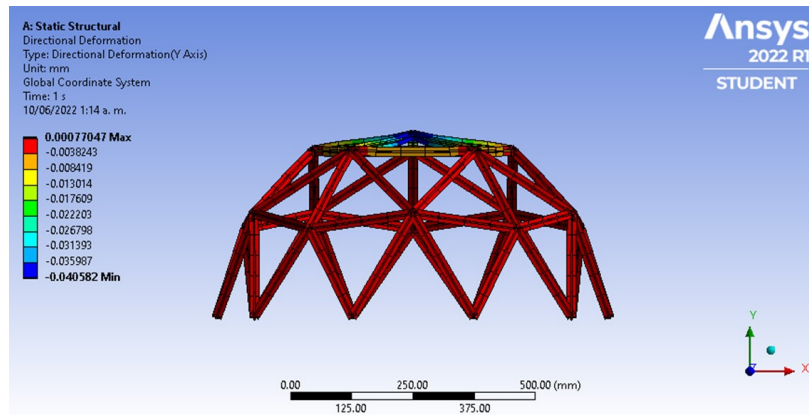


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

Deformación direccional en el *eje Y* de la cúspide del domo:

$$U_{m\acute{a}x} = 0.0406 \text{ mm}$$

6.3. Factor de seguridad mínimo

Cuadro 15: Factores de seguridad de los elementos sometidos a máximo esfuerzo

Fuente	Valor
Matlab	73.50
ANSYS	76.92

6.4. Porcentajes de error Matlab/ANSYS

Cuadro 16: Porcentajes de error comparativos Matlab-ANSYS

Resultado de interés	Porcentaje de error
Fuerza máxima compresión	6.3 %
Fuerza máxima tensión	12.7 %
Esfuerzo máximo compresión	4.6 %
Esfuerzo máximo tensión	11 %
Deformación máxima direccional Y	6.2 %
Factor de seguridad mínimo	4.6 %

6.5. Prototipo de superficie de condensación

Figura 94: Prototipo de estructura de domo geodésico con Paneles para superficie de condensación



Figura 95: Vértice de 6 aristas, punto de unión de 6 triángulos diferentes

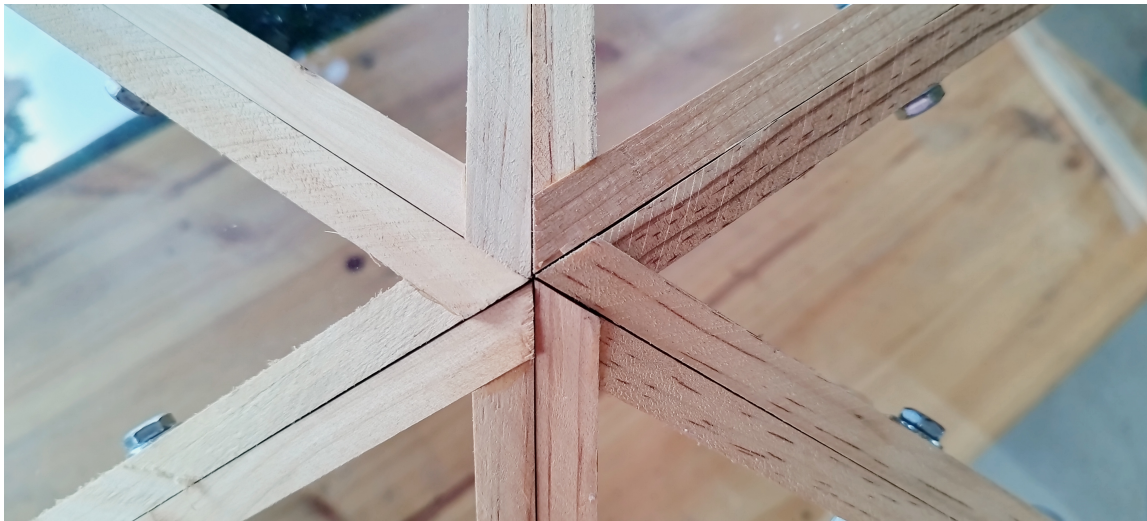


Figura 96: Paneles colocados en la parte interna del domo



Figura 97: Unión de 6 paneles de plástico diferentes en un vértice



Figura 98: Ensamble pernado para la unión de las varas del domo



Discusión de resultados

El propósito de la estructura del domo para la aplicación específica de destilador no solamente es brindar mayor rigidez y robustez en caso ocurran impactos de parte de elementos externos como ramas, u otras, sino también extender su uso para aplicaciones donde se requieran de una producción de agua destilada a mayor escala, incrementando el tamaño de la estructura.

Con esto en mente, sabiendo que se seleccionó inicialmente la utilización de un domo geodésico por su aclamada facilidad de distribuir las fuerzas que se aplican en los nodos a los demás elementos, un dato de interés son las fuerzas axiales de los elementos. Habiendo tomado como cargas el peso de los perfiles y los 1000 N en el nodo superior, se observó una diferencia significativa en las fuerzas soportadas por los elementos superiores del domo respecto al resto de la estructura.

Teniendo una máxima fuerza de compresión de 735.33 N en los resultados obtenidos con Matlab, se tuvo una reducción de 26.5 % respecto a la carga puntual aplicada. Si bien es un valor inferior al que tendría que soportar un solo elemento, no muestra una distribución de cargas efectivamente alta. Esto puede deberse principalmente al hecho que la carga se aplica completamente en el eje vertical, mientras que los elementos del 1 al 5, los sometidos a la mayor carga, están posicionados a solamente 15.86° por debajo del plano horizontal.

En la Figura 91 se presentan las fuerzas axiales que se soportan en toda la estructura, con una visualización de la deformación real aumentada. Se puede observar por la escala de colores que los elementos que se encuentran en una disposición más vertical se encuentran a compresión y aquellos que están en una disposición horizontal a tensión.

Es importante tomar en cuenta que durante la operación normal del destilador y bajo las cargas normales, no se tendrá una carga concentrada en un solo nodo que sea mucho mayor que el peso mismo de la estructura completa. La razón para realizar esta simulación bajo dadas condiciones, fue determinar si la estructura soportaría bajo un uso indebido y brindar una garantía de su integridad estructural luego de ello. A pesar de esto, se obtuvieron factores de seguridad mayores a 70, tanto para el resultado obtenido en Matlab como en ANSYS. Esto nos indica que la estructura soportará cargas hasta 70 veces mayores que a las que fue sometido, previo a llegar a su punto de fluencia y fallar.

Para construcción de estructuras de acero, el factor de seguridad normado para elementos bajo compresión y flexión es de 1.67 (American National Standards Institute, 2010), un valor muy por debajo del obtenido. Esto se atribuye a la selección del perfil T en función de los tamaños estándar y a la necesidad de una superficie con por lo menos $1/2$ " de ancho para poder ensamblar correctamente las placas transparentes.

En cuanto a la deformación máxima en el *eje Y*, se obtuvieron valores inferiores a 1 mm en ambos casos. Un valor que en comparación con el radio del domo es de apenas el 0.01 %. La deformación máxima permitida es establecida en función de requerimientos de diseño o meramente arbitrarios con el fin de dar un sentimiento de seguridad al usuario. Sin embargo, en este caso aunque no se estableció un valor específico, con una deformación tan pequeña, confirma que las placas de plástico no se verán sometidas a estiramientos o compresiones significativas que puedan poner en riesgo su integridad física.

A modo de comparación entre los resultados obtenidos entre las dos metodologías, se realizó el cálculo del porcentaje de error de los resultados. Para ello se alternó el valor considerado como el "teórico" en función de cuál provoque el mayor porcentaje de error para un enfoque conservador. Si bien los valores obtenidos por Matlab no son iguales a los obtenidos por ANSYS, el valor varía en una medida aceptable y se pueden tomar ambos acercamientos como válidos, al obtener porcentajes de error todos inferiores al 15 %.

En cuanto al prototipo de la estructura del domo y superficie de condensación, se encontró que la sierra ingletadora para trabajar con madera y lograr los ángulos y geometrías diseñadas fue la selección ideal ya que da un gran grado de flexibilidad en los ángulos y cortes deseados. Ahora bien, es importante mencionar que durante la construcción se tuvo problemas derivados de la diferencia de longitudes y ángulos en las varillas.

Esto se atribuye principalmente a la definición de las escalas de medición de ángulos integradas en el dispositivo y a errores del método de medición y corte. Durante el procedimiento de corte de las varillas, por falta de topes adecuados o algún tipo de marcas de longitud de las varillas, algunas de las piezas fueron cortadas con milímetros de diferencia respecto a las demás, lo cual se observa en algunos de los vértices del domo.

Debido a que la compra del material se realizó en días distintos, las varillas tenían no solamente aspecto diferente sino rigidez diferente. Esto se hizo notorio al momento de apretar los pernos para las uniones entre varillas, ya que en algunos casos, las roldanas deformaban fácilmente la madera, quedando por debajo del nivel de la superficie. Igualmente al momento de la realización del ensamble completo, una de las varillas que se encontraban en la unión de la cúspide se agrietó debido a la baja calidad de la madera que tenía en comparación a las demás que sí resistieron la flexión sufrida por estar el domo de cabeza en el proceso.

1. A pesar de las complejidades o problemas derivados del uso de herramientas que están sujetas a errores crasos por parte del usuario, la construcción del prototipo con el uso de madera de pino resultó exitosa, mostrando de forma eficiente la geometría que tendría el destilador final.
2. Se seleccionó un destilador semiesférico construido a partir de un domo geodésico frecuencia 2 con el fin de aportar robustez al diseño y permitir el cambio individual de las placas de policarbonato de la superficie de condensación en caso estén se vean comprometidas o deterioradas.
3. A partir de los requisitos establecidos y criterios de diseño e ingeniería se seleccionó policarbonato Lexán para las placas transparentes del condensador no solamente por su alta resistencia al impacto, sino también por su buena transmisión de luz y su alta resistencia al desgaste siendo un material ligero.
4. Para la estructura de soporte, el domo y base de unión se seleccionó acero inoxidable Sandvik SAF 2507 por su excelente resistencia al agrietamiento por corrosión, a la picadura y corrosión por rendija, además de presentar una alta resistencia mecánica y buena soldabilidad. Finalmente para la bandeja de evaporación se seleccionó aluminio por su alta conductividad térmica y su resistencia a la corrosión.
5. Se seleccionaron dos sistemas de alimentación posibles para el diseño final, uno con el uso de una válvula de flotación para el control del nivel óptimo de agua en la bandeja de evaporación y un sistema alternativo haciendo uso de un garrafón de agua para facilitar el reabastecimiento del destilador.
6. Se elaboró un programa en Matlab para la solución de las deformaciones y esfuerzos sufridos por cada uno de los elementos del domo a través del planteamiento de elementos finitos y se comparó con una simulación estática estructural en ANSYS, obteniendo un valor máximo de esfuerzo de compresión de 6.53 MPa y de tensión de 4.13 MPa .

7. La deformación máxima sufrida en la estructura fue de 0.0431 mm , inferior a un 0.01% en comparación con el radio del domo lo cual muestra que las uniones de las placas de policarbonato con respecto a la estructura no será significativa.
8. Debido a la alta resistencia por parte del acero inoxidable Sandvik SAF 2507 como las dimensiones del perfil T seleccionado, se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 73.5, justificado por las propiedades anticorrosivas del material ante ambientes agresivos y la necesidad de un ancho considerable en las alas del perfil T para el posterior ensamble de las planchas de policarbonato.
9. A modo de comparación entre métodos de solución, se obtuvieron los porcentajes de error entre métodos, tomando como valor teórico aquel que provocara el mayor porcentaje de error para un enfoque conservador. Los porcentajes de error presentados en el Cuadro 16 muestran un rango entre 4.6% y 12.7% variando en una medida aceptable, por lo que se toman ambos acercamientos como válidos.
10. Se construyó un prototipo de la estructura y superficie de condensación con un radio de 0.5 m a partir de varillas de madera de pino cepillado cortadas con la utilización de sierra de banco, sierra ingletadora. Para la unión de las varillas se diseñaron e imprimieron soportes para una correcta sujeción con su ángulo requerido para cara vértice de los triángulos correspondientes.
11. El ensamble se realizó a partir de uniones pernadas entre los pares de varillas correspondientes y finalmente se colocaron planchas de plástico transparente para la superficie de condensación unidas con silicón de grado marítimo.

Recomendaciones

1. Evitar un contacto directo entre la bandeja y los soportes T de la base para la bandeja. Esto con el fin de evitar una alta tasa de conducción de calor entre ambos y reducir así la pérdida de calor de la bandeja. Utilizar algún tipo de material aislante que reduzca la conductividad.
2. Realizar primero la estructura del domo y posteriormente realizar los cortes a los paneles de la superficie de condensación, ya habiendo realizado medidas de forma individual para asegurar un óptimo ensamble y evitar interferencias u holguras entre placas.
3. Realizar los cortes de las diversas aristas prestando atención a la precisión tanto en la longitud como en los ángulos de corte. Debido a la complejidad geométrica de la estructura del domo, algunos milímetros o décimas de milímetros pueden ser críticos para un correcto ensamble.
4. Realizar el proceso de perforación de los agujeros para las uniones pernadas con una correcta y firme sujeción de cada uno de los elementos para evitar movimientos que luego se traduzcan en dificultades para ensamblar.
5. Recortar todas las varillas del mismo tipo antes de cambiar o modificar algún ángulo en la sierra y así evitar inconsistencias.
6. Hacer lo posible porque toda la madera para las varillas provenga del mismo lote de madera o con similar calidad para evitar cambios significativos en la resistencia del material.
7. Seleccionar la madera de mejor calidad para las partes superiores del domo ya que estos elemento son los que están sometidos a mayores esfuerzos.
8. Realizar pruebas de calidad del agua como: ensayos físicos, ensayos químicos, determinación de metales, determinación de materiales inorgánicos no metálicos, determinación de sustancias biocidas y características bacteriológicas. Cada una de estas pruebas pueden ser realizadas en la Universidad del Valle de Guatemala.

- Abdullah, A. (2013). Improving the performance of stepped solar still. *Desalination*, 319, 60-65. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.04.003>
- Alkaisi, A., Mossad, R. & Sharifian-Barforoush, A. (2017). A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 110, 268-274.
- Al-Karaghoul, A. & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356.
- Alnaimat, F., Klausner, J., Mathew, B. y col. (2018). Solar desalination. *Desalination and water treatment* (pp. 127-150). Intech publications London.
- American National Standards Institute. (2010). Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10). <https://www.aisc.org/Specification-for-Structural-Steel-Buildings-ANSIAISC-360-10-2010>
- Ashok, S. (s.f.). Solar energy. Consultado el 23 de julio de 2022, desde <https://www.britannica.com/science/free-energy>
- Belyakov, N. (2019). Solar energy. *Sustainable Power Generation* (pp. 417-438). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817012-0.00031-1>
- Burbano, A. M. (2014). Evaluation of basin and insulating materials in solar still prototype for solar distillation plant at Kamusuchiwo community, High Guajira. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 547-552. <https://doi.org/10.24084/repqj12.395>
- Center Fertin. (s.f.). Center fertin torneira bóia caixa descarga haste aluminio 1/2"blister. Consultado el 30 de octubre de 2022, desde <https://www.centerfertin.com.br/torneira-boia-caixa-descarga-haste-aluminio-12-blister>
- Chapeau vert. (s.f.). Casas Pasivas (Cúpulas de Madera). Consultado el 5 de junio de 2022, desde <https://www.chapeau-vert.com/cupulas-de-madera/>
- Consorcio de Aguas de Asturias. (s.f.). Ciclo natural del agua (En el abastecimiento y el sanamiento). <https://consorcioaa.com/divulgacion/ciclo-natural-del-agua/>
- CSA ATHENA. (2017). CSA ATHENA equilibrium ball float valve. Consultado el 30 de octubre de 2022, desde <https://www.youtube.com/watch?v=eID6FNVw0kI>
- Diamanti, G. (s.f.). Eliodomestico. Consultado el 27 de agosto de 2021, desde <http://www.gabrielediamanti.com/projects/eliodomestico/>

- Domorama. (s.f.). Diseño domos | Herramientas y manuales de domos. Consultado el 6 de junio de 2022, desde <https://www.domorama.cl/>
- Domos Luz. (s.f.). Domos luz - Proyectos (Domos). Consultado el 5 de junio de 2022, desde <http://domosluz.com/>
- EcoInventos. (2020). HELIO, agua potable en cualquier parte del mundo y a un coste mínimo. Consultado el 27 de noviembre de 2020, desde <https://ecoinventos.com/helio-agua-potable-para-todos/>
- El-Dessouky, H. T. & Ettouney, H. M. (2002). *Fundamentals of salt water desalination*. Elsevier.
- Energy Sector Management Assistance Program. (2020). *Global photovoltaic power potential by country*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/34102>
- Farshchi Tabrizi, F., Khosravi, M. & Shirzaei Sani, I. (2016). Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification–dehumidification system. *Energy Conversion and Management*, 115, 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.006>
- Fernández, J. C. (2021). Hipátia e a Geometria Sagrada. Consultado el 6 de junio de 2022, desde <https://www.matematicaparafilosofos.pt/hipatia-e-a-geometria-sagrada/>
- Franco, A. J., Mathon, L. R. S., Fernández, C. A. M. & Esteban, E. S. (2013). Destilador solar multietapa subatmosferico.
- Gálvez, J., Cleaves, C., Landívar, U. R., Instituto de Agricultura, R. N. y. A. & de Guatemala (1945-), B. (2009). *Cuenta integrada de recursos hídricos: resultados y análisis*. Universidad Rafael Landívar, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente : Banco de Guatemala.
- Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B. & Moulin, P. (2009). Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water research*, 43(9), 2317-2348.
- Hetal, T., Upadhyay, D. B. & Rana, A. (2014). Seawater desalination processes. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 3(2), 638-646. <http://www.ijesrt.com/issues%20pdf%20file/Archives-2014/February-2014/20.pdf>
- Hulton, G. & Organization, W. H. (2012). *Global costs and benefits of drinking-water supply and sanitation interventions to reach the MDG target and universal coverage* (Technical documents). World Health Organization.
- Ibañez, Á. R. A., Sugimoto, K., Sagastume, M. V. & López, N. M. (2009). Manual de Educación Ambiental Sobre el Recurso Hídrico en Guatemala. <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/7419.pdf>
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (Ed.). (2012). *Perfil ambiental de Guatemala, 2010 - 2012: vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo*. Universidad Rafael Landívar, IARNA, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente.
- IRENA. (2022). Capacity and Generation Statistics Overview. Consultado el 22 de julio de 2022, desde <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
- Jones, D. (2022). Global electricity review 2022. Consultado el 21 de julio de 2022, desde <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>
- KNF. (s.f.). Destilación. Consultado el 11 de agosto de 2022, desde <https://knf.com/es/us/soluciones/aplicaciones-para-laboratorio/destilacion>
- Márquez, S. (s.f.). Frecuencias | Domos geodesicos, Cúpula de casa, Sólidos platónicos. Consultado el 6 de junio de 2022, desde <https://ar.pinterest.com/pin/352899320802937519/>

- Masiwal, G., P.S, K. & Chaudhary, S. (2017). Performance analysis of surface condenser in 525mw thermal power plant. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 1931-1939. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i3/1709030186>
- Matweb. (s.f.). Aluminum 1100. Consultado el 25 de enero de 2022, desde <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=db0307742df14c8f817bd8d62207368e&ckck=1>
- Montanstahl. (2022). Stainless Steel Tees American Sizes. <https://www.montanstahl.com/products/stainless-steel-structurals-bright-bars/stainless-steel-tees/stainless-steel-tees-american-sizes/>
- PNUD. (s.f.). Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento. <https://www1.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>
- Rai, A., Singh, P. N., Sachan, V., Bhaskar, N. & Higginbottom, S. L. (2013). DESIGN, FABRICATION AND TESTING OF A MODIFIED SINGLE SLOPE SOLAR STILL.
- Ramos, P. (2017). Destilador de agua solar: una tecnología con potencial en el Nordeste. *CIPAF - Boletín #16*. <http://anterior.inta.gob.ar/cipaf/Boletin16/ver.php?cat=nea>
- Rodrigues, E. (2022). Sistema de pirâmide que funciona: invento livra água de agrotóxicos. Consultado el 15 de octubre de 2022, desde <https://www.uol.com.br/ecoa/ultimas-noticias/2022/10/09/farmaceutico-gaucha-cria-destilador-solar-que-livra-a-agua-de-agrotoxicos.htm>
- RSE. (2011). Gabriele Diamanti crea un destilador de agua diseñado para funcionar con energía solar. Consultado el 27 de agosto de 2021, desde <https://www.compromisorse.com/rse/2011/11/15/gabriele-diamanti-crea-un-destilador-de-agua-disenado-para-funcionar-con-energia-solar-/>
- Sabando, A. (2017). *Diseño y construcción de un destilador solar para aguas residuales en la ciudad de Riobamba* (Tesis doctoral). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador. <https://docplayer.es/88499112-Escuela-superior-politecnica-de-chimborazo.html>
- SABIC. (s.f.). Placa sólida LEXAN - Uso general. Consultado el 7 de febrero de 2022, desde <http://sfs.sabic.eu/es/product/placa-solida-lexan/uso-general/>
- Saidur, R., Elceevadi, E., Mekhilef, S., Safari, A. & Mohammed, H. A. (2011). An overview of different distillation methods for small scale applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(9), 4756-4764.
- Sandvik. (2021). SAF 2507 Tube and Pipe, Seamless - Datasheet. <https://www.materials.sandvik/es-es/materials-center/material-datasheets-fichas-tecnicas/tube-and-pipe-seamless/saf-2507/>
- Sarmiento, P. (2007). *Energía solar en arquitectura y construcción* [OCLC: 243608168]. RIL.
- SEGEPLAN & BID. (2006). Estrategia para la gestión integrada de los recursos hídricos de Guatemala. http://www.infom.gob.gt/archivos/Docs-Pdf/Documentos-Tecnicos/Diagnostico_del_Agua_Guatemala.pdf
- Shatat, M. & Riffat, S. B. (2014). Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(1), 1-19.
- Solargis & Bank, T. W. (2019). Mapas de recursos solares de Guatemala. Consultado el 23 de julio de 2022, desde <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/guatemala>

- Tarnacki, K., Meneses, M., Melin, T., Van Medevoort, J. & Jansen, A. (2012). Environmental assessment of desalination processes: Reverse osmosis and Memstill®. *Desalination*, 296, 69-80.
- Tech, M. (s.f.-a). Helio, water for all. <http://en.marinetech.fr/Water-production>
- Tech, M. (s.f.-b). Water production. Consultado el 27 de noviembre de 2020, desde <https://www.marinetech.fr/en/service/water-production/>
- Tufa, R. A., Curcio, E., Brauns, E., van Baak, W., Fontananova, E. & Di Profio, G. (2015). Membrane distillation and reverse electrodialysis for near-zero liquid discharge and low energy seawater desalination. *Journal of Membrane Science*, 496, 325-333.
- Tufa, R. A., Noviello, Y., Di Profio, G., Macedonio, F., Ali, A., Drioli, E., Fontananova, E., Bouzek, K. & Curcio, E. (2019). Integrated membrane distillation-reverse electrodialysis system for energy-efficient seawater desalination. *Applied Energy*, 253, 113551.
- Vargas, S. (2017). Esta familia vive en una increíble casa bajo un domo geodésico en el círculo polar ártico. Consultado el 4 de junio de 2022, desde <https://mymodernmet.com/es/hjertefolger-casa-cob-circulo-polar-artico/>
- Velez, A. (2022). Un module autonome et durable produit de l'eau potable grâce au soleil. Consultado el 29 de octubre de 2022, desde <https://fr.euronews.com/my-europe/2022/03/14/un-module-autonome-et-durable-produit-de-l-eau-potable-grace-au-soleil>
- Window to the World. (2013). Biomorphic forms. Consultado el 4 de junio de 2022, desde <https://interactive.wttw.com/tenbuildings/biomorphic-forms>
- Zhang, R., Tian, J., Gao, S. & Van der Bruggen, B. (2020). How to coordinate the trade-off between water permeability and salt rejection in nanofiltration? *Journal of Materials Chemistry A*, 8(18), 8831-8847.

11.1. Matrices de elementos

A continuación, se presentan las matrices con los datos de entrada para el programa de Matlab, elaborado en excel con la información pertinente de cada uno de los elementos, sus nodos de inicios y de fin, longitudes, etc. (Cuadro 17).

Así mismo se presenta la matriz de resultados de los esfuerzos de cada elemento (Cuadro 18), luego de la aplicación tanto de la carga por peso como los 1000 N en el nodo superior y el factor de seguridad en función de la resistencia a la fluencia del material.

Cuadro 17: Matriz de elementos para lectura de Matlab

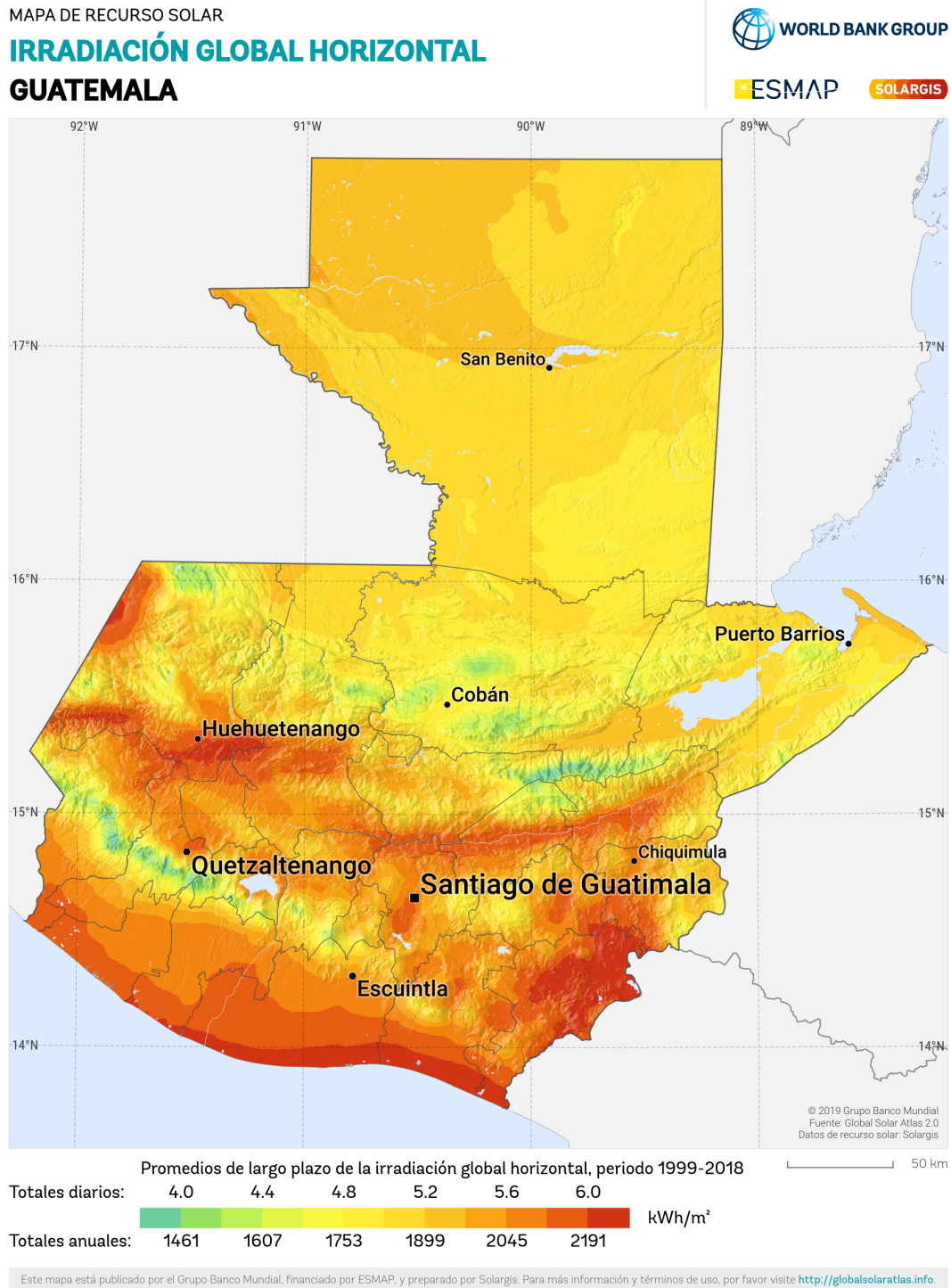
Elemento	i	j	X_i	Y_i	Z_i	X_j	Y_j	Z_j	L (mm)	$\cos \theta_x$	$\cos \theta_y$	$\cos \theta_z$	A (mm ²)	E (N/mm ²)	k (N/mm)
1	1	2	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
2	1	3	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
3	1	4	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
4	1	5	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
5	1	6	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
6	2	3	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
7	3	4	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
8	4	5	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
9	5	6	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
10	2	6	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
11	2	7	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
12	2	8	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
13	2	9	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
14	3	9	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
15	3	10	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
16	3	11	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
17	4	11	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
18	4	12	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
19	4	13	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
20	5	13	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
21	5	14	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
22	5	15	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
23	6	15	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
24	6	16	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
25	6	7	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
26	7	8	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
27	8	9	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
28	9	10	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
29	10	11	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
30	11	12	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
31	12	13	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
32	13	14	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
33	14	15	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
34	15	16	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
35	7	16	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
36	7	17	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
37	7	18	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
38	8	18	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
39	8	19	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
40	9	19	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
41	9	20	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
42	10	20	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
43	10	21	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
44	11	21	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
45	11	22	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
46	12	22	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
47	12	23	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
48	13	23	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
49	13	24	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
50	14	24	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
51	14	25	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
52	15	25	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
53	15	26	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	112.604	200,000.00	91,098.5496
54	16	26	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
55	16	17	0	0	0	0	0	0	218.613223	0	0	0	112.604	200,000.00	103,016.64
56	17	18	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
57	18	19	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
58	19	20	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
59	20	21	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
60	21	22	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
61	22	23	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
62	23	24	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
63	24	25	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
64	25	26	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668
65	17	26	0	0	0	0	0	0	247.213595	0	0	0	86.544	200,000.00	7,0015.5668

Cuadro 18: Matriz de resultados para los esfuerzo y factores de seguridad de cada elemento

Elemento	σ_x	n
1	6.5302225	73.5043867
2	6.5302225	73.5043867
3	6.5302225	73.5043867
4	6.5302225	73.5043867
5	6.5302225	73.5043867
6	-4.13379286	116.116123
7	-4.13379286	116.116123
8	-4.13379286	116.116123
9	-4.13379286	116.116123
10	-4.13379286	116.116123
11	0.59406292	807.995227
12	1.64508526	291.778191
13	0.59406292	807.995227
14	0.59406292	807.995227
15	1.64508526	291.778191
16	0.59406292	807.995227
17	0.59406292	807.995227
18	1.64508526	291.778191
19	0.59406292	807.995227
20	0.59406292	807.995227
21	1.64508526	291.778191
22	0.59406292	807.995227
23	0.59406292	807.995227
24	1.64508526	291.778191
25	0.59406292	807.995227
26	-1.32353743	362.66447
27	-1.32353743	362.66447
28	-1.32353743	362.66447
29	-1.32353743	362.66447
30	-1.32353743	362.66447
31	-1.32353743	362.66447
32	-1.32353743	362.66447
33	-1.32353743	362.66447
34	-1.32353743	362.66447
35	-1.32353743	362.66447
36	0.62271779	770.814658
37	0.62271779	770.814658
38	0.53517981	896.894826
39	0.53517981	896.894826
40	0.62271779	770.814658
41	0.62271779	770.814658
42	0.53517981	896.894826
43	0.53517981	896.894826
44	0.62271779	770.814658
45	0.62271779	770.814658
46	0.53517981	896.894826
47	0.53517981	896.894826
48	0.62271779	770.814658
49	0.62271779	770.814658
50	0.53517981	896.894826
51	0.53517981	896.894826
52	0.62271779	770.814658
53	0.62271779	770.814658
54	0.53517981	896.894826
55	0.53517981	896.894826
56	0	N/A
57	0	N/A
58	0	N/A
59	0	N/A
60	0	N/A
61	0	N/A
62	0	N/A
63	0	N/A
64	0	N/A
65	0	N/A

11.2. Mapa de irradiación en Guatemala

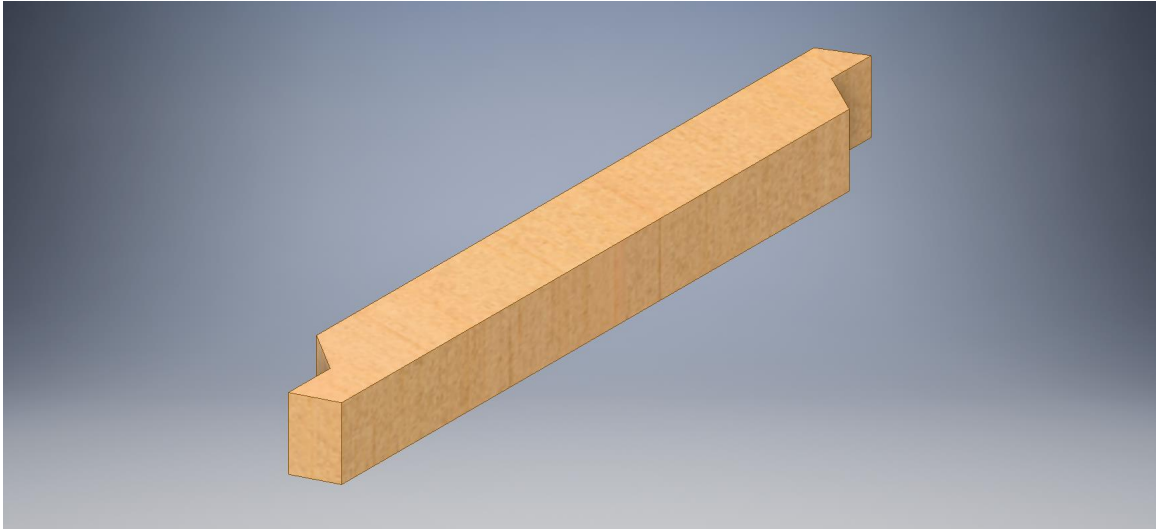
Figura 99: Irradiación solar global horizontal en Guatemala



Fuente: (Solargis & Bank, 2019)

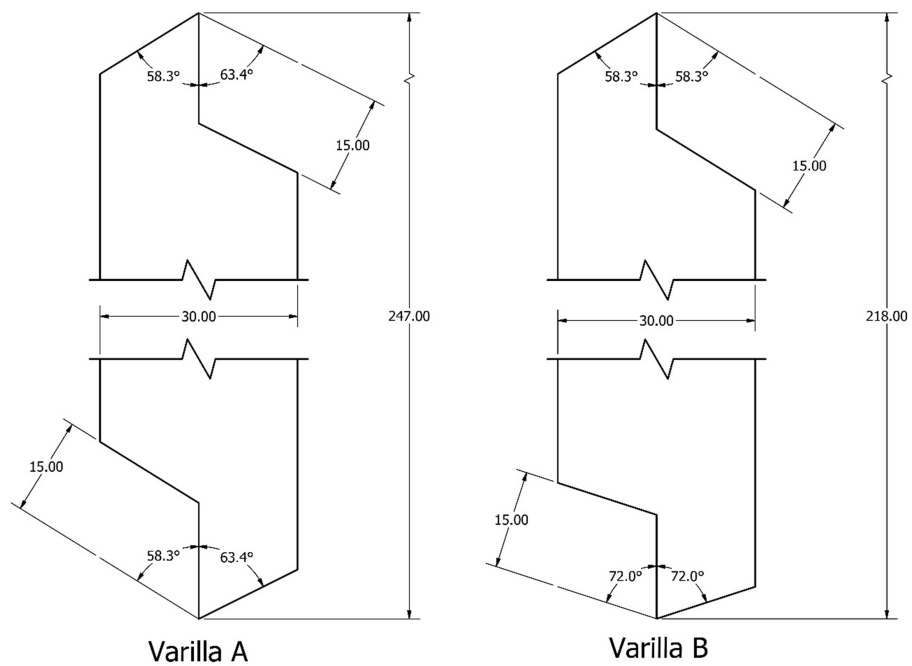
11.3. Varas diseño inicial

Figura 100: Primera versión de varas para estructura



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

Figura 101: Dimensiones varas A & B para estructura



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc

11.4. Geometría o acabado esperado

Figura 102: Domo geodésico con placas de madera para superficie exterior



Figura 103: Visualización de terminación de unión de triángulos del domo - vértice de 6 uniones



11.5. Realización de cortes y perforación de varillas

Figura 104: Ajuste de ancho de varillas - sierra de banco



Figura 105: Familiarización con ingletadora - ángulos de corte



Figura 106: Familiarización con ingletadora - métodos de sujeción de piezas



Figura 107: Pruebas de corte - ingletadora



Figura 108: Revisión de ángulos de corte - ingletadora



Figura 109: Varillas con longitud y cortes requeridos para perforación



Figura 110: Clasificación de varillas para perforación



Figura 111: Pruebas de corte - caladora



Figura 112: Ajuste de ángulo de bisel - ingletadora



Figura 113: Ajuste de ángulo de inglete - ingletadora



11.6. Soportes para prensado de varillas

Figura 114: Ángulo de triángulo - Soporte A_1A_1

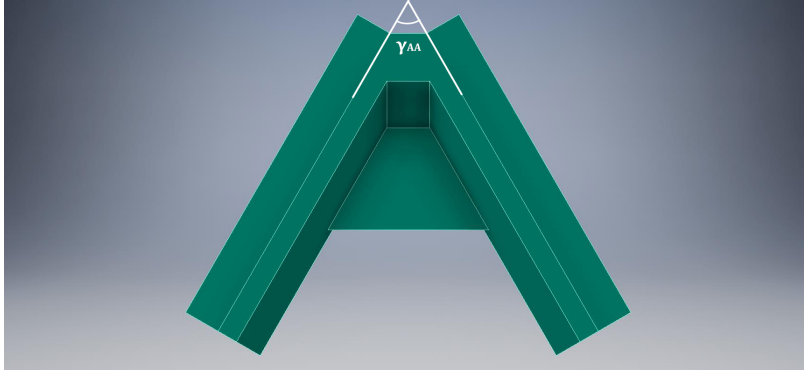


Figura 115: Ángulo de inclinación - Soporte A_1A_1

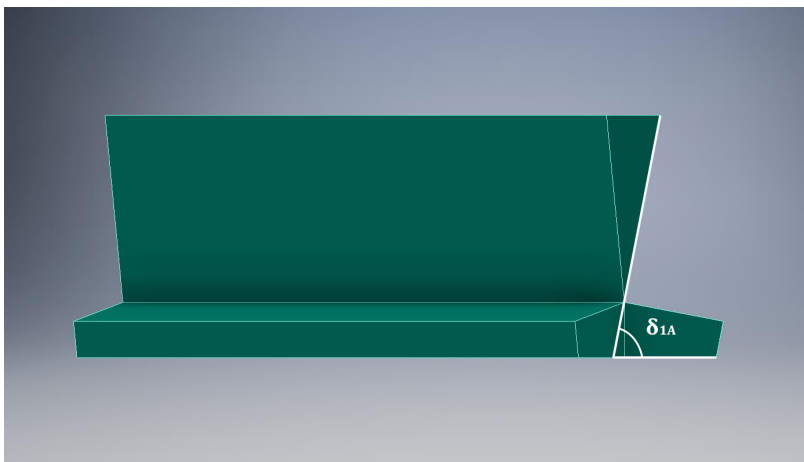
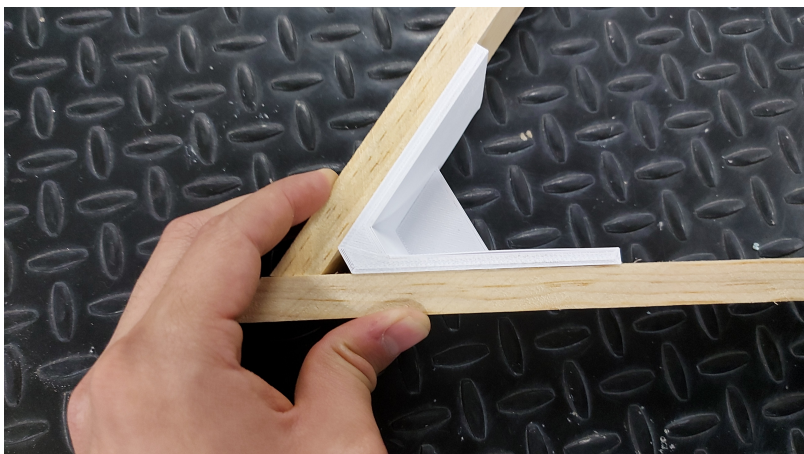


Figura 116: Primeras iteraciones de soportes en impresora 3D



11.7. Prensado y ensamble de varillas

Figura 117: Uso de soportes y prensas para pegado de varillas



Figura 118: Prueba de perforación de agujeros y ensamble pernado con varillas de prueba



Figura 119: Ensamble pernado - agarre apoyado de sargento de 6"

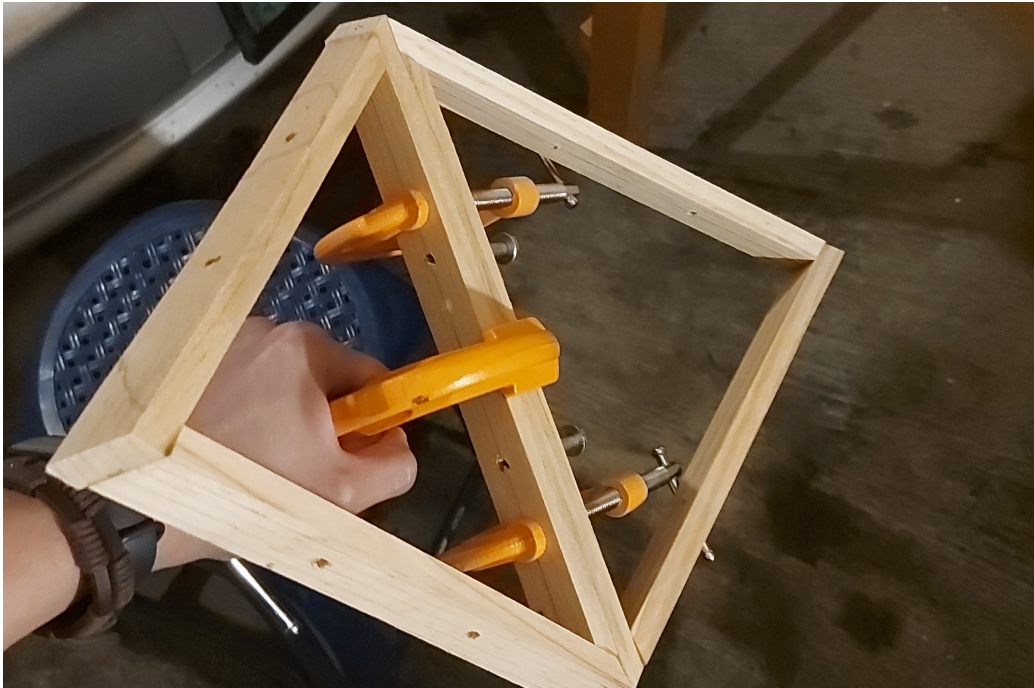


Figura 120: Ensamble de domo geodésico - triángulos esféricos



11.8. Código de Matlab

Figura 121: Código Matlab elementos finitos - página 1

Código MATLAB para elementos finitos

```
%Programa para cálculo de esfuerzos por el método de Elementos Finitos
%Elementos que conforman la armadura del domo de colección en 3D

%Definición de constantes y longitudes
phi = (1+sqrt(5))/2;
l = 2/sqrt(phi^2+1);
h_a = sqrt(3/(phi^2+1)).
theta = deg2rad(180*(5-2)/5);
theta2 = deg2rad(360/5);
a_p = l/2*tan(theta/2);
h_p = sqrt(h_a^2 - a_p^2);
r = 400;

Tmatriz_rot = [cos(theta2) 0 -sin(theta2) ; 0 1 0 ; sin(theta2) 0 cos(theta2)]
%Puntos Icosaedro mitad superior a partir de rotación con matriz de rotación
P(:,1) = [0 ; 1 ; 0];
P(:,8) = [0 ; 1-h_p ; -sqrt((l/2)^2 + (a_p)^2)];
P(:,10) = Tmatriz_rot\P(:,8);
P(:,12) = Tmatriz_rot\P(:,10);
P(:,14) = Tmatriz_rot\P(:,12);
P(:,16) = Tmatriz_rot\P(:,14);

Tmatriz_centro = [-1 0 0 ; 0 -1 0 ; 0 0 -1];
%Puntos Icosaedro mitad inferior reflejados al origen (Servirán para los
%puntos de la base del domo)
PB1 = Tmatriz_centro*P(:,8);
PC1 = Tmatriz_centro*P(:,10);
PD1 = Tmatriz_centro*P(:,12);
PE1 = Tmatriz_centro*P(:,14);
PF1 = Tmatriz_centro*P(:,16);

%Puntos Intermedios y normalización (Nuevos vértices)
P(:,2) = (P(:,1)+P(:,8))/2; P(:,2) = P(:,2) / norm(P(:,2));
P(:,3) = (P(:,1)+P(:,10))/2; P(:,3) = P(:,3) / norm(P(:,3));
P(:,4) = (P(:,1)+P(:,12))/2; P(:,4) = P(:,4) / norm(P(:,4));
P(:,5) = (P(:,1)+P(:,14))/2; P(:,5) = P(:,5) / norm(P(:,5));
P(:,6) = (P(:,1)+P(:,16))/2; P(:,6) = P(:,6) / norm(P(:,6));
P(:,7) = (P(:,8)+P(:,10))/2; P(:,7) = P(:,7) / norm(P(:,7));
P(:,9) = (P(:,8)+P(:,12))/2; P(:,9) = P(:,9) / norm(P(:,9));
P(:,11) = (P(:,10)+P(:,12))/2; P(:,11) = P(:,11) / norm(P(:,11));
P(:,13) = (P(:,12)+P(:,14))/2; P(:,13) = P(:,13) / norm(P(:,13));
P(:,15) = (P(:,14)+P(:,16))/2; P(:,15) = P(:,15) / norm(P(:,15));

P(:,17) = (P(:,16)+PD1)/2; P(:,17) = P(:,17) / norm(P(:,17));
P(:,18) = (P(:,8)+PD1)/2; P(:,18) = P(:,18) / norm(P(:,18));
P(:,19) = (P(:,8)+PE1)/2; P(:,19) = P(:,19) / norm(P(:,19));
P(:,20) = (P(:,10)+PE1)/2; P(:,20) = P(:,20) / norm(P(:,20));
P(:,21) = (P(:,10)+PF1)/2; P(:,21) = P(:,21) / norm(P(:,21));
P(:,22) = (P(:,12)+PF1)/2; P(:,22) = P(:,22) / norm(P(:,22));
P(:,23) = (P(:,12)+PB1)/2; P(:,23) = P(:,23) / norm(P(:,23));
P(:,24) = (P(:,14)+PB1)/2; P(:,24) = P(:,24) / norm(P(:,24));
P(:,25) = (P(:,14)+PC1)/2; P(:,25) = P(:,25) / norm(P(:,25));
P(:,26) = (P(:,16)+PC1)/2; P(:,26) = P(:,26) / norm(P(:,26));
```

Fuente: Elaboración propia

Figura 122: Código Matlab elementos finitos - página 2

```

%Multiplicación de matriz de coordenadas normalizadas por radio del domo
P = r*P;

%Exportación de Coordenadas para ANSYS
% filename = 'CoordenadaPuntosANSYS.xlsx';
% writematrix(transpose(P),filename,'Sheet',1,'Range','C1');

%Matriz global elementos
opts = detectImportOptions('Matriz Elementos.xlsx');
preview('Matriz Elementos.xlsx',opts)
Datos = readmatrix('Matriz Elementos.xlsx',opts);

%Localiza los nodos de cada elemento y coloca las coordenadas correspondientes
for i = 1:65
    Datos(i,4:6) = transpose(P(:,Datos(i,2)));
    Datos(i,7:9) = transpose(P(:,Datos(i,3)));
end

%Cálculo de coseno respecto a los 3 ejes
for i = 1:65
    Datos(i,11) = (Datos(i,7)-Datos(i,4))/Datos(i,10);
    Datos(i,12) = (Datos(i,8)-Datos(i,5))/Datos(i,10);
    Datos(i,13) = (Datos(i,9)-Datos(i,6))/Datos(i,10);
end

KE = zeros(78,78);
%Matriz de rigidez equivalente global
for i = 1:26
    for j = 1:26
        if i == j
            for k = 1:65
                if (Datos(k,2) == i || Datos(k,3) == i)
                    KE((3*i-2):(3*i),(3*j-2):(3*j)) = KE((3*i-2):(3*i),(3*j-2):(3*j)) + Datos(k,16)*k1(Datos(k,11),Datos(k,12),Datos(k,13));
                end
            end
        else
            for k = 1:65
                if ((Datos(k,2) == i && Datos(k,3) == j) || (Datos(k,2) == j && Datos(k,3) == i))
                    KE((3*i-2):(3*i),(3*j-2):(3*j)) = KE((3*i-2):(3*i),(3*j-2):(3*j)) + -Datos(k,16)*k1(Datos(k,11),Datos(k,12),Datos(k,13));
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```

Fuente: Elaboración propia

Figura 123: Código Matlab elementos finitos - página 3

```

%Aplicar condiciones de frontera, debido a que solamente los puntos del 17
%al 26 tienen restricción de movimiento al estar soldados, solo se
%modifican las filas correspondientes
% KE_CF = KE;
% for i = 26:-1:17
%     for j = 26:-1:1
%         if (i == j)
%             KE_CF((3*i-2):(3*i),(3*j-2):(3*j)) = [1 0 0 ; 0 1 0 ; 0 0 1];
%         else
%             KE_CF((3*i-2):(3*i),(3*j-2):(3*j)) = [0 0 0 ; 0 0 0 ; 0 0 0];
%         end
%     end
% end

%Matriz de rigidez equivalente simplificada para cálculo de desplazamientos
% KES = KE(1:48,1:48);

%Densidad del Acero Dúplex 2507
d = 7.8*10^(-6); %kg/mm³
g = 9.8; %m/s²

F = zeros(78,1);
%Vector de fuerzas
%Se asigna la mitad del peso a cada nodo, tomando como centro de gravedad
%de cada elemento al centro de su longitud
for i = 1:26
    for k = 1:65
        if (Datos(k,2) == i || Datos(k,3) == i)
            F((3*i-2):(3*i),1) = F((3*i-2):(3*i),1) + [0 ; -
d*Datos(k,10)*Datos(k,14)*g/2 ; 0];
        end
    end
end

%Aplicación de una fuerza, se evaluarán los desplazamientos y esfuerzos si
%una persona de 1000 N, aproximadamente 225 libras, se para en el Nodo 1,
%en la cúspide del domo
F(2) = F(2) - 1000;

%Cálculo de desplazamientos globales de cada nodo usando U = K^-1*F
U = KE(1:48,1:48)\F(1:48);
U(49:78) = zeros(30,1);

%Cálculo de las reacciones en los nodos de apoyo
R = KE*U-F;

ux = zeros(65,2); fx = zeros(65,1); ox = zeros(65,1);
%Cálculo de esfuerzos de cada elemento con matriz de Transformación
for i = 1:65
    ux(i,1:2) =
transpose(TI(Datos(i,11),Datos(i,12),Datos(i,13)))*[U((3*Datos(i,2)-
2):(3*Datos(i,2))) ; U((3*Datos(i,3)-2):(3*Datos(i,3)))];
    fx(i) = Datos(i,16)*(ux(i,1)-ux(i,2));
    ox(i) = Datos(i,15)*(ux(i,1)-ux(i,2))/Datos(i,10);
end

```

Fuente: Elaboración propia

Figura 124: Código Matlab elementos finitos - página 4

```
%Máxima compresión (MPa)
Omax = max(ox);
%Elemento correspondiente
E1 = find(ox == Omax);

%Máxima tensión (MPa)
Omin = min(ox);
%Elemento correspondiente
E2 = find(ox == Omin);

%Teoría de la Energía de Distorsión
Sy = 480; %Resistencia a la fluencia, MPa
v = 0.3; %Coeficiente de Poisson

%Factor de Seguridad a partir de ED
n = Sy/Omax;

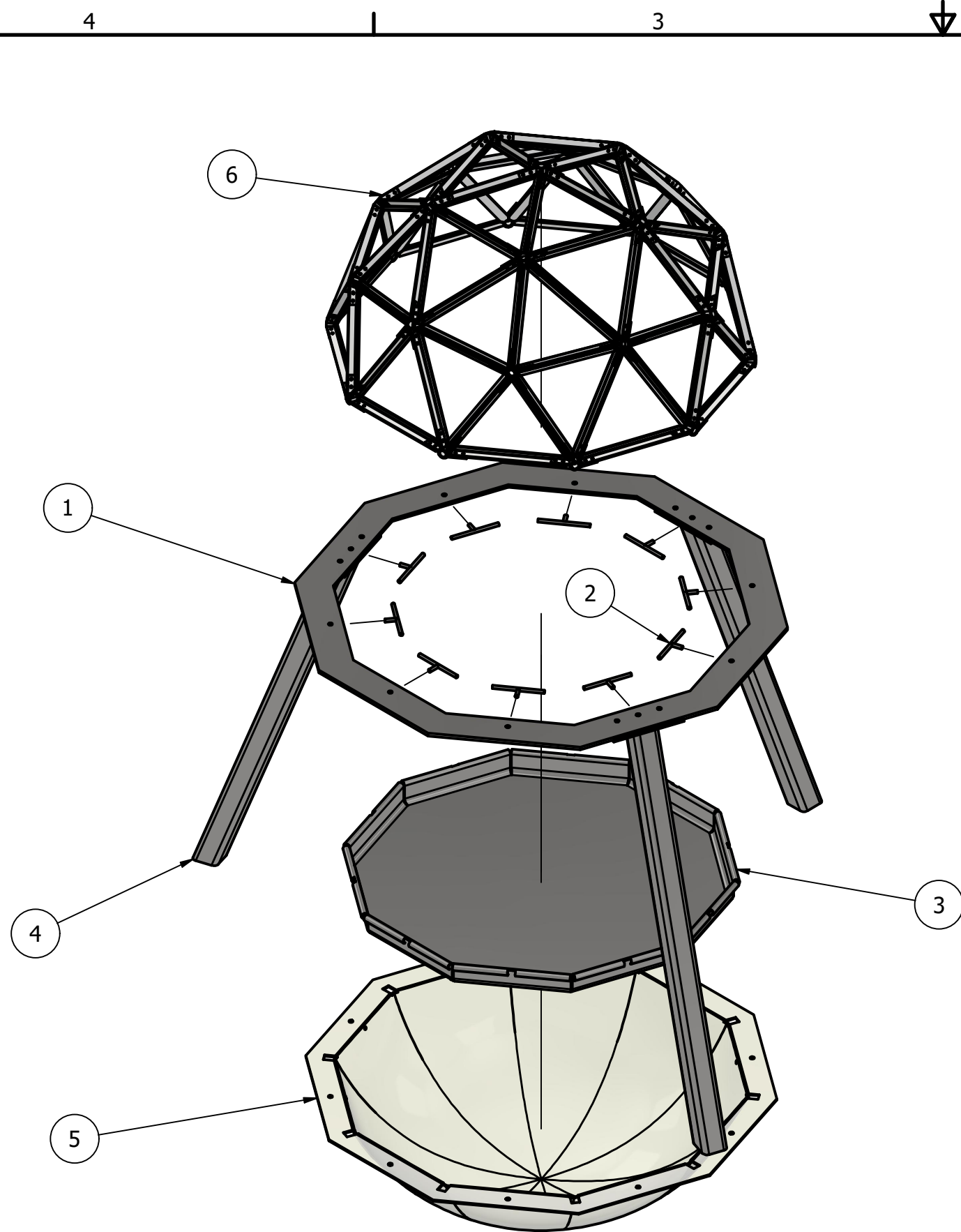
xlswrite('filename.xls',ox)

%Definición de funciones para programación

function m = k1(cos0x,cos0y,cos0z)
    m = [cos0x^2 cos0x*cos0y cos0x*cos0z ; cos0x*cos0y cos0y^2 cos0y*cos0z ;
cos0x*cos0z cos0y*cos0z cos0z^2];
end
```

Fuente: Elaboración propia

11.9. Planos de construcción



LISTA DE PARTES			
NO. DE PARTE	CANT.	NOMBRE DE PARTE	DESCRIPCIÓN
1	1	PLACA BASE DE UNIÓN	PLACA ENDECAGONAL A LA CUAL SE ENSAMBLAN TODOS LOS COMPONENTES DEL DESTILADOR
2	10	SOPORTES T	SOPORTES EN FORMA DE T PARA SOSTENER LA BANDEJA DE EVAPORACIÓN EN EL MEDIO DEL DISPOSITIVO
3	1	BANDEJA DE EVAPORACIÓN	BANDEJA DONDE SE COLOCARÁ EL AGUA A DESTILAR
4	3	PATAS DE SOPORTE	PATAS QUE EN CONJUNTO FORMAN UN TRIPODE PARA EL DISPOSITIVO
5	1	DEPÓSITO INFERIOR TERMOFORMADO	DEPÓSITO ACRÍLICO EN DONDE SE ALMACENARÁ EL AGUA RECIÉN DESTILADA
6	1	ESTRUCTURA DOMO V2	ESTRUCTURA FORMADA POR PERFILES T Y ANGULARES

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
 LINEAL .X ±
 .XX ±
 .XXX ±
 ANGULAR ± 0.25°
 FRACCIONES ±
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR IAN QUAN FECHA 20/11/2022

DISEÑADO POR IAN QUAN FECHA 09/11/2022

REVISADO POR FECHA

APROBADO POR GUSTAVO BARRERA FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO
 PROYECTO DE GRADUACIÓN

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO: DESTILADOR SOLAR DOMO GEODÉSICO V2

NÚMERO DE DIBUJO: 0

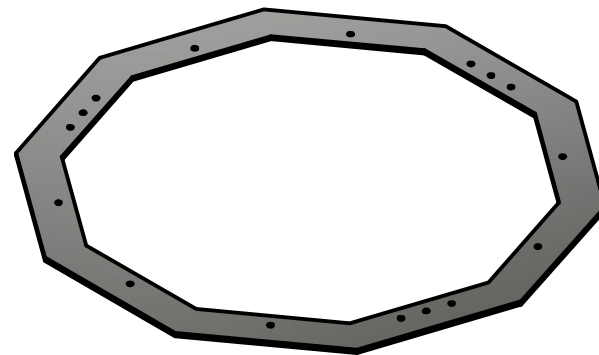
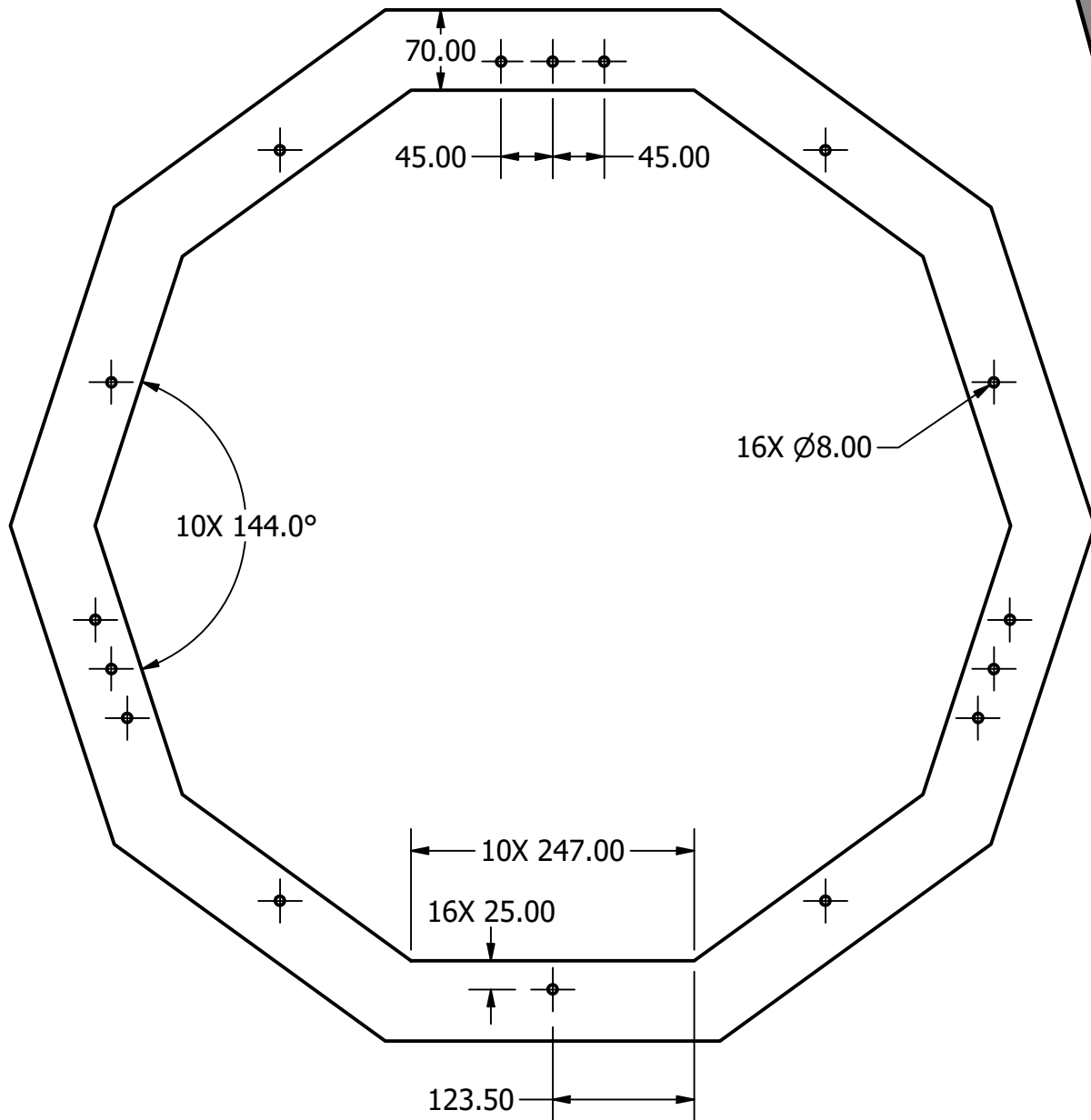
FORMATO B ESCALA: 1/10 UNIDADES: mm
 PÁGINA 1 DE 13 REV 0

MATERIAL
 TRATAMIENTO
 MASA: N/A



NOTAS GENERALES:

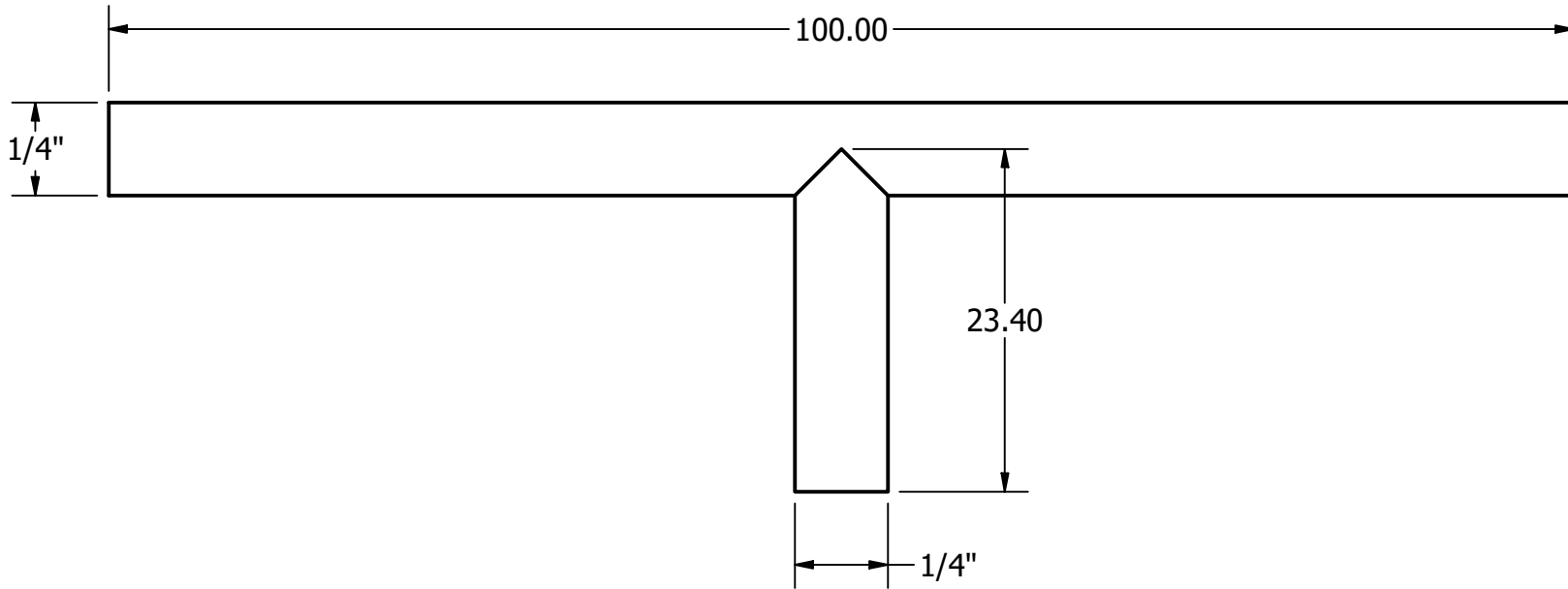
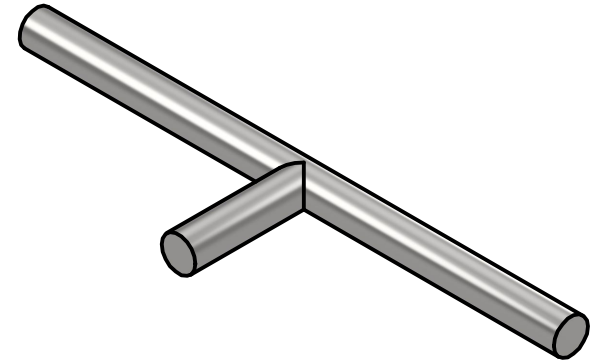
FABRICAR CON LÁMINA SANDVIK SAF 2507 DE 1/4" DE ESPESOR.



TÍTULO: PLACA BASE DE UNIÓN		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1/6	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 2 DE 13	REV 0

NOTAS GENERALES:

FABRICAR CON VARILLA DE HIERRO LISA SANDVIK SAF 2507.

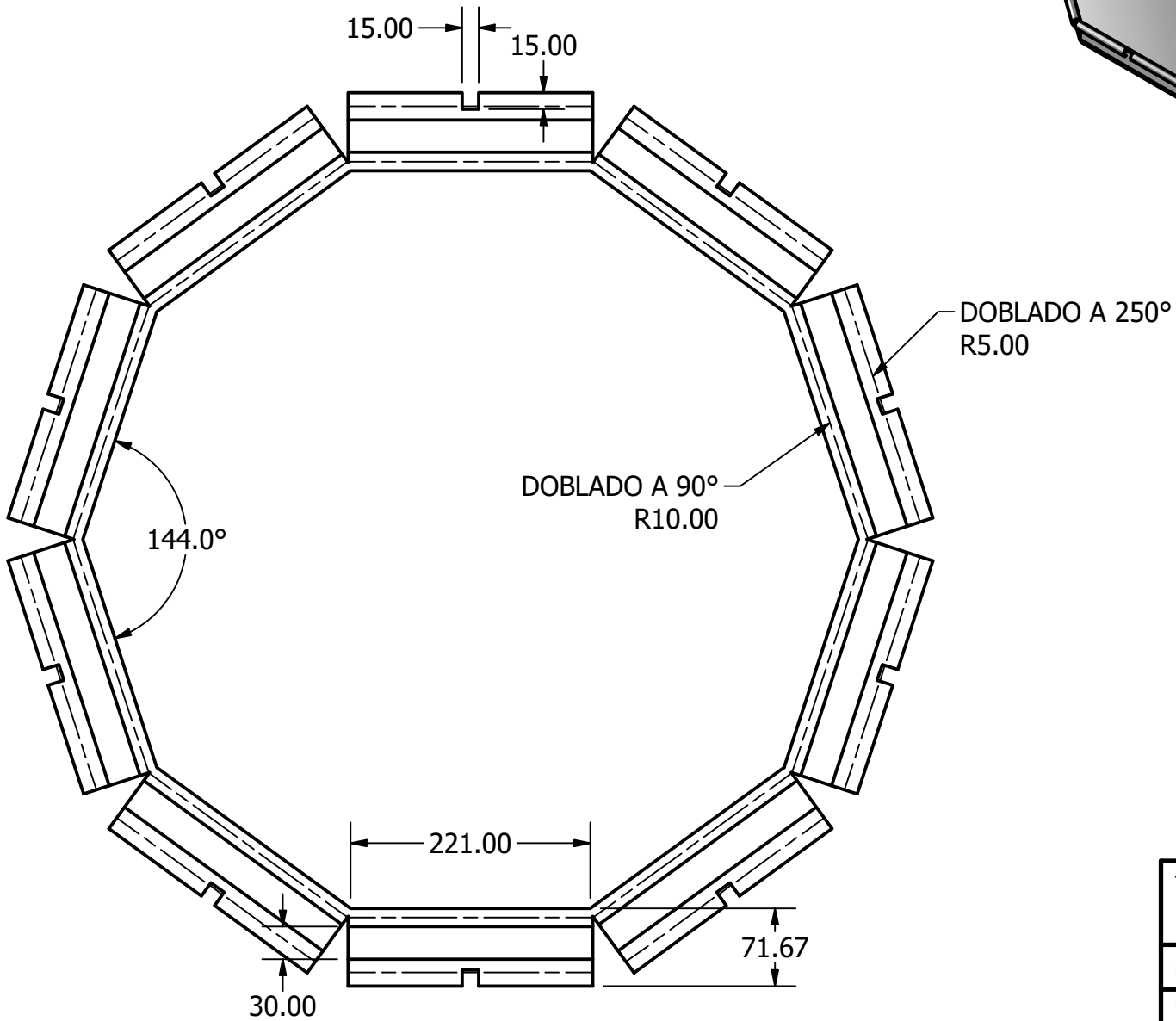
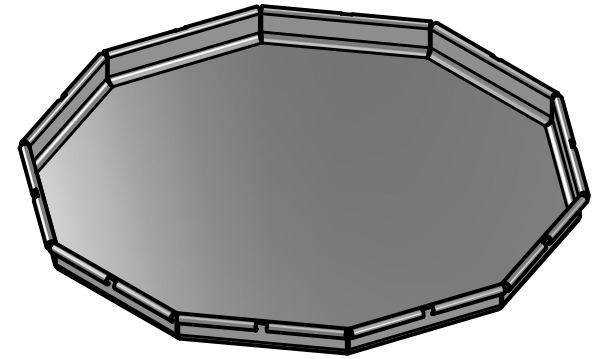


TÍTULO: SOPORTES T		
BANDEJA DE EVAPORACIÓN		
NÚMERO DE DIBUJO: 2		
FORMATO	ESCALA: 2:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 3 DE 13	REV 0

NOTAS GENERALES:

FABRICAR CON LÁMINA DE ALUMINIO 1100 DE 1/16" DE ESPESOR.

SOLDAR LAS GRIETAS LUEGO DE REALIZAR LOS DOBLECES PARA SELLAR LA BANDEJA.

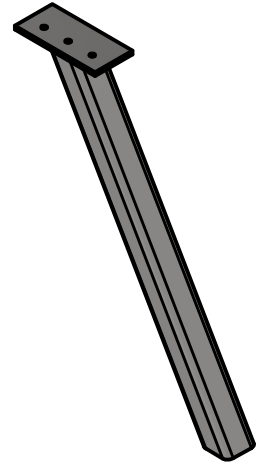
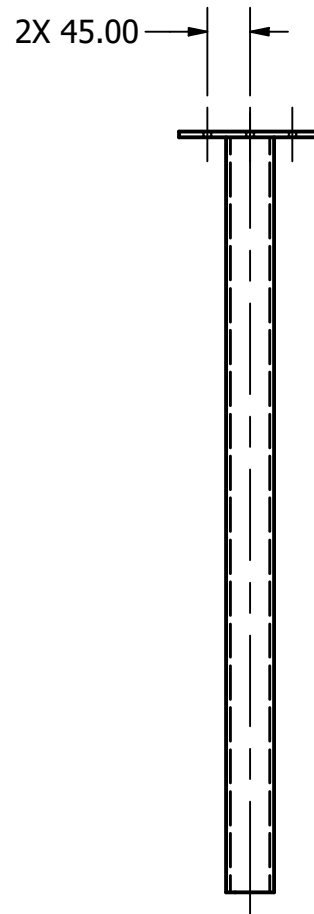
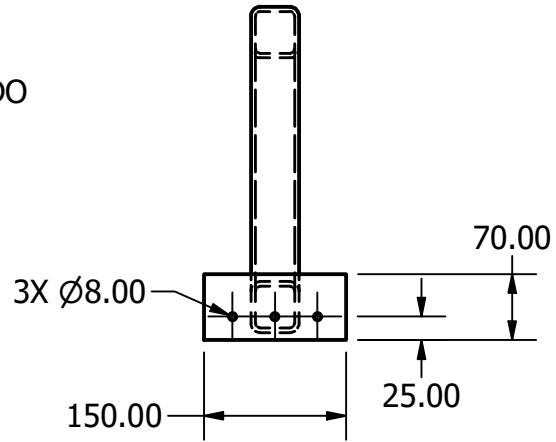
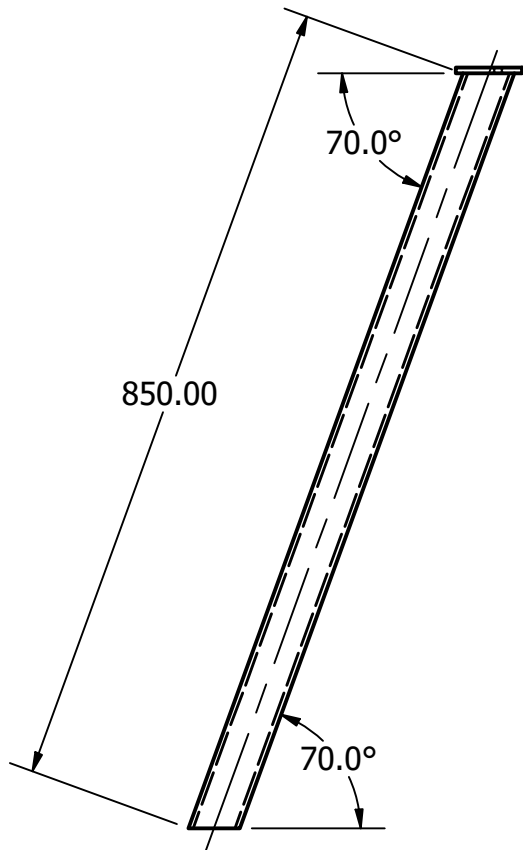


TÍTULO: BANDEJA DE EVAPORACIÓN		
NÚMERO DE DIBUJO: 3		
FORMATO	ESCALA: 1/6	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 4 DE 13	REV 0

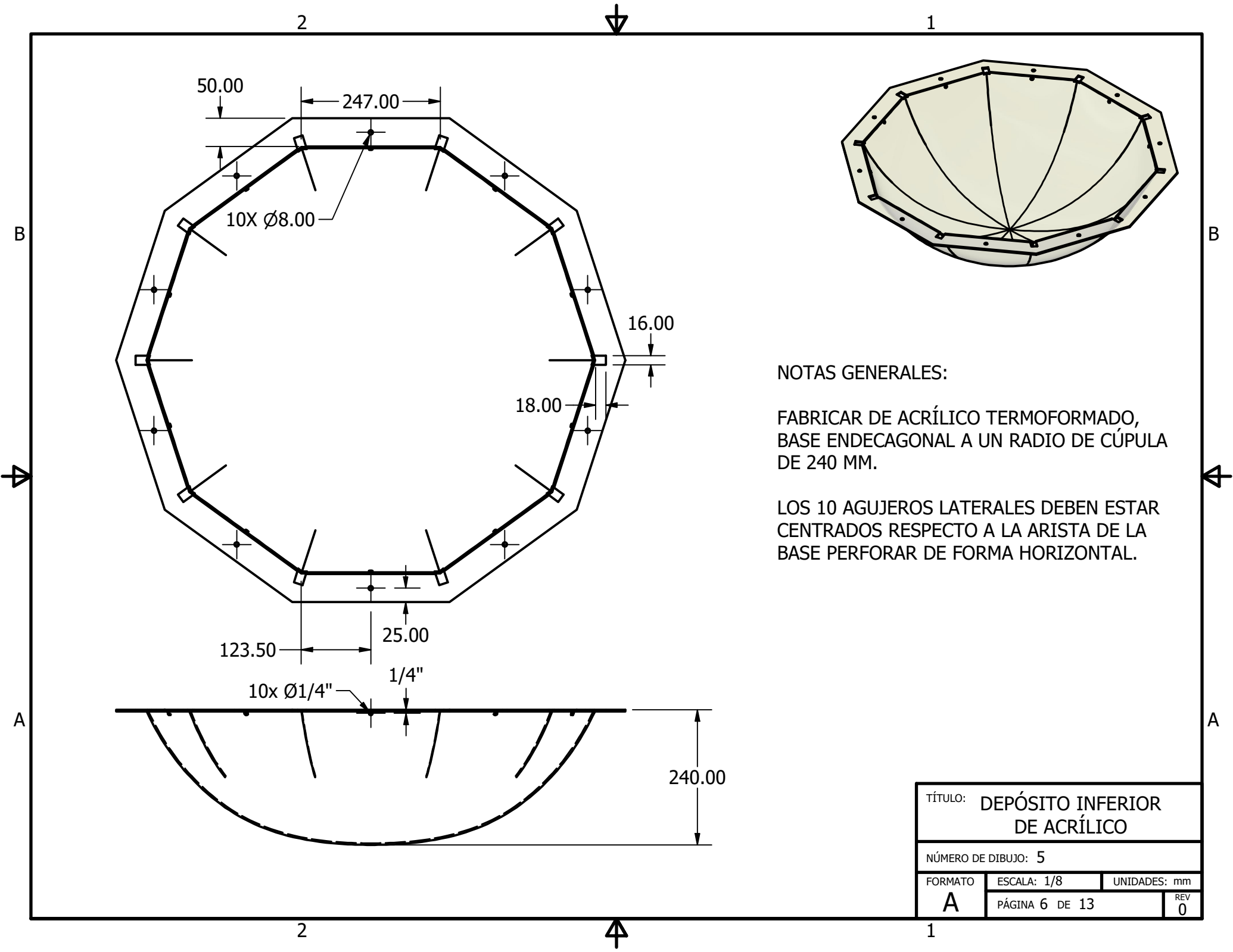
NOTAS GENERALES:

FABRICAR CON TUBO 2" X 2" X 3/16" Y SE SOLDA CENTRADO EN LA PLACA DE SOPORTE.

LA PLACA DE SOPORTE CON LÁMINA DE 1/4" DE ESPESOR.



TÍTULO: PATAS DE SOPORTE		
NÚMERO DE DIBUJO: 4		
FORMATO	ESCALA: 1/8	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 5 DE 13	REV 0

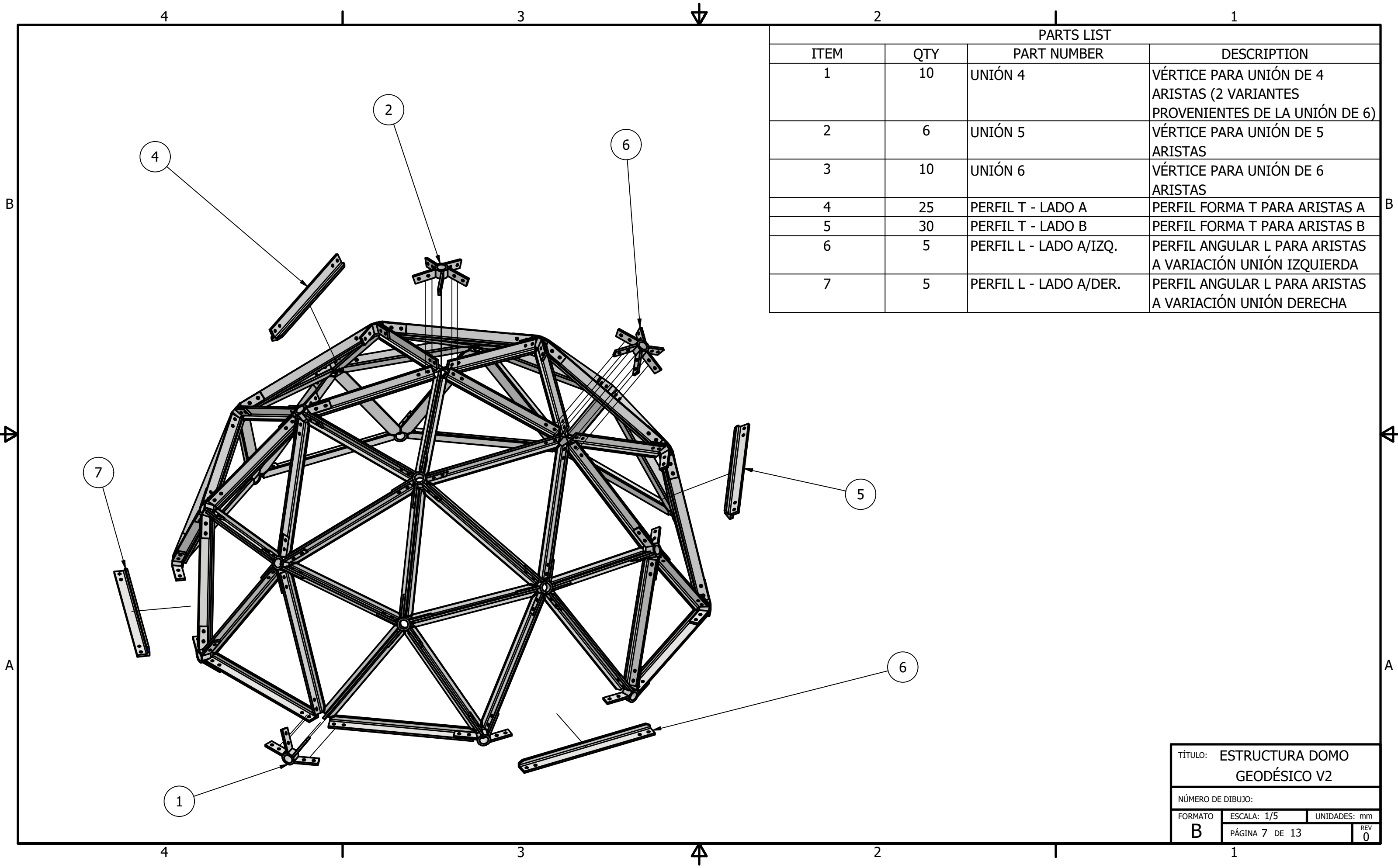


NOTAS GENERALES:

FABRICAR DE ACRÍLICO TERMOFORMADO,
 BASE ENDECAGONAL A UN RADIO DE CÚPULA
 DE 240 MM.

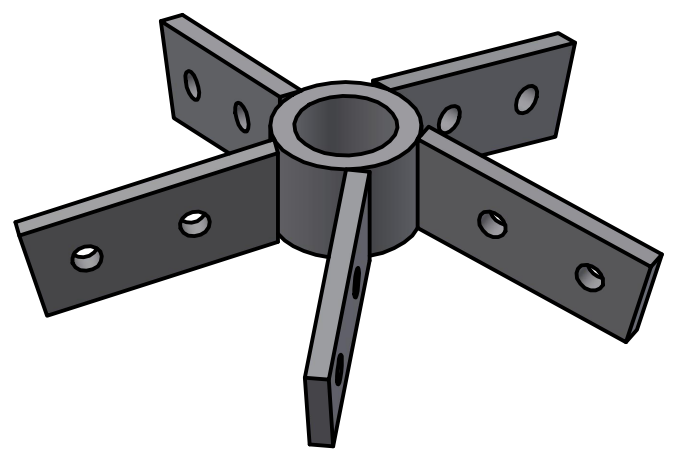
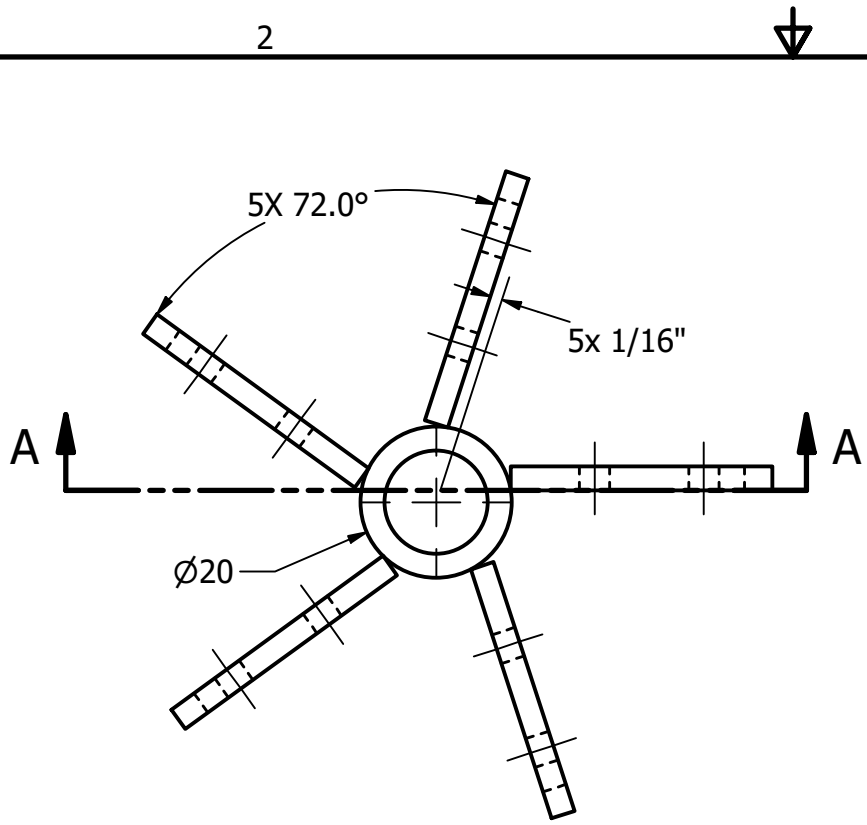
LOS 10 AGUJEROS LATERALES DEBEN ESTAR
 CENTRADOS RESPECTO A LA ARISTA DE LA
 BASE PERFORAR DE FORMA HORIZONTAL.

TÍTULO: DEPÓSITO INFERIOR DE ACRÍLICO		
NÚMERO DE DIBUJO: 5		
FORMATO	ESCALA: 1/8	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 6 DE 13	REV 0



PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	10	UNIÓN 4	VÉRTICE PARA UNIÓN DE 4 ARISTAS (2 VARIANTES PROVENIENTES DE LA UNIÓN DE 6)
2	6	UNIÓN 5	VÉRTICE PARA UNIÓN DE 5 ARISTAS
3	10	UNIÓN 6	VÉRTICE PARA UNIÓN DE 6 ARISTAS
4	25	PERFIL T - LADO A	PERFIL FORMA T PARA ARISTAS A
5	30	PERFIL T - LADO B	PERFIL FORMA T PARA ARISTAS B
6	5	PERFIL L - LADO A/IZQ.	PERFIL ANGULAR L PARA ARISTAS A VARIACIÓN UNIÓN IZQUIERDA
7	5	PERFIL L - LADO A/DER.	PERFIL ANGULAR L PARA ARISTAS A VARIACIÓN UNIÓN DERECHA

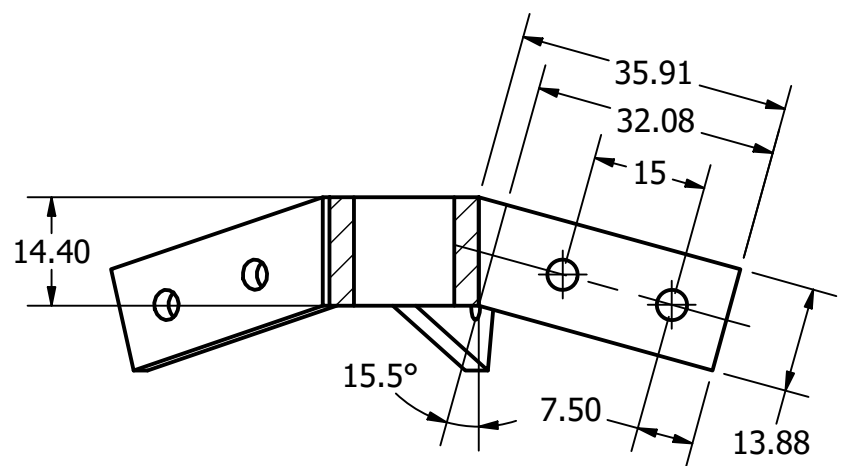
TÍTULO: ESTRUCTURA DOMO GEODÉSICO V2		
NÚMERO DE DIBUJO:		
FORMATO	ESCALA: 1/5	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 7 DE 13	REV 0



NOTAS GENERALES:

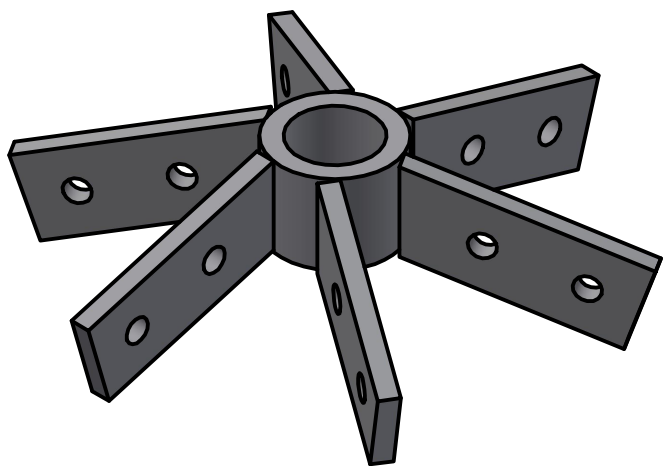
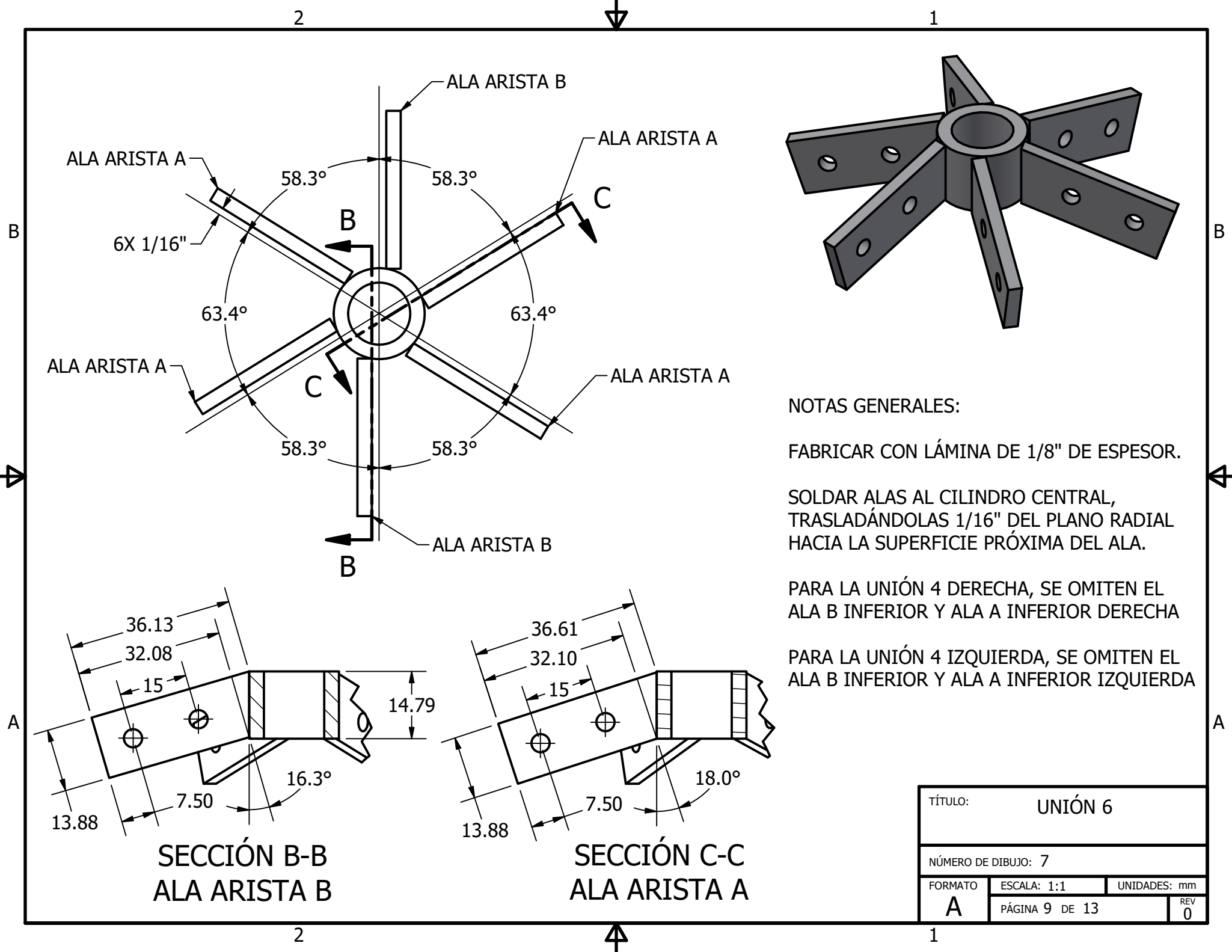
FABRICAR CON LÁMINA DE 1/8" DE ESPESOR.

SOLDAR ALAS AL CILINDRO CENTRAL,
 TRASLADÁNDOLAS 1/16" DEL PLANO RADIAL
 HACIA LA SUPERFICIE PRÓXIMA DEL ALA.



SECCIÓN A-A
 ESCALA 1 : 1

TÍTULO: UNIÓN 5		
NÚMERO DE DIBUJO: 6		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 8 DE 13	REV 0



NOTAS GENERALES:

FABRICAR CON LÁMINA DE 1/8" DE ESPESOR.

SOLDAR ALAS AL CILINDRO CENTRAL, TRASLADÁNDOLAS 1/16" DEL PLANO RADIAL HACIA LA SUPERFICIE PRÓXIMA DEL ALA.

PARA LA UNIÓN 4 DERECHA, SE OMITEN EL ALA B INFERIOR Y ALA A INFERIOR DERECHA

PARA LA UNIÓN 4 IZQUIERDA, SE OMITEN EL ALA B INFERIOR Y ALA A INFERIOR IZQUIERDA

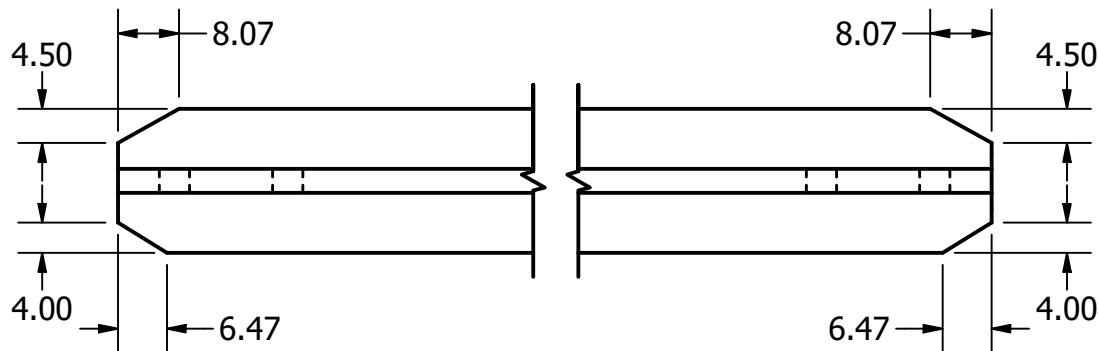
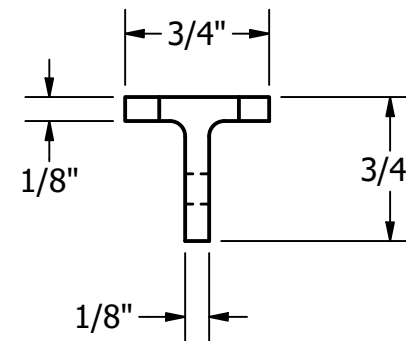
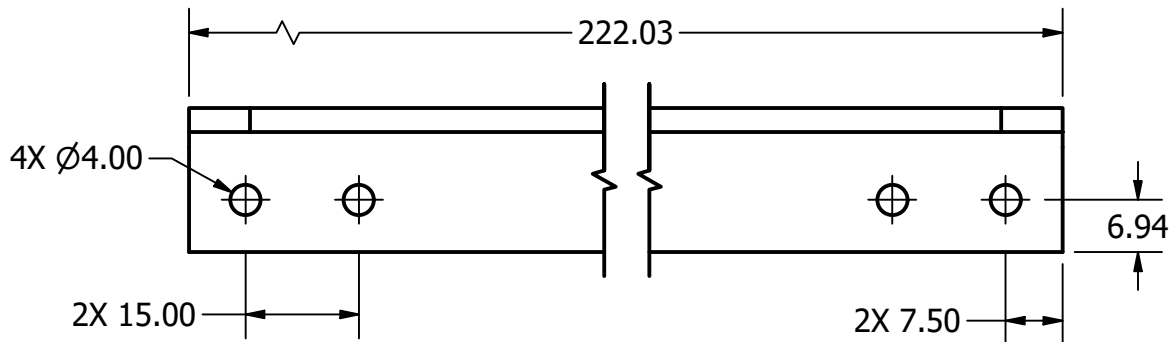
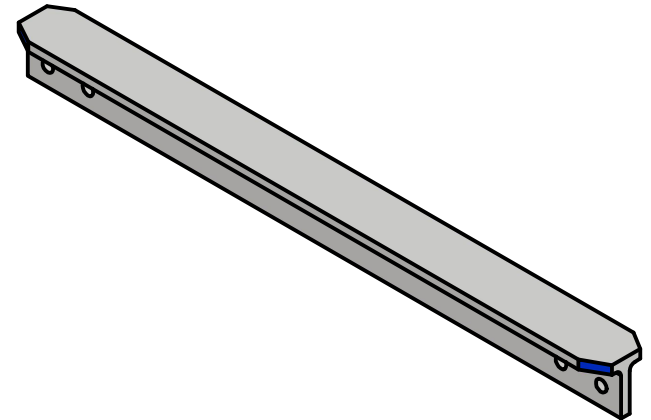
TÍTULO:		UNIÓN 6	
NÚMERO DE DIBUJO: 7			
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm	
A	PÁGINA 9 DE 13	REV 0	

NOTAS GENERALES:

FABRICAR CON PERFIL T DE 3/4" X 3/4" X 1/8".

LOS CORTES REALIZADOS EN LAS ESQUINAS DEL PERFIL SON PARA EVITAR INTERFERENCIA CON LOS PERFILES ALEDAÑOS.

PINTAR LOS CORTES DIAGONALES CON MEDIDA 4.5 DE UN MISMO COLOR, Y LOS CORTES DE MEDIDA 4 DE OTRO COLOR PARA FACILITAR EL ENSAMBLAJE.



TÍTULO: PERFIL T LADO A		
NÚMERO DE DIBUJO: 8		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 10 DE 13	REV 0

2



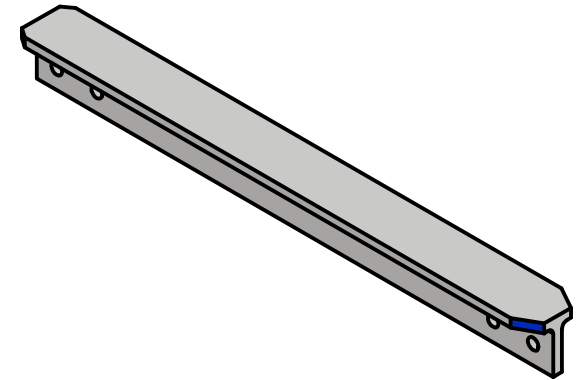
1

NOTAS GENERALES:

FABRICAR CON PERFIL T DE 3/4" X 3/4" X 1/8".

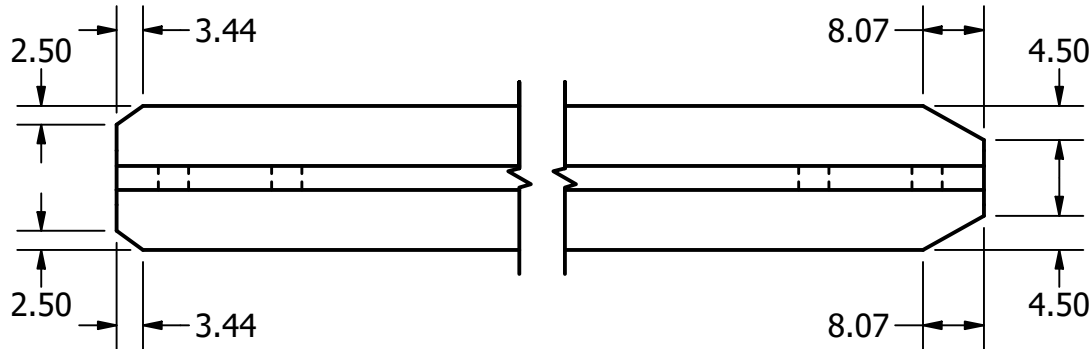
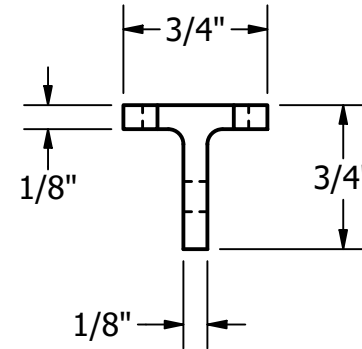
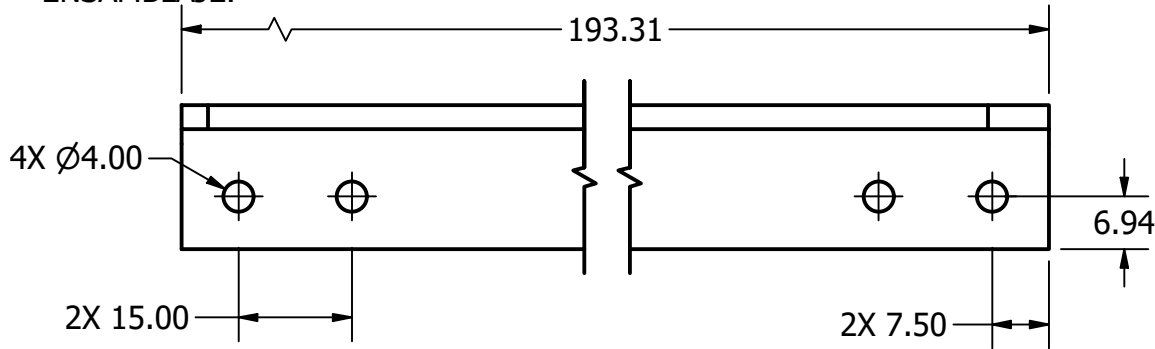
LOS CORTES REALIZADOS EN LAS ESQUINAS DEL PERFIL SON PARA EVITAR INTERFERENCIA CON LOS PERFILES ALEDAÑOS.

PINTAR LOS CORTES DIAGONALES DE MEDIDA 4.5 CON EL MISMO COLOR QUE EN EL PERFIL LADO A Y LOS CORTES DE MEDIDA 2.5 DE OTRO COLOR PARA FACILITAR EL ENSAMBLAJE.



B

B



A

A

2



1

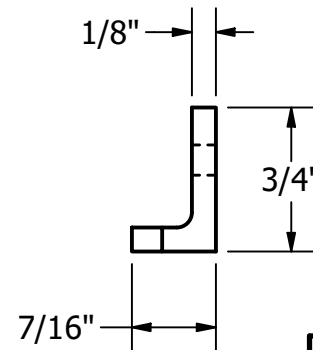
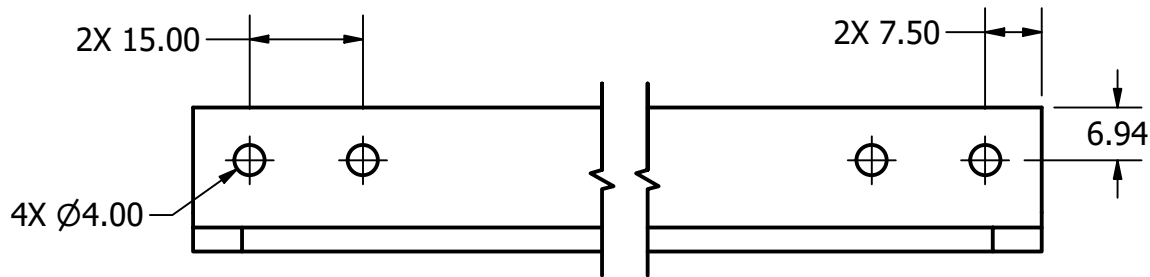
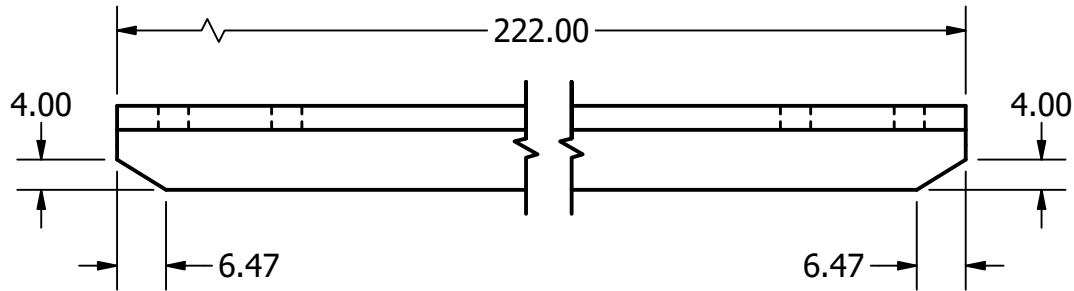
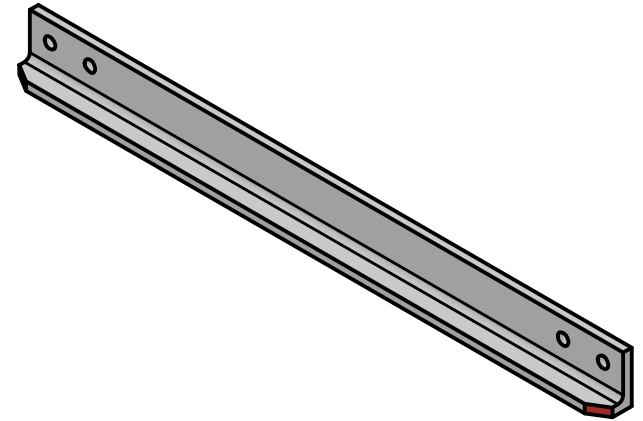
TÍTULO: PERFIL T LADO B		
NÚMERO DE DIBUJO: 9		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 11 DE 13	REV 0

NOTAS GENERALES:

FABRICAR CON PERFIL ANGULAR DE 3/4" X 7/16" X 1/8".

LOS CORTES REALIZADOS EN LAS ESQUINAS DEL PERFIL SON PARA EVITAR INTERFERENCIA CON LOS PERFILES ALEDAÑOS.

PINTAR LOS 2 CORTES DIAGONALES CON EL MISMO COLOR CON EL CUAL SE PINTARON LOS CORTES DE MEDIDA 4 DEL PERFIL LADO A PARA FACILITAR EL ENSAMBLAJE.



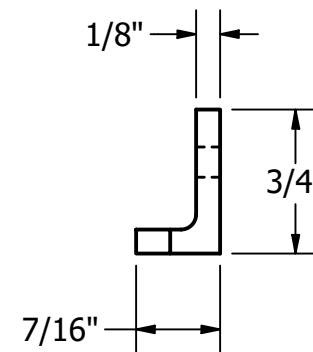
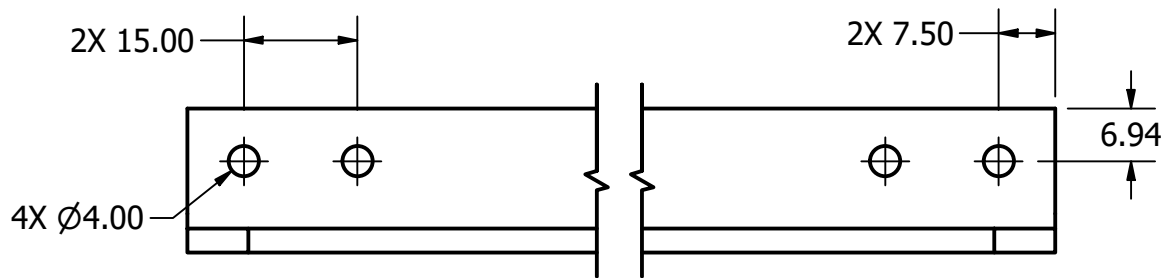
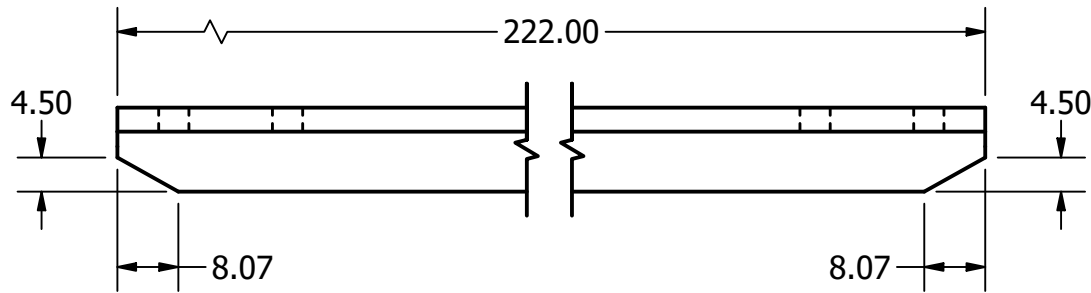
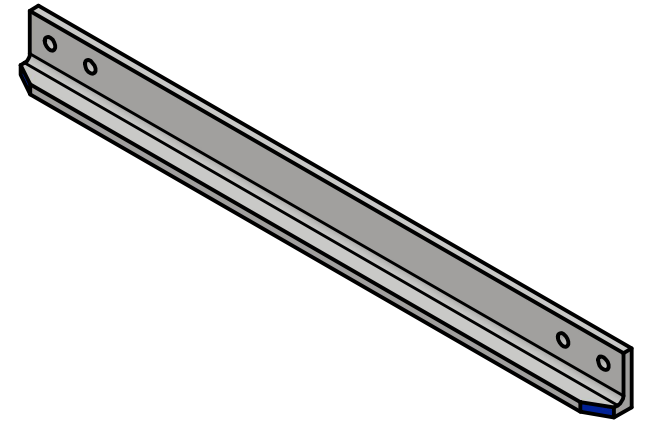
TÍTULO: PERFIL ANGULAR LADO A / IZQUIERDO		
NÚMERO DE DIBUJO: 10		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 12 DE 13	REV 0

NOTAS GENERALES:

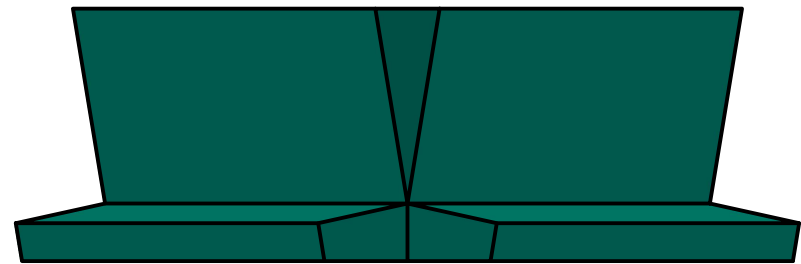
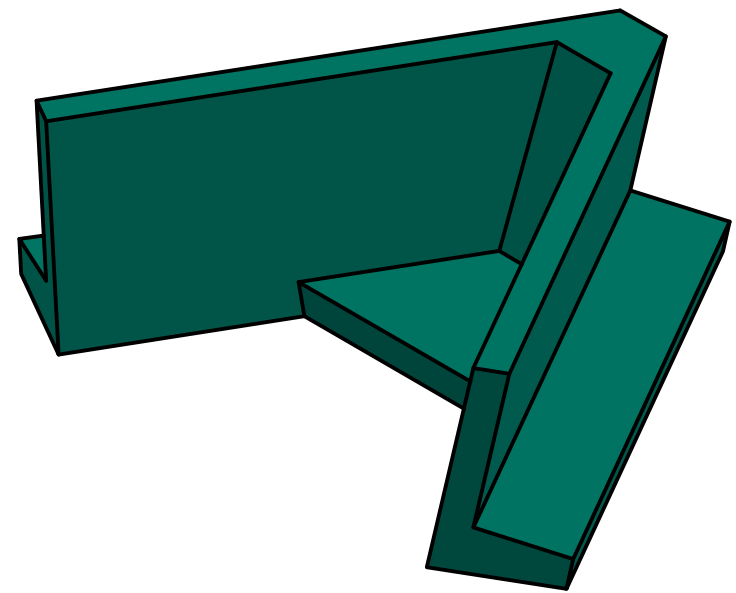
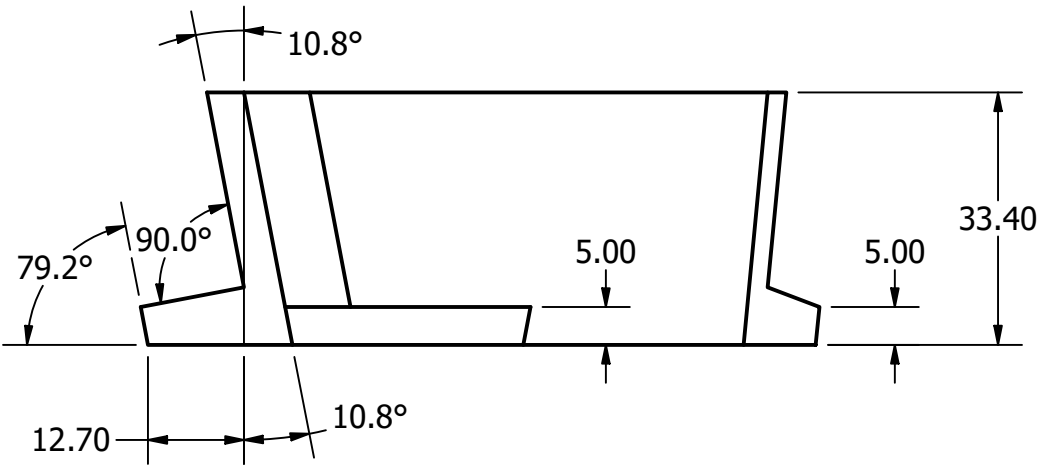
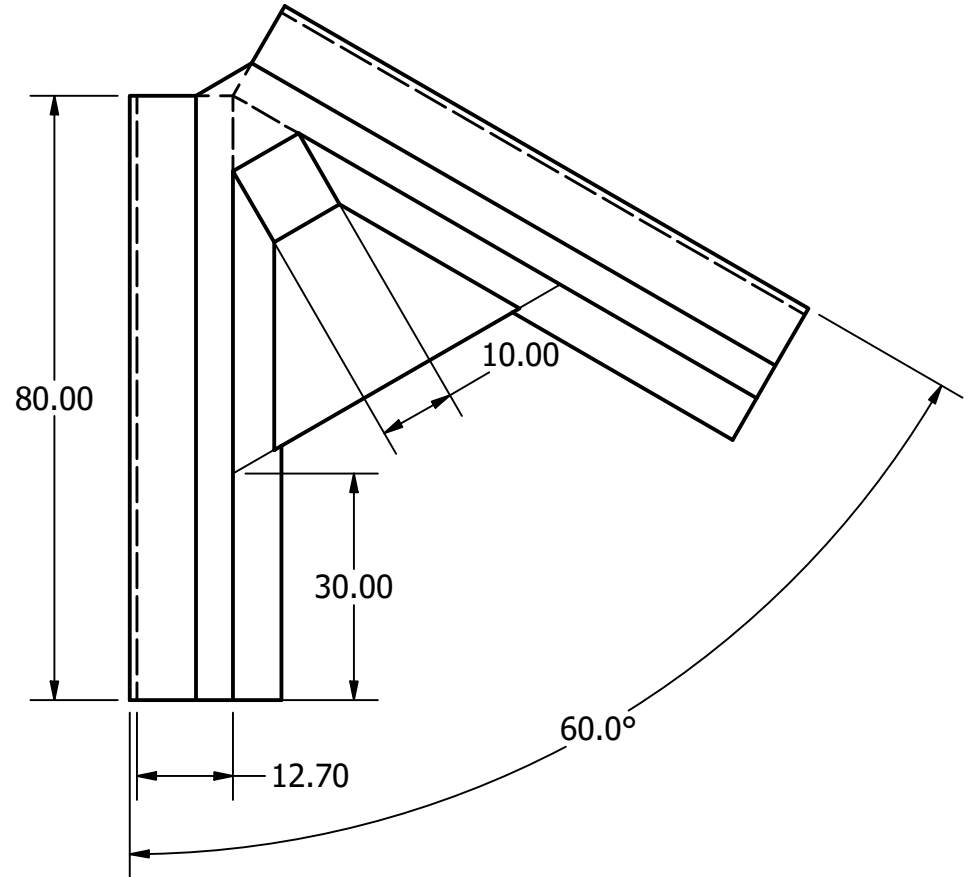
FABRICAR CON PERFIL ANGULAR DE 3/4" X 7/16" X 1/8".

LOS CORTES REALIZADOS EN LAS ESQUINAS DEL PERFIL SON PARA EVITAR INTERFERENCIA CON LOS PERFILES ALEDAÑOS.

PINTAR LOS 2 CORTES DIAGONALES CON EL MISMO COLOR CON EL CUAL SE PINTARON LOS CORTES DE MEDIDA 4.5 DEL PERFIL LADO A PARA FACILITAR EL ENSAMBLAJE.



TÍTULO: PERFIL ANGULAR LADO A / DERECHO		
NÚMERO DE DIBUJO: 11		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
A	PÁGINA 13 DE 13	REV 0



TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.		DIBUJADO POR IAN QUAN	FECHA 21/11/2022
TOLERANCIAS GENERALES		DISEÑADO POR IAN QUAN	FECHA 22/09/2022
LINEAL	.X ± .XX ± .XXX ±	REVISADO POR	FECHA
ANGULAR ±		APROBADO POR GUSTAVO BARRERA	FECHA
FRACCIONES ±		NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO SOPORTES PENSADO	
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓	TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.	

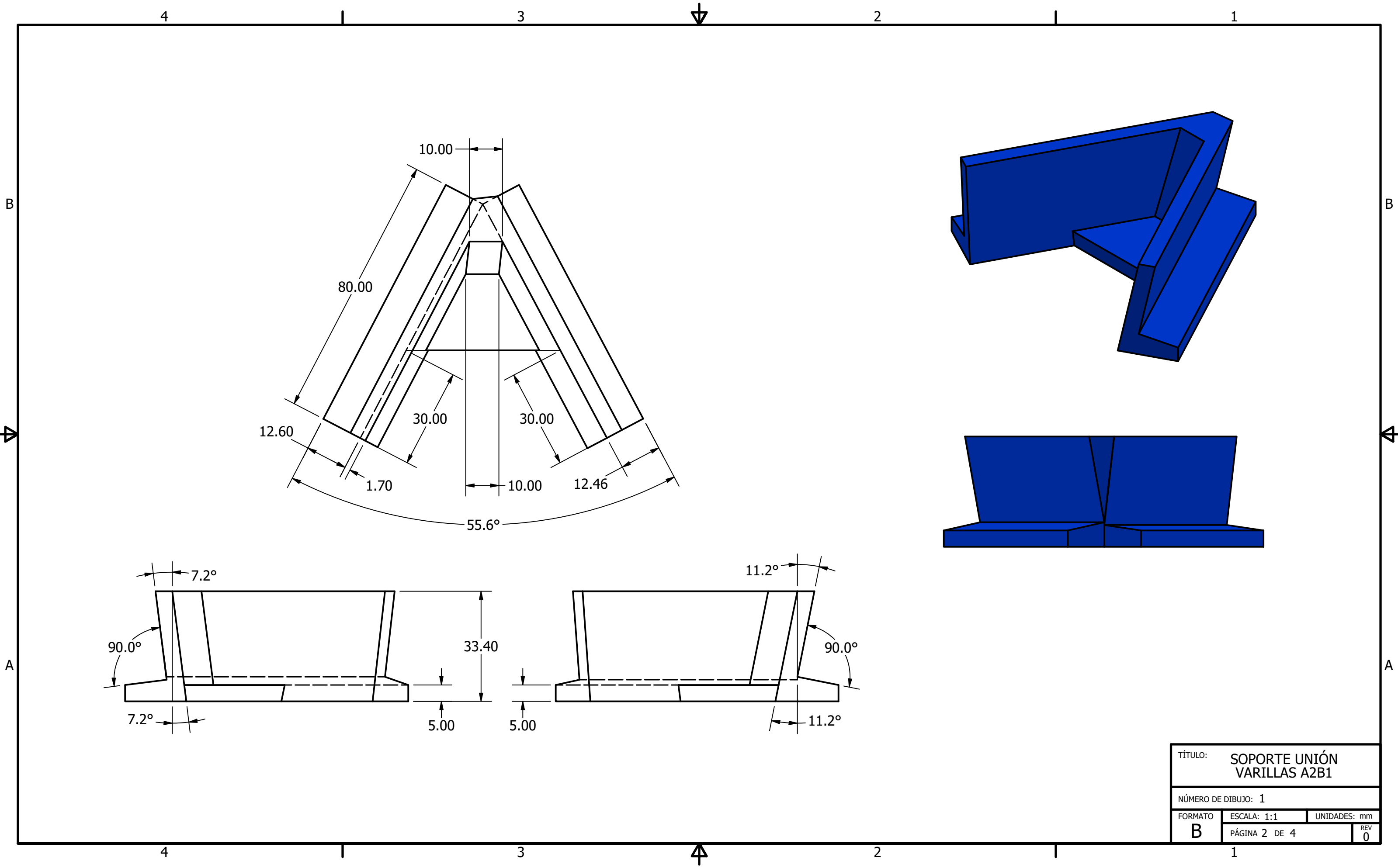

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO: **SOPORTE UNIÓN VARILLAS A1A1**

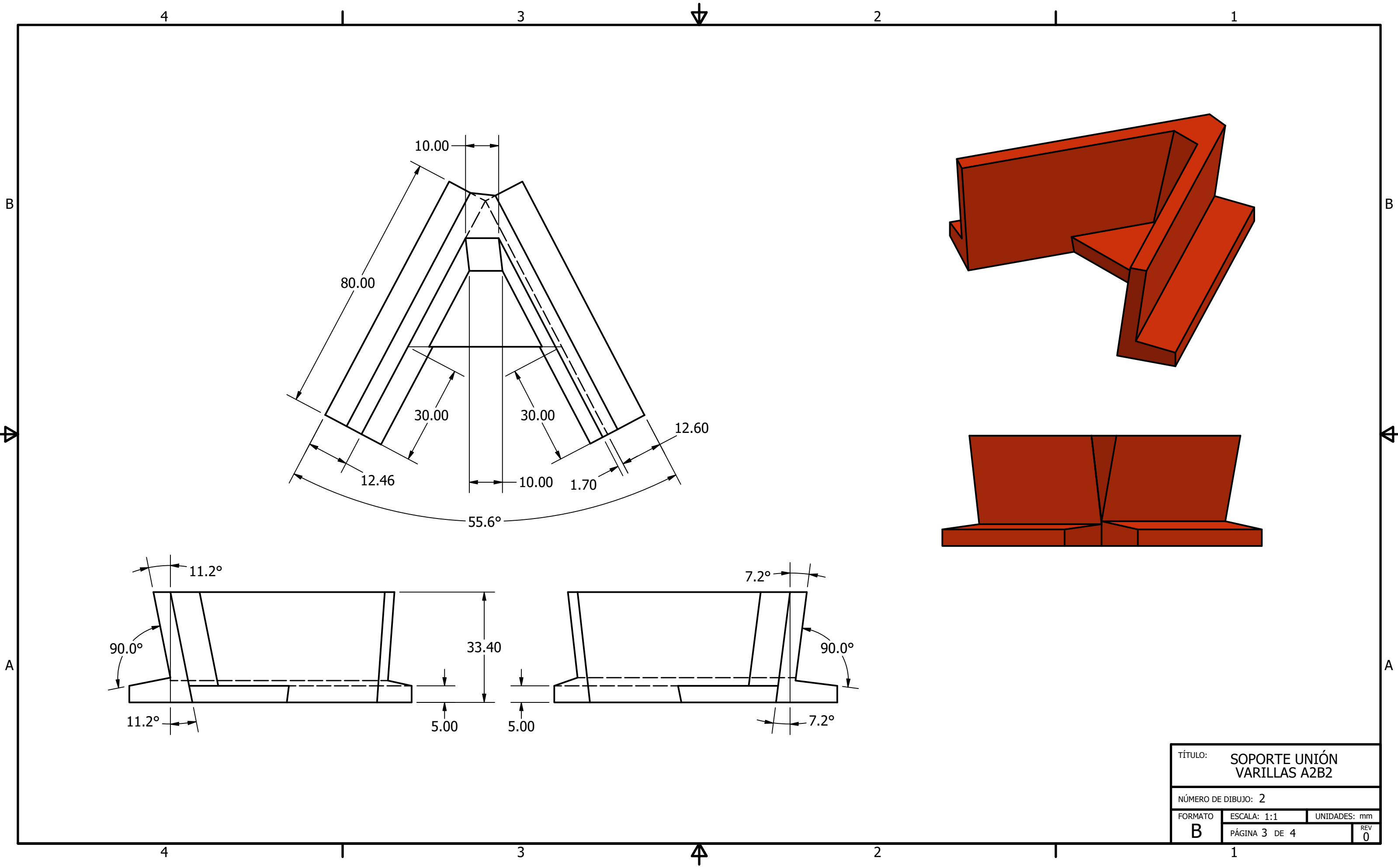
NÚMERO DE DIBUJO:		
FORMATO B	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
PÁGINA 1 DE 4		REV 0

MATERIAL	
TRATAMIENTO	
MASA: N/A	





TÍTULO: SOPORTE UNIÓN VARILLAS A2B1		
NÚMERO DE DIBUJO: 1		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 2 DE 4	REV 0



TÍTULO: SOPORTE UNIÓN VARILLAS A2B2		
NÚMERO DE DIBUJO: 2		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 3 DE 4	REV 0

4

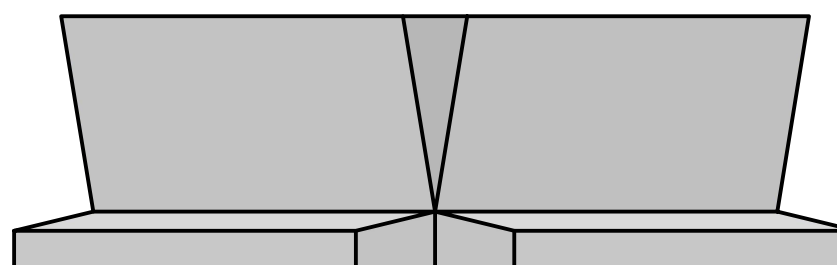
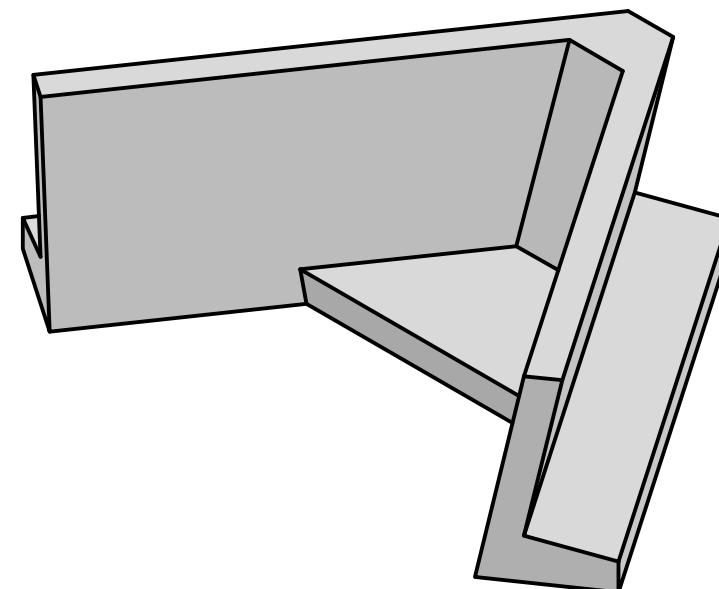
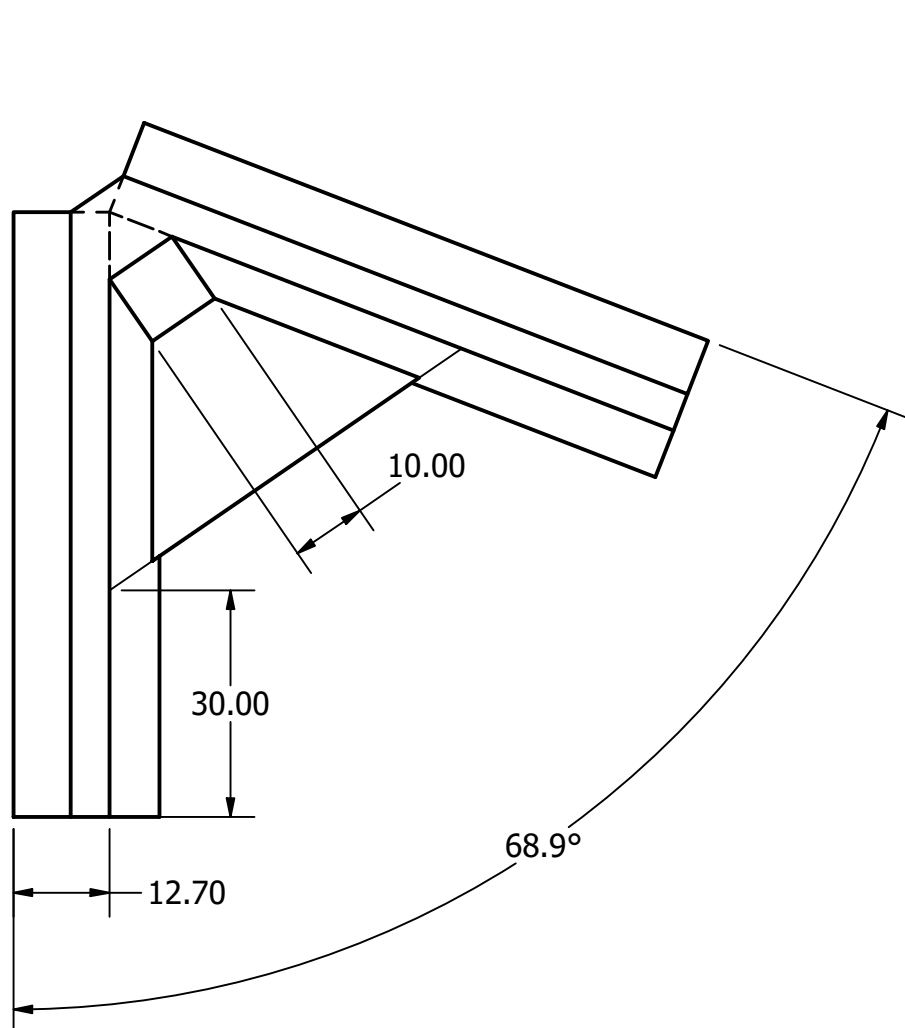
3

2

1

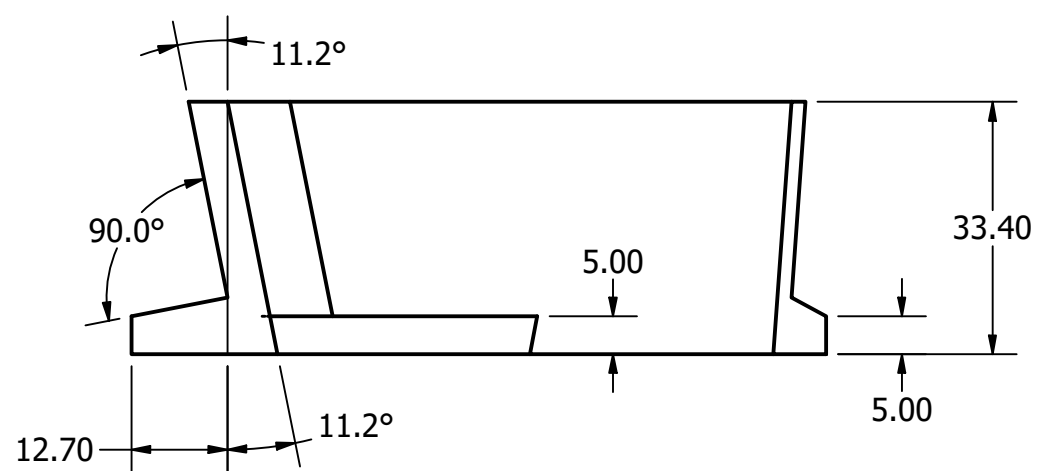
B

B



A

A



TÍTULO: SOPORTE UNIÓN VARILLAS B1B2		
NÚMERO DE DIBUJO: 3		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
B	PÁGINA 4 DE 4	REV 0

4

3

2

1

A

A