



industriales

Escuela Técnica Superior  
de Ingeniería Industrial



industriales  
etsii UPCT



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

**Diseño y fabricación en centro de  
mecanizado 5-ejes de uniones rígidas  
de 4 perfiles en L para cúpulas monocapa**

**TRABAJO FIN DE ESTUDIOS**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Autor: Jesús Ortiz González**

**Director: Manuel Estrems Amestoy**

**Codirector: Javier Castellote Martínez**

**Cartagena, a 07 de septiembre de 2021**



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



# Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi director de proyecto Manuel Estrems Amestoy, por toda la ayuda, dedicación e implicación del presente proyecto, por estar siempre disponible para cualquier consulta. También quiero dar las gracias a mi codirector de este proyecto, Javier Castellote Martínez, a Wilmer Euclides Cumbicus Jiménez y a Óscar de Francisco Ortiz por la ayuda y los consejos que me han aportado. En especial, dar las gracias a todos los integrantes y a la propia Universidad Politécnica de Cartagena por tratarme tan bien a lo largo de estos cuatro años.

Así mismo, agradecer a toda mi familia, a mi padre, a mi madre, a mi hermana Lidia y a todos los demás, por su apoyo incondicional en todo momento y que, sin ellos, no habría llegado hasta donde estoy ahora mismo. Igualmente, agradecer a todas mis amistades, que son un apoyo imprescindible para mí, además de haberme ayudado en muchos aspectos de la carrera.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>10</b>
<b>Índice de ecuaciones</b>	<b>12</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO 1: Introducción</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 2: Cáscaras de rejilla</b>	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 3: Estado del arte</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Centro de fresado multieje</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Centro de mecanizado de 5 ejes</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Software del centro de mecanizado</b>	<b>30</b>
<b>3.4 Redes de Chebyshev</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 4: Metodología y aplicación</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Cúpula del invernadero</b>	<b>34</b>
4.1.1 Método de Newton-Raphson	35
4.1.2 Método de la secante	37
<b>4.2 Ángulos cenitales y azimutales de la estructura</b>	<b>41</b>
4.2.1 Ángulos cenitales	41
4.2.2 Ángulos azimutales	44
<b>4.3 Ángulos del mecanizado</b>	<b>46</b>
4.3.1 Nodo inferior	47
4.3.2 Nodo superior	50
<b>CAPÍTULO 5: Control numérico por computadora</b>	<b>58</b>
<b>CAPÍTULO 6: Diseño 3D</b>	<b>61</b>
<b>CAPÍTULO 7: Calibración</b>	<b>69</b>
<b>7.2 Calibración centro de mecanizado</b>	<b>70</b>
<b>7.2 Cálculo del centro de giro</b>	<b>74</b>
<b>CAPÍTULO 8: Fabricación</b>	<b>76</b>
<b>8.1 Material</b>	<b>77</b>
<b>8.2 Mecanizado</b>	<b>79</b>

<b>8.3</b>	<b>Tiempos de mecanizado</b>	<b>88</b>
<b>8.4</b>	<b>Costes económicos</b>	<b>90</b>
8.4.1	Componentes	90
8.4.2	Herramientas	90
8.4.	Tasa horaria	91
8.5	Resumen de costes	92
<b>CAPÍTULO 9: Proyección futura y Conclusión</b>		<b>94</b>
<b>9.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>95</b>
9.1.1	Diseño 3D	95
9.1.2	Ángulo cenital y azimut	95
9.1.3	Programación código numérico	96
9.1.4	Centro de mecanizado	96
<b>9.2</b>	<b>Optimización</b>	<b>96</b>
<b>9.3</b>	<b>Investigación futura</b>	<b>98</b>
<b>Bibliografía</b>		<b>99</b>
<b>Anexos</b>		<b>102</b>
<b>Anexo I: Coordenadas de los nodos en la cúpula</b>		<b>103</b>
	Anexo 1.1: Eje X	104
	Anexo 1.2: Eje Y	105
	Anexo 1.3: Eje Z	106
<b>ANEXO II: Programación en Excel del mecanizado</b>		<b>107</b>
	Programación nodo inferior	108
	Programación nodo superior	111
<b>Anexo III: Código Numérico</b>		<b>114</b>
	Parte inferior del nodo	115
	Parte superior del nodo	117
<b>Anexo IV: Planos</b>		<b>118</b>
	Plano 01 – Nodo Inferior	118
	Plano 02 – Nodo Superior	118



# Resumen

El objetivo principal del trabajo consiste en la mejora del diseño de un invernadero, haciéndolo más artístico e innovador. Se conseguirá gracias a una estructura monocapa, formada por una malla cuadrada donde los bordes de las barras estarán presionados por dos piezas que en conjunto son llamados “nodos”. Esta solución presenta la característica de ser un invernadero fácilmente montable y desmontable, pues es innecesaria la soldadura en la estructura y es redundante el uso de operarios cualificados, llegando a obtener una forma de invernadero más llamativo.

Los objetivos específicos consistirán en obtener el diseño 3D del nodo, los ángulos cenitales y azimutales de cada nodo, el conocimiento de la geometría por parte del programa y la generación del código numérico para mecanizar la geometría de cada uno de los distintos nodos que se colocarán en la estructura del invernadero.

Para el mecanizado de los nodos se utilizará el centro de mecanizado de 5 ejes disponible en el Departamento de Ingeniería Mecánica, Materiales y Fabricación.

# Abstract

The main objective of the work is to improve the design of a greenhouse, making it more artistic and innovative. It will be achieved thanks to a monolayer structure, formed by a square mesh where the edges of the bars will be pressed by two pieces that together are called "nodes". This solution presents the characteristic of being an easily assembled and disassembled greenhouse, as it is unnecessary to weld the structure and the use of qualified operators is redundant, obtaining a more striking greenhouse shape.

The specific objectives will consist of obtaining the 3D design of the node, the zenithal and azimuthal angles of each node, the knowledge of the geometry by the programme and the generation of the numerical code to machine the geometry of each of the different nodes that will be placed in the greenhouse structure.

For the machining of the nodes, the 5-axis machining centre available in the Department of Mechanical Engineering, Materials and Manufacturing, will be used.



# Índice de figuras

<i>Figura 1. 1. Invernadero tipo Túnel con estructura de acero.</i>	21
<i>Figura 2. 1. Interior de “The Savill Building” en The Savill Garden in Windsor Great Park.</i>	23
<i>Figura 2. 2. Simulación en ordenador de la estructura DE SHAVILL.</i>	24
<i>Figura 2. 3. Interior de “The Weald and Downland Gridshell”</i>	25
<i>Figura 2. 4. Patio central del Museo Británico de Londres</i>	25
<i>Figura 3. 1. Centro de mecanizado Lagun L650</i>	29
<i>Figura 4. 8. Referencia de los nodos</i>	41
<i>Figura 4. 9. Ángulo cenital y ángulo de elevación</i>	42
<i>Figura 4. 10. Vector normal entre el nodo de referencia y los nodos cardinales</i>	42
<i>Figura 4. 11. Ángulo azimut</i>	44
<i>Figura 4. 12. Ángulo azimut respecto al plano de referencia</i>	46
<i>Figura 4. 13. Vector Normal en el espacio</i>	48
<i>Figura 4. 14. Vector Normal girado al plano XZ</i>	49
<i>Figura 4. 15. Vectores del nodo inferior girados respecto al eje Y con cambio de sentido</i>	51
<i>Figura 4. 16. Intersección entre planos</i>	52
<i>Figura 4. 17. Rectas entre el Plano de la cara Este</i>	52
<i>Figura 4. 18. Posición del punto <math>r1'</math></i>	53
<i>Figura 4. 19. Posición del punto <math>r1''</math></i>	54
<i>Figura 4. 20. Posición del punto <math>r1'''</math> y pasada que sigue la herramienta</i>	54
<i>Figura 4. 21. Nodo superior con imperfecciones</i>	55
<i>Figura 4. 22. Colocación y pasada de la herramienta del plano Este</i>	55
<i>Figura 4. 23. Colocación y pasada de la herramienta de todas las caras</i>	56
<i>Figura 4. 24. Trayectoria del mecanizado</i>	56
<i>Figura 4. 2. Trayectoria del mecanizado girados</i>	57
<i>Figura 5. 1. Diagrama de bloques de una máquina con control numérico</i>	59
<i>Figura 6. 1. Primer prototipo del nodo inferior: “Paletas”</i>	63
<i>Figura 6. 2. Segundo prototipo nodo superior e inferior: “Muelas”</i>	63
<i>Figura 6. 3. Ensamblaje nodo “Muelas”</i>	64
<i>Figura 6. 4. A la izquierda, el tercer prototipo: “pirámide”, a la derecha el diseño alterado</i>	64
<i>Figura 6. 5. Diseño final completo</i>	65
<i>Figura 6. 6. Ensamblaje del nodo con perfiles, tornillo y tuerca</i>	66

<b>Figura 6. 7. Ensamblaje del nodo con vista de ángulo cenital .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 6. 8. Red cuadrada unida por los nodos.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 7. 1. Micrómetro digital.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 7. 2. Calibración eje X.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 7. 3. Calibración eje Y.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 7. 4. Reloj comparador .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 7. 5. Calibración eje B.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 8. 1. Plano de planta del ELDI .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 8. 2. Corte de los nodos con sierra automática del taller ELDI .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 8. 3. Mecanizado en el torno del taller ELDI.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 8. 4. Sujeción del nodo al útil .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 8. 5. Cajera circular del nodo superior .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 8. 6. Ejes de la máquina herramienta .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 8. 6. Prueba de mecanizado del nodo inferior.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 8. 7. Mecanizado piramidal del nodo inferior .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 8. 8. Mecanizado completo nodo inferior .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 8. 9. Mecanizado desfavorable del nodo superior.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 8. 10. Cajera circular.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 8. 11. Mecanizado nodo superior .....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 8. 12. Mecanizado completo nodo superior .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 8. 13. Diagrama de Gantt para el mecanizado de los nodos.....</b>	<b>88</b>

# Índice de ecuaciones

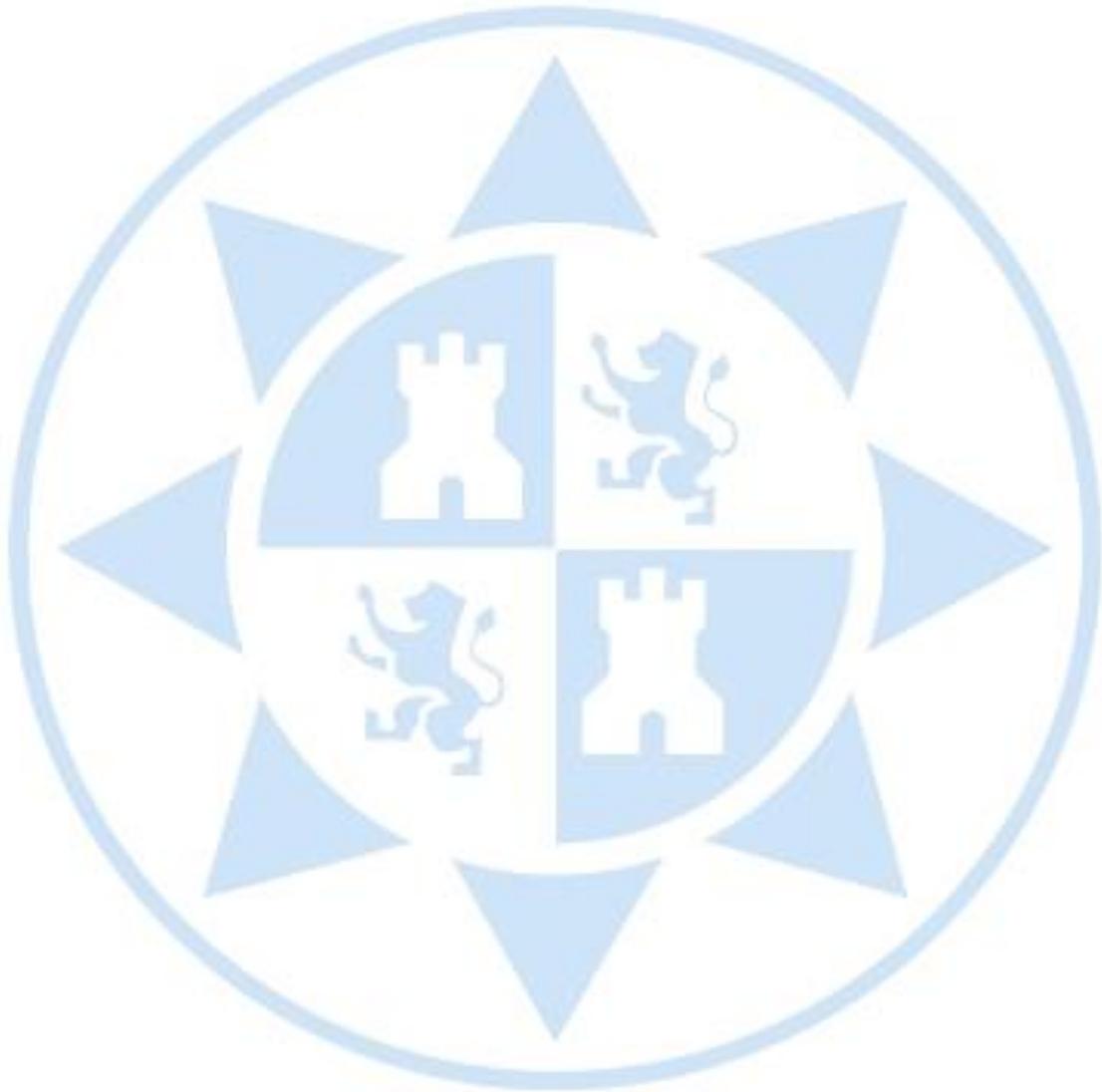
- 4.1.1 Ecuación de la superficie de la estructura monocapa
- 4.1.2 Función de  $y$  para el Método de Newton-Raphson
- 4.1.3 Función multivariable  $(x,y)$  para el Método de Newton-Raphson
- 4.1.4 Ecuación de la recta para el Método de la secante
- 4.1.5 Ecuación de la recta para  $y = 0$
- 4.1.6 Distancia entre dos puntos de la recta
- 4.1.7 Ecuación esfera nº 1
- 4.1.8 Ecuación esfera nº 2
- 4.1.9 Función de la primera esfera
- 4.1.10 Función de la segunda esfera
- 4.1.11 Iteración con el Método de Newton-Raphson
- 4.2.1 Vector  $\overline{NS}$
- 4.2.2 Vector  $\overline{EO}$
- 4.2.3 Producto vectorial entre los vectores  $\overline{NS}$  y  $\overline{EO}$
- 4.2.4 Módulo del producto vectorial
- 4.2.5 Vector normal normalizado al eje del cilindro
- 4.2.6 Recta de vectores entre el nodo de referencia y el nodo N
- 4.2.7 Recta de vectores entre el nodo de referencia y el nodo S
- 4.2.8 Recta de vectores entre el nodo de referencia y el nodo E
- 4.2.9 Recta de vectores entre el nodo de referencia y el nodo O
- 4.2.10 Ángulo cenital del nodo N
- 4.2.11 Ángulo cenital del nodo S
- 4.2.12 Ángulo cenital del nodo E
- 4.2.13 Ángulo cenital del nodo O
- 4.2.14 Plano de referencia “r”
- 4.2.15 Módulos del plano de referencia con la recta entre vectores

- 4.2.16 Ángulo azimut del nodo N**
- 4.2.17 Ángulo azimut del nodo E**
- 4.2.18 Ángulo azimut del nodo S**
- 4.2.19 Ángulo azimut del nodo O**
- 4.3.1 Vectores normalizados de los nodos**
- 4.3.2 Vector perpendicular a los nodos de los puntos cardinales**
- 4.3.3 Vector normal a la superficie**
- 4.3.4 Giro en el eje “C”**
- 4.3.5 Rotación alrededor del eje “z”**
- 4.3.6 Giro en el eje “B”**
- 4.3.7 Rotación alrededor del eje “y”**
- 4.3.8 Matriz de rotación compuesta**
- 4.3.9 Vectores normalizados en el plano “xy”**
- 4.3.10 Ángulo C para el mecanizado**
- 4.3.11 Ángulo B para el mecanizado**
- 4.3.12 Ecuación del plano de las caras**
- 4.3.13 Ecuación de la recta entre planos**
- 4.3.14 Primer punto del mecanizado del nodo superior**
- 4.3.15 Primera línea paralela a la recta entre planos**
- 4.3.16 Segundo punto del mecanizado del nodo superior**
- 4.3.17 Segunda línea paralela a la recta entre planos**

# Índice de tablas

<b>Tabla 8. 4. 1. Presupuesto de los materiales.....</b>	<b>90</b>
<b>Tabla 8. 4. 2. Precio de las herramientas utilizadas .....</b>	<b>91</b>
<b>Tabla 8. 4. 3. Tiempo usado en las máquinas herramientas.....</b>	<b>92</b>
<b>Tabla 8. 4. 5. Coste de la tasa horaria .....</b>	<b>92</b>
<b>Tabla 8. 4. 6. Resumen del presupuesto total .....</b>	<b>92</b>
<b>Tabla 9. 2. 1. Tiempo de mecanizado optimizado .....</b>	<b>97</b>
<b>Tabla 9. 2. 2. Coste de la tasa horaria optimizada .....</b>	<b>97</b>





# CAPÍTULO 1: Introducción

En el mundo actual, la agricultura es fundamental, contribuyendo de manera significativa a la provisión de alimentos básicos como lo son los vegetales y frutos.

Hoy en día tenemos multitud de avances de los cultivos en invernaderos, los cuales están formados por una estructura metálica o de plástico cubiertos de vidrio o plástico traslucido que deja pasar la radiación solar y atrapa la energía en el invernadero, aumentando la temperatura en el interior. Mientras se desarrolla el microclima ideal para generar todo el potencial genético [1], se evita la penetración de insectos y se crea un ambiente desfavorable para los microorganismos productores de enfermedades.

Los invernaderos deben suministrar unas condiciones climáticas óptimas, que promuevan el ahorro de energía con un aumento de eficiencia, reducción de pesticidas, fertilizantes y emisiones de gases tóxicos y aumenten, a su vez, la seguridad laboral y de salud. Además, no hay desgastes en los suelos, pues el terreno se utiliza como soporte. El suelo se sustituye por una camada compuesta por una cuarta parte de arena y las tres restantes por cascarilla de arroz quemada, cascarilla de cacahuete o el mesocarpio del coco. Por medio del riego por goteo, serán recibidos los nutrientes y la camada cobijará al sistema radicular de los cultivos. Se logra triplicar la producción respecto de un cultivo en la forma tradicional a campo abierto, y en caso de ser un invernadero con tecnología automática, se puede quintuplicar, septuplicar y multiplicar hasta por 10.

España es uno de los principales productores mundiales de alimentos en áreas protegidas, en concreto es el segundo, después de China. Consta de 70.000 hectáreas para producción hortofrutícola en invernaderos y solo en Almería, hay más de 31.000 hectáreas, siendo la suma total en Andalucía de más de 36.000 hectáreas en total [2], más de la mitad de todo el país. España es una de las potencias mundiales más grandes de exportación hortofrutícola [3], gracias a su riqueza en el campo y la gran cantidad de variedades que son producidas, siendo el primer exportador mundial de frutas como las naranjas, con tres millones de toneladas al año, según los datos de “FAO” (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). También es el primer exportador de fresa y fresón, destacando su producción la mayoría producidas en Huelva; de melón, dominando en el centro de la península; de melocotones y nectarinas, la mayoría producidas en Lérida; de mandarina, siendo la segunda fruta con más producción de España, con casi dos millones de toneladas, según los datos del “MAPA” (Anuario de Estadística del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) y de sandía, pues España es el segundo exportador del mundo. En cuanto a verduras y hortalizas se refiere, nos encontramos con el tomate, con más de 5 toneladas de producción, convirtiéndose en la hortaliza con mayor producción de España y el tercer exportador del mundo, en cambio, la lechuga es la hortaliza con más exportación mundial, que es dominado por el campo murciano, y también nos encontramos entre las hortalizas más cultivadas a las zanahorias y el ajo, según los datos de la “FAO” [3].

- Los invernaderos se pueden clasificar en base a varios criterios, estos son [4]:
  1. Podemos clasificarlo según el rango de la temperatura que debe mantener el invernadero:
    - a. Invernadero cálido
    - b. Invernadero templado
    - c. Invernadero frío
  2. Materiales de cubierta:
    - a. Invernaderos con vidrio
    - b. Invernaderos con materiales plásticos
  3. Según su estructura:
    - a. De madera
    - b. De acero
    - c. De hormigón
    - d. De aluminio
    - e. Combinación de lo anterior
  4. Según su forma:
    - a. Túnel
    - b. Capilla
    - c. Gótico
    - d. Raspa y amagado

- Tipo Túnel

Este tipo de invernadero tiene una estructura totalmente curva, formada con tubos cilíndricos galvanizados, no tiene paredes rectas y la forma de sus arcos es curva u ojival. Gracias a esta forma permite un mayor volumen de aire en el interior con una gran resistencia a la lluvia. Es un invernadero barato y de fácil instalación, con la posibilidad de instalar sistemas de climatización, un buen reparto de la iluminación en el interior del invernadero y reduce la condensación y el goteo de agua en los cultivos gracias a su cubierta curva.

- Tipo Capilla

La cubierta de este tipo de invernaderos está formada por arcos curvos semicirculares y tiene una estructura totalmente metálica. Las demás partes se unen con grapas, tuercas y tornillos, por lo que no hace falta soldar. Unas ventajas de los invernaderos de tipo capilla es la buena ventilación, los pocos obstáculos que se encuentran en la estructura, una buena estanqueidad a la lluvia y al aire, una fácil instalación y que permite la instalación de ventilación tanto cenital como perimetral.

- Tipo Gótico

La diferencia entre este tipo y el de capilla está en el diseño de los arcos, siendo el de este tipo de forma ojival, albergando un mayor volumen de aire, una mejor iluminación y microclima. Está diseñado para cualquier tipo de cultivo y las estructuras soportan grandes cargas y con la posibilidad de construir las naves más anchas aumentando la superficie de cultivo. Además, su montaje es rápido y sencillo, ya que no hace falta ningún tipo de soldaduras. Permite una mayor entrada de luz y de ventilación.

- Tipo Raspa y amagado

Son los invernaderos más típicos de Almería y es una transformación de los invernaderos tipo parral o planos para conseguir evacuar el agua de la lluvia. La parte alta se conoce como raspa y la baja como amagado y está sujeta mediante horquillas de hierro sujetadas a la base del invernadero. Es económico y sencillo, un montaje rápido y sin soldaduras, con un buen control del clima, una mayor capacidad de estanqueidad que el invernadero plano y permite la instalación de ventanas cenitales.

En cuanto a las ventajas e inconvenientes más importantes que obtenemos cultivando en invernaderos respecto al cultivo a campo abierto y a las mencionadas anteriormente, estas son las más relevantes [5]:

- Ventajas:

- Aumento de la eficiencia.

Tras tanto tiempo sobre el estudio de la eficiencia de cultivos en invernaderos se ha descubierto que el rendimiento por unidad de superficie cultivada aumenta entre dos y tres veces que en suelo sobre campo abierto. Utilizando la hidroponía de los rendimientos puede aumentar hasta diez veces.

- Intensificación de la producción.

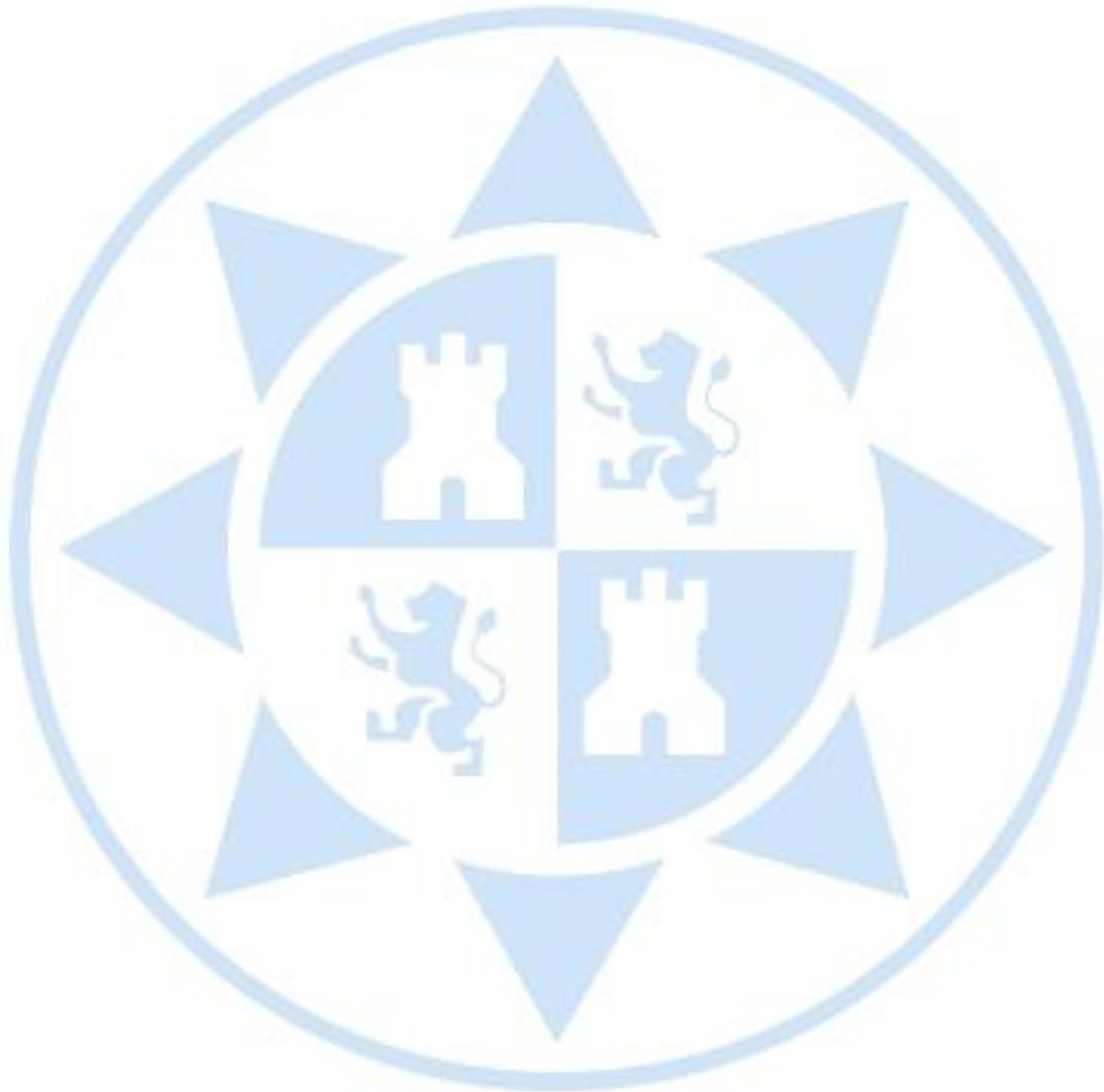
Es posible instalar controles climáticos mejorando así las condiciones del cultivo hasta llegar a un punto óptimo en los invernaderos, además de situar más plantas en la misma unidad de superficie que en campo abierto. Es por eso por lo que los invernaderos pueden considerarse elementos de la agricultura intensiva.

- Mayor protección en la producción.  
El cambio climático no afecta tanto a la producción de los cultivos al estar en un invernadero, pues su propia estructura minimiza los daños causados por fenómenos naturales. En cambio, en campo abierto las pérdidas del cultivo pueden ser máximas.
- Control de plagas, enfermedades y malezas.  
La clave para que haya un buen control de plagas, enfermedades y malezas es que el invernadero esté bien diseñado y construido, teniendo una buena hermeticidad para que estos no fallen.
- Posibilidad de cultivar todo el año  
Es posible producir en cualquier época del año debido a que se puede implementar calefacción si el invierno es muy frío o en cambio, ventilación y enfriamiento para altas temperaturas en verano.
  - Desventajas:
- Inversión inicial.  
Un invernadero es una estructura con un coste de construcción relativamente alto, siendo la inversión inicial elevada. Por ello, es recomendable la producción de cultivos con un alto valor económico, con el objetivo de recuperar el gasto tan alto.
- Altos costos de producción.  
La diferencia en el gasto de las operaciones del cultivo en campo abierto y en invernadero es muy grande, puesto que en el invernadero se va a tener un mayor gasto por la electricidad o el gas para los aparatos de calefacción y enfriamiento para que el cultivo tenga unas condiciones idóneas.
- Trabajadores capacitados  
Hay un mayor coste por el hecho de que debe de haber trabajadores cualificados para controlar las máquinas instaladas en el invernadero que contralan el ambiente y que tiene que estar preparados para los problemas que se presenten.



*Figura 1. 1. Invernadero tipo Túnel con estructura de acero.*

En el ámbito industrial, las empresas buscan mejorar sus capacidades y la optimización de productos continuamente, para ello deben tener en cuenta la calidad de sus productos, tanto en estética, como simplicidad, precisión, productividad o más características para que su producto pueda destacar fácil y rápido en el mercado. Por ello, en este documento se propone la creación de un producto único que podrá abrir nuevas líneas de investigación para romper con la monotonía de los invernaderos tradicionales y crear una tipología más orientada a la creatividad y a los avances tecnológicos.



## CAPÍTULO 2: Cáscaras de rejilla

Una cáscara es una estructura tridimensional que resiste las cargas aplicadas gracias a su forma inherente. Si se hacen orificios regulares en la cáscara, la estructura resultante es una cáscara de rejilla.

La estabilidad estructural tridimensional se mantiene gracias a la rigidez al corte en el plano del armazón [6], que se consigue impidiendo la rotación en los nodos o mediante la introducción de refuerzos.

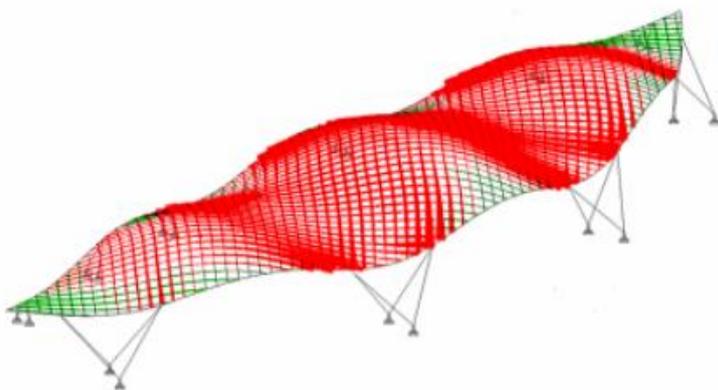
Estas estructuras son superficies muy demandadas por la forma libre que puede obtener, permitiendo a los ingenieros y arquitectos diseñar auténticas cáscaras con la mínima presencia de elementos estructurales, además de su ligereza, belleza, luminosidad, limpieza visual, etc. Su uso es muy variado, desde patios cubiertos, piscinas cubiertas, pabellones deportivos y demás.



*Figura 2. 1. Interior de “The Savill Building” en The Savill Garden in Windsor Great Park.*

En la figura 2.1 se muestra el diseño y la construcción de la cubierta del edificio “The Savill Building”, que se encuentra en el jardín cerrado “Savill Garden”, ubicado en Windsor, Inglaterra, diseñada por los arquitectos del gabinete de “Glenn Howells Architects”. La estructura es una malla de madera, formada por listones y una cubierta de madera que soporta el techo [7]. Esta cubierta de rejilla de madera es la más grande de Reino Unido, tratándose de una estructura de tres cúpulas y doble curvatura de forma sinusoidal.

La teoría en la que se basa la forma de la cáscara de rejilla de Savill es bastante sencilla, en planta, el perímetro se establece mediante arcos de dos círculos que se cruzan. La línea central curvada en planta es la línea media entre los círculos. La línea central del techo, en sección, está generada por una curva sinusoidal, de amplitud variable, con sus picos y valles en las cimas de las cúpulas y los fondos de los valles. La sección transversal se establece a través de la línea central sinusoidal como una serie de curvas parabólicas de forma variable.



*Figura 2. 2. Simulación en ordenador de la estructura DE SHAVILL.*

Sobre esta superficie se genera una red de elementos de igual longitud, mediante el programa escrito para definir la forma como  $z = f(x,y)$  con una onda coseno amortiguada en la dirección X. y parábolas invertidas en la dirección Y.

El ajuste de la red de malla de igual superficie se realiza utilizando el hecho de que se sabe dónde están dos nodos diagonales opuestos de un pequeño rombo; los otros dos puede ser calculados matemáticamente. Este problema se conoce como construcción de una red de Chebyshev, comentado en el capítulo 3.

La diferencia entre la estructura de Savill y nuestro invernadero a parte del material utilizado, es que es utiliza una malla de doble capa superpuesta, debido al grado de curvatura que pueden llegar a tener los listones de una determinada sección transversal.

Cabe destacar la primera cascara de rejilla de madera en el Reino Unido, diseñada y construida por Buro Happold and Endward Cullinan, para el “Weald and Downland Open Air Museum”.



*Figura 2. 3. Interior de “The Weald and Downland Gridshell”*

Hay mucha similitud entre esta estructura y la de Savill, puesto que también tiene una forma senoidal, pero en este caso, el caparazón de madera llega hasta el suelo.

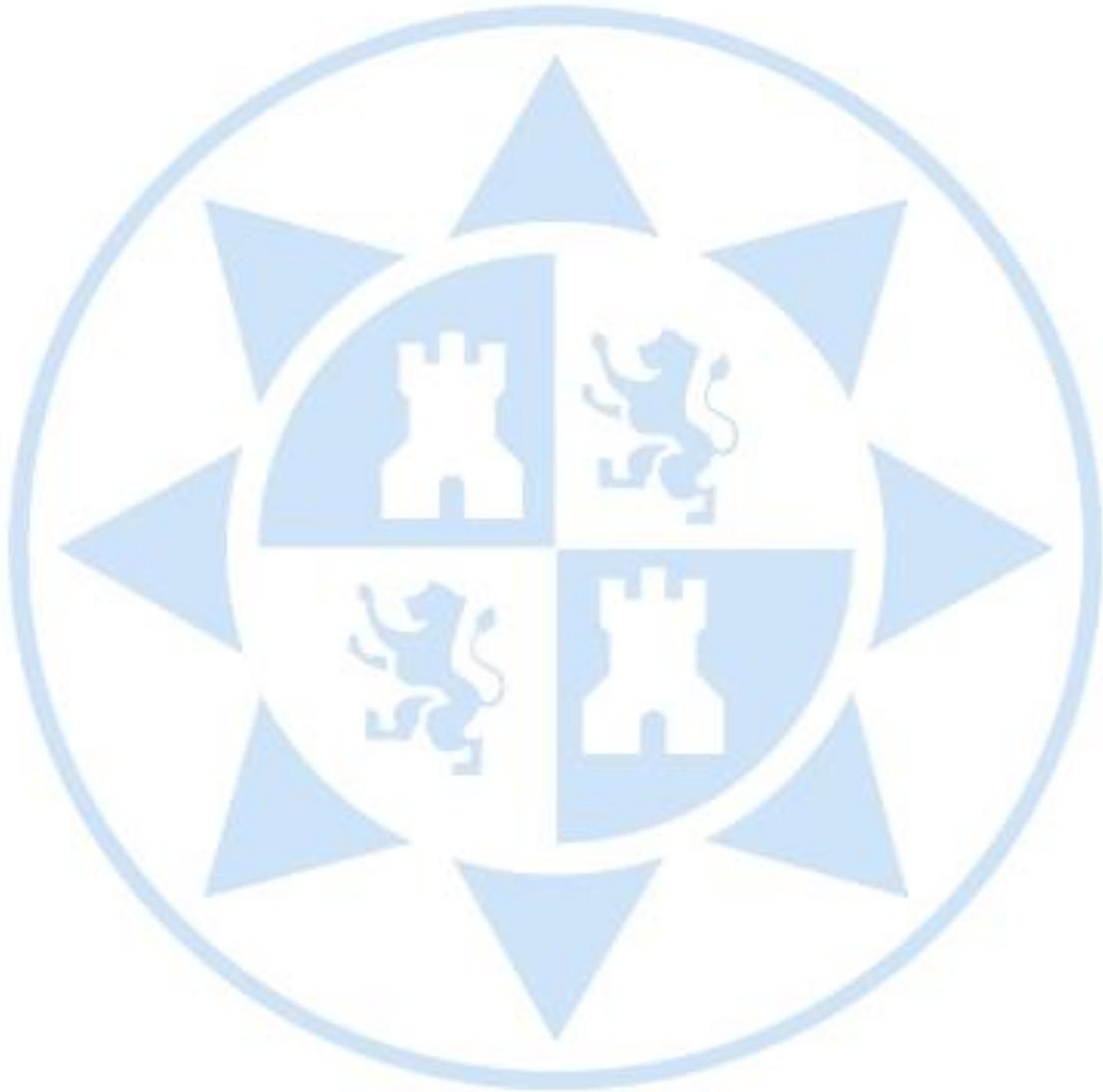
Otro ejemplo de estructura tridimensional es la cúpula de vidrio y acero que cubre el patio central del Museo Británico de la ciudad de Londres, que, a pesar de su sorprendente ligereza visual, tiene un peso de 420 toneladas [8].



*Figura 2. 4. Patio central del Museo Británico de Londres*

La superficie consta de 6.700 metros cuadrados, siendo el foco principal de la visita al museo. Como se puede observar, la estructura envuelve el tambor cilíndrico de la sala de lectura. El peso se distribuye en 20 columnas escondidas en el tambor cilíndrico y tapadas por una falsa pared de piedra. La estructura permite aligerar los esfuerzos gracias a que el gran radio actúa como una bóveda. Debo recalcar que es una de las cúpulas más famosas que existen.

Sin duda estas tres cúpulas mencionadas son dos maravillosas obras de ingeniería puramente creativas y llamativas, donde te envuelven a la vez que te asombran tanto exterior como interiormente.



## **CAPÍTULO 3: Estado del arte**

El presente capítulo trata las técnicas y temas utilizados para el desarrollo de este proyecto. El punto focal es el mecanizado de la pieza en el centro de fresado de 5 ejes que se usará para este proyecto.

### 3.1 Centro de fresado multieje

Los centros de mecanizado son máquinas automatizadas que incluyen un sistema de control numérico que controla la posición y la velocidad de la herramienta manipulando los ejes de la máquina. Tiene la aptitud de realizar muchas operaciones de forma automática aumentando la velocidad de producción, siendo la intervención humana mínima. Están diseñadas para operaciones de arranque de viruta y son utilizadas para fabricación de piezas complejas y moldes de inyección entre otras. Gracias a su precisión de trabajo y su gran flexibilidad, como la de optar entre 3, 4 y 5 ejes, se obtiene un acabado superficial impecable. Estas máquinas permiten sistemas tridimensionales que son creados mediante software que se comentará posteriormente en el presente capítulo.

### 3.2 Centro de mecanizado de 5 ejes

Debido a todas las ventajas que nos presenta este proceso de mecanizado, se va a utilizar esta tecnología de fresado multieje para el mecanizado de nuestros nodos, que como su nombre indica, contiene los tres ejes cartesianos (X, Y, Z) permitiendo el control del movimiento en estos tres ejes principales, como cuarto eje, tenemos la posibilidad de controlar el giro de la pieza sobre cualquiera de los ejes mencionados anteriormente, por lo que nos sirve sobre todo cuando tenemos un diseño con superficie cilíndricas y que sería imposible el mecanizado con una fresadora convencional. Tenemos otra posibilidad de acoplar un quinto eje en el centro de mecanizado, teniendo dos cualidades adicionales, la primera de ellas es que permite dos rotaciones en un eje, concediendo una nueva combinación de rotaciones y movimiento. La segunda, nos da la función de girar perpendicularmente un eje mientras la pieza se inclina perpendicularmente a dicho eje. Estas dos funciones otorgan una rotación única y enormes variedades de rotaciones para realizar funciones complejas. El centro de mecanizado que utilizo para mecanizar los nodos es el disponible en el Laboratorio de Máquinas Herramientas de la Universidad Politécnica de Cartagena.

El centro de mecanizado que vamos a utilizar es de la marca “Lagun”, exactamente el modelo “L 650”. Tiene una superficie de trabajo de 1000x460 mm y un curso longitudinal (x) de 650 mm, de ahí su nombre. Tiene un curso transversal (y) de 500mm y de un curso vertical (z) de 630 mm. Su sistema de traslación viene por una guía lineal de bolas y su transmisión es de polea-correa. Tiene una capacidad de hasta 16 huecos de herramientas, pero en el mecanizado solo se va a utilizar dos de ellas, las cuales nombraremos más adelante. Además, contiene refrigeración alrededor del eje principal y un soplado de aire para limpiar el interior del cono durante el cambio de herramienta. El software integrado es el Fagor 8065. El cabezal de esta máquina solo se mueve verticalmente (en el eje Z), mientras que los ejes X e Y se mueven por la mesa que acompaña al plato de garras. El eje B gira sobre el eje X y el eje C gira alrededor del eje Z.

En la siguiente figura se puede ver el centro de mecanizado del departamento ELDI.



*Figura 3. 1. Centro de mecanizado Lagun L650*

### 3.3 Software del centro de mecanizado

Una de las desventajas que presenta los centros de mecanizado es su elevado precio, al que hay que añadirle los costes de los softwares programados para el diseño y la fabricación, estos sistemas acoplados son el CAD y el CAM, siendo las siglas en inglés de:

- CAD: Computer-Aided Designed, Diseño asistido por ordenador.
- CAM: Computer-Aided Manufacturing. Fabricación asistida por ordenador.

En el software CAD se diseñan los modelos de los prototipos o piezas a fabricar, y se utiliza para todos los ámbitos de diseño gráfico, tanto en ingeniería y en arquitectura.

El CAM se utiliza para generar la ruta de las herramientas de los modelos creados anteriormente en ordenador por el software CAD. Con este programa obtenemos el código numérico, que da las instrucciones a la máquina herramienta para el mecanizado de las piezas diseñadas. El software CAM convierte los planos 2D o 3D a código G (lenguaje de la máquina).

Sin estos dos softwares el margen de error en el mecanizado de una pieza de forma manual es muy elevado y hay una intervención alta del operario, suponiendo un riesgo para su seguridad y una gran limitación para trabajos grandes y complicados.

En este caso no vamos a utilizar el CAM, los programas para centros de mecanizado de 5 ejes son muy costosos, por lo que vamos a desarrollar otro método para generar el programa de control numérico.

El CNC o control numérico computaciones será tratado en el capítulo 5.

### 3.4 Redes de Chebyshev

El contenido de este Trabajo de fin de estudios se basa en el método de Chebyshev, que, a través del cálculo matemático, se ha formado la estructura monocapa que recubre el invernadero, que será expuesto en el Capítulo 4 de Metodología y aplicación.

Una optimización del diseño estructural puede permitir un gran ahorro tanto de material como del coste, pero a menudo eso puede dar lugar a soluciones en la que las estructuras actúan cerca de la inestabilidad. Esto ocurre con las cáscaras de rejilla de una sola capa, en la que todos los elementos están dispuestos en una sola superficie. Estos espacios cubiertos por las estructuras monocapa ofrecen una sensación diferente de ligereza y transparencia en comparación con las estructuras convencionales, sin embargo, la rigidez es mucho menor en las cúpulas monocapa que en las estructuras de doble capa y esto conlleva a que los puntos que definen la superficie son susceptibles de sufrir movimientos que modifican la geometría y el comportamiento de la estructura.

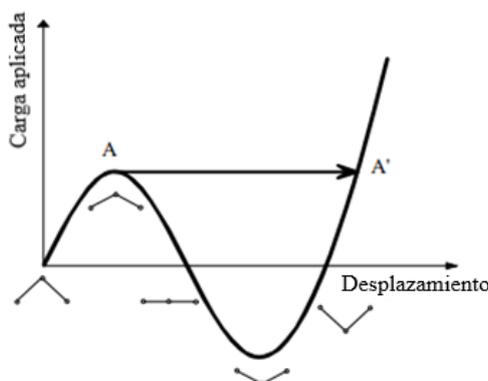
La rigidez de las juntas es un factor clave en el comportamiento de las estructuras de una sola capa [9], cuya flexibilidad a menudo las hace inadecuadas para cubrir grandes distancias. Esta incompatibilidad se ha solucionado mediante una combinación de estructuras dobles, pero en este caso será una sola capa.

El análisis de una cúpula monocapa se inicia con una estructura simple compuesta por dos miembros anclados.



*Figura 3. 2. Estructura simple con dos miembros*

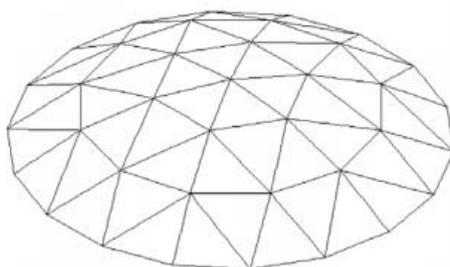
Las cargas que actúan sobre una estructura no disminuyen, por el contrario, una vez que la carga aplicada ha alcanzado un valor máximo, aparece la inestabilidad por rotura. Este comportamiento se explica con la ayuda de la siguiente figura.



*Figura 3. 3. Diagrama Carga aplicada-Desplazamiento*

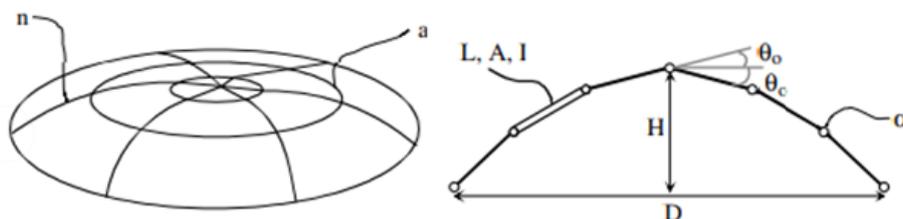
Conforme aumenta el peso en nuestra estructura simple, las barras se desplazan hacia la posición horizontal y nos encontramos en el punto de valor máximo A, donde a partir de este momento aparece la inestabilidad por rotura y como no hay ningún punto de equilibrio cerca de A, el nodo se desplaza hacia A', donde el valor de la carga es igual al valor máximo. Este desplazamiento instantáneo del nodo implica una energía dinámica que puede producir el colapso de la estructura. Por ello, la posición de A es crítica en relación con la estabilidad global de la estructura.

El análisis anterior realizado sobre una estructura simple permite comprender mejor el comportamiento de una cúpula monocapa, como la que se encuentra en la figura.



*Figura 3. 4. Estructura monocapa*

Las dimensiones globales de la estructura anterior son la luz, D, y la altura, H. Los demás parámetros se pueden ver en la siguiente figura.

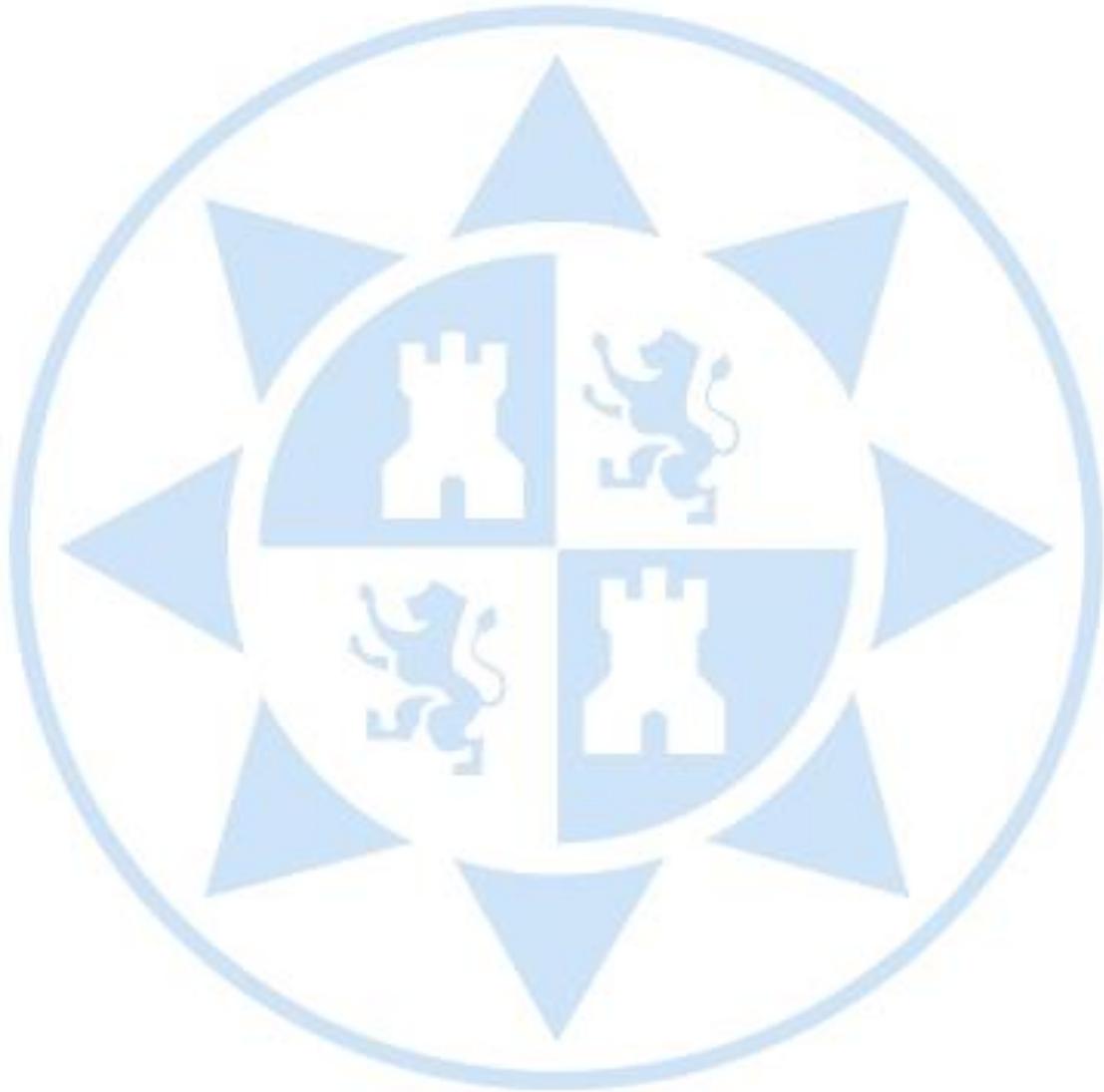


*Figura 3. 5. Cúpula monocapa con los parámetros que definen la estructura*

También encontramos la disposición de los anillos “a” y las líneas meridianas “n”. La estructura se completa por elementos diagonales, todos ellos con la misma longitud de barra, que depende de la posición de los nodos, encontrándonos con una estructura más tupida si la distancia entre nodos es más corta.

Está claro que diferencias en la longitud de los elementos conduce a cambios en el comportamiento de las estructuras monocapa, de hecho, si las barras son muy largas aumentará la flexibilidad de ellas obteniendo una estructura poco rígida.

Estas barras estarán unidas de forma rígida mediante los nodos a mecanizar. La rigidez de la unión requiere un estudio más profundo, ya que afecta de forma significativa al comportamiento de estas estructuras, pero este se basa en el estudio del mecanizado de uno de los nodos, por lo que dejaremos el estudio de rigidez para un futuro proyecto.



## **CAPÍTULO 4: Metodología y aplicación**

Este capítulo va a estar dividido en tres partes, la primera parte se expondrán los cálculos para obtener la malla del invernadero con cada una de las coordenadas de los nodos que unen las barras; la segunda parte las operaciones para calcular los ángulos cenitales y azimutales de cada nodo, que consta de 8 en total, 4 cenitales y 4 azimutales; finalmente, en la tercera parte, se exponen los cálculos matemáticos para mecanizar cada una de las partes de los nodos, puesto que el centro de mecanizado tiene 5 ejes y hay que obtener los ángulos de giro para poder mecanizarlos en la fresa.

## 4.1 Cúpula del invernadero

Para la estructura monocapa basada en las redes de Chebyshev, hemos tenido en cuenta 3 ecuaciones para la superficie, la primera con componente en la coordenada en “x”, la segunda en “y”, y la tercera en “z”.

$$\begin{cases} x = a \cdot u \cdot \cos(v) \cdot \sin(u) \\ y = b \cdot u \cdot \sin(v) \\ z = c \cdot u \cdot \cos(u) \cdot \cos(v) \end{cases} \quad [4.1.1]$$

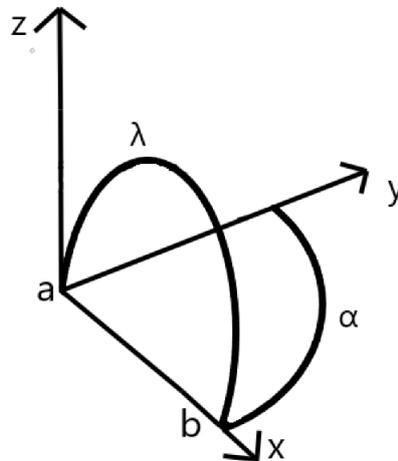
Donde “a”, “b” y “c” son factores de escala. “u” y “v” son valores.

Los cálculos de la cúpula se han hecho adimensional, por ello los factores de escala “a”, “b” y “c” se han tomado como 1 para simplificar. Como por longitud de barra lógicamente no puede ser mayor que uno, se ha tomado la décima parte al factor de escala. A la hora de aplicar “u” y “v”, se toman los siguientes valores: entre

$$u \left\{ \frac{\pi}{2} \rightarrow 0 \right.$$

$$v \left\{ 0 \rightarrow \frac{\pi}{2} \right.$$

Con estas ecuaciones y límites, obtenemos la siguiente figura.



*Figura 4. 1. Curvas de la estructura de la cúpula*

Se puede comprobar que la curva del plano XZ es una semicircunferencia y la curva del plano XY es un cuarto de circunferencia.

Para obtener la línea “ $\alpha$ ” presente en la figura anterior, hay que mantener constante el valor de  $u$  que es igual a  $\frac{\pi}{2}$  e ir variando los valores de  $v$ . Igualando el valor de “ $u$ ” en la ecuación de la cúpula, conseguimos el resultado del punto “ $a$ ” de la línea cuando  $v$  sea igual a 0.

$$\begin{cases} x = a \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \cos(v) = \frac{\pi}{2} \\ y = b \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sin(v) = 0 \\ z = 0 \end{cases}$$

Con  $v = 0$  y variando los valores de “ $u$ ”, obtenemos la siguiente ecuación y la semicircunferencia “ $\lambda$ ”. Con  $u = 0$ , tenemos el punto final, que se sitúa en el eje de coordenadas.

$$\begin{cases} x = a \cdot u \cdot \text{sen}(u) = 0 \\ y = 0 \\ z = c \cdot u \cdot \text{con}(u) = 0 \end{cases}$$

#### 4.1.1 Método de Newton-Raphson

Teniendo calculadas las dos líneas, lo primero que hay que hacer para obtener la red de Chebyshev es dividir estas dos en tramos de igual longitud. A partir de la intersección de las dos líneas, que es el punto “ $b$ ”, se dividen los arcos por la longitud de barra, que como se ha comentado anteriormente es 0,1. Para ello se utiliza Newton-Raphson, donde se da unos valores iniciales para conseguir estos trozos iguales.

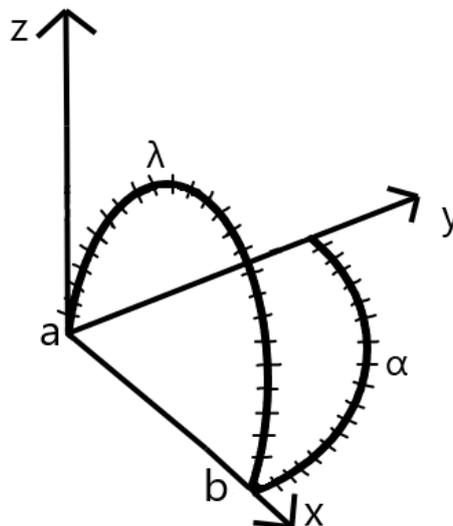


Figura 4. 2. Curvas divididas por la misma longitud de barra

Se parte de un punto inicial que es “ $x_0$ ” y para ese valor se calcula la función de la circunferencia, donde se obtiene el punto “ $y_0$ ”. A continuación, se calcula la tangente, y con la intersección de esta con el eje x, se obtiene un nuevo punto, que será el “ $x_1$ ” y a su vez sacaremos el “ $y_1$ ”. Para explicar este método, se ha adjuntado la figura siguiente.

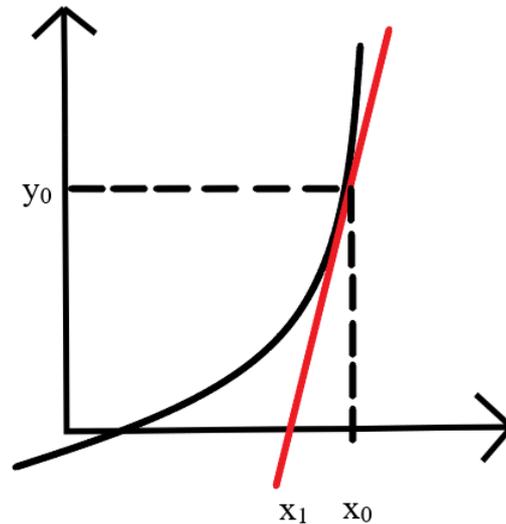


Figura 4. 3. Gráfica para Newton-Raphson

Este proceso se repite hasta obtener un valor en la  $F(y)$  igual a 0. La ecuación de “ $y$ ” es igual a:

$$y(x) - y_0 = y'(x) \cdot (x - x_0) \quad [4.1.2]$$

Como la anterior ecuación de la recta se quiere hacer igual a 0, la “ $x$ ” queda como:

$$x_1 = x_0 - \frac{y_0}{y'(x)}$$

Esta ecuación nos sirve para calcular “ $x_1$ ” o que es lo mismo, el 0 en el eje de las abscisas.

En el caso de una multivariable, como es la función  $F(x,y)$ , hay que hacer el jacobiano para hacer 0.

$$F(x, y) = \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{Bmatrix} - [J(F(x_0, y_0))]^{-1} \cdot F(x_0, y_0) \quad [4.1.3]$$

Siendo el jacobiano:

$$[J(F(x_0, y_0))] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial x} & \frac{\partial F_x}{\partial y} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} & \frac{\partial F_y}{\partial y} \end{bmatrix}_{x_0, y_0}$$

Este se particulariza para “ $x_0$ ” e “ $y_0$ ”,

### 4.1.2 Método de la secante

El método de la secante nos va a servir para dividir las líneas “ $\alpha$ ” y “ $\lambda$ ”, en longitudes barra iguales. El método de la secante tiene la ventaja que no necesita la derivada, por lo que es más sencillo y sobre todo cuando hay una sola variable. Cuando hay varias variables el problema es que no funciona este método.

En el caso de tener una curva, tenemos dos coordenadas en “x”, “ $x_1$ ” anterior a la curva y “ $x_0$ ” posterior a esta, como aparece en la siguiente imagen.

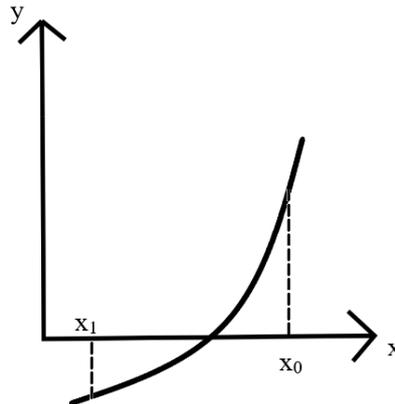


Figura 4. 4. Gráfica para el Método de la secante 1

Con estas dos obtenemos “ $y_0$ ” e “ $y_1$ ”, trazamos la recta entre los dos puntos que cortan con la curva y se calcula la intersección con el eje 0 de abscisas.

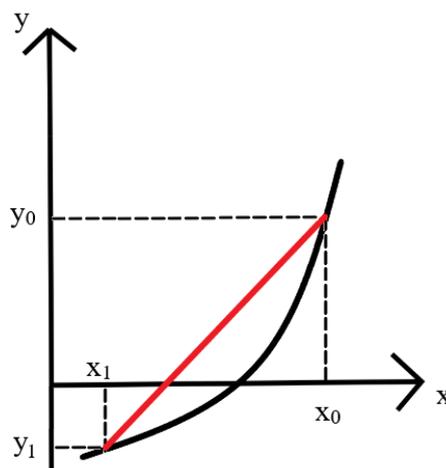


Figura 4. 5. Gráfica para el Método de la secante 2

La ecuación de la recta será.

$$y - y_1 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \cdot (x - x_0) \quad [4.1.4]$$

Lo que buscamos es que la secante sea cero, es decir, el valor de  $x$  para obtener un valor de  $y = 0$ , por lo que igualando a 0 la “ $y$ ”, la ecuación anterior quedaría tal que así.  $\approx$

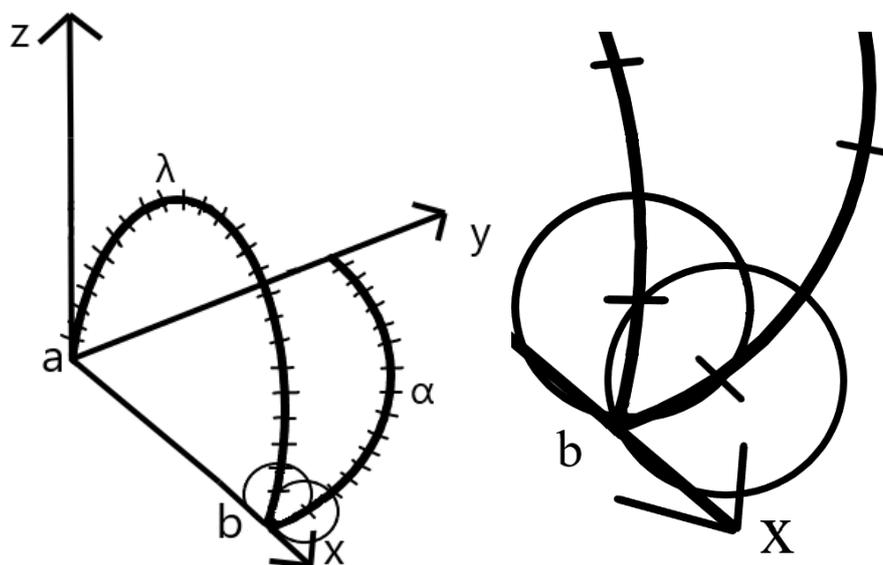
$$x = x_0 - y_1 = \frac{x_1 - x_0}{y_1 - y_0} \quad [4.1.5]$$

Entonces la función “ $y$ ” es la distancia entre dos puntos.

$$y = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} - \rho \quad [4.1.6]$$

Esta forma de calcular los puntos se ha hecho de forma general, por si en vez de ser una circunferencia es una elipse u otra forma.

Este caso se hace tanto para “ $u$ ”, como para “ $v$ ”, obteniendo la división de línea tal y como aparece en la figura (4.2). A partir de estas dos líneas, hacemos todo el resto de la red, con la ecuación de la propia superficie [4.1.1], y con la ecuación de dos esferas con centro en dos puntos consecutivos de cada una de las curvas. Para entenderlo mejor se añade la siguiente imagen.



*Figura 4. 6. Intersección de las esferas*

Ambas esferas tienen el radio de la longitud de la barra. La intersección entre dos esferas es una circunferencia. Con la ecuación de la superficie corta esta intersección en dos puntos y uno de ellos será un punto obtenido anteriormente, en este caso será el punto por el que partimos. Por lo que, para conseguir un cuarto punto, deberemos de coger el nuevo punto obtenido. Con este nuevo punto y el consecutivo a la curva, se saca otro nuevo punto y consecutivamente se saca toda la red de la malla.

La ecuación de la primera esfera es la siguiente.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - \rho^2 = 0 \quad [4.1.7]$$

Y la ecuación de la segunda esfera es.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 - \rho^2 = 0 \quad [4.1.8]$$

Con estas dos ecuaciones conseguimos la circunferencia en la intersección entre las dos. Estas dos ecuaciones de la esfera van en función de “u” y “v”, es decir.

$$F_1 = (x(u, v) - x_0)^2 + (y(u, v) - y_0)^2 + (z(u, v) - z_0)^2 - \rho^2 = 0 \quad [4.1.9]$$

$$F_2 = (x(u, v) - x_1)^2 + (y(u, v) - y_1)^2 + (z(u, v) - z_1)^2 - \rho^2 = 0 \quad [4.1.10]$$

Nos encontramos con dos ecuaciones y dos incógnitas que tiene que ser igual a 0.

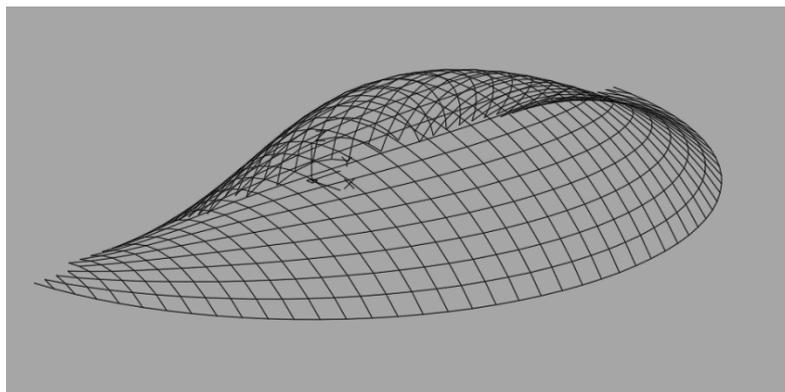
Para conseguirlo debemos de utilizar Newton-Raphson de nuevo, iterando hasta que los valores absolutos de las funciones sean menores que  $10^{-6}$ .

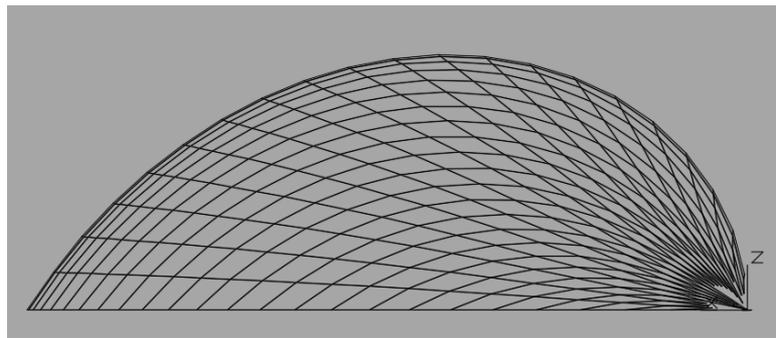
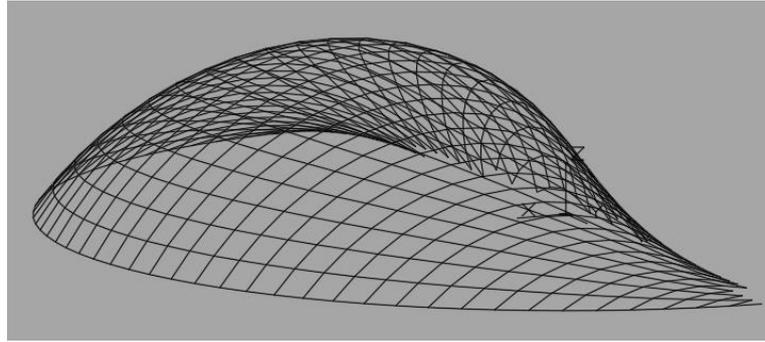
$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial u} & \frac{\partial F_1}{\partial v} \\ \frac{\partial F_2}{\partial u} & \frac{\partial F_2}{\partial v} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_1(u_0, v_0) \\ F_2(u_0, v_0) \end{bmatrix} \quad [4.1.11]$$

Todas estas derivadas se han hecho desde Matlab y se aplican los resultados a un archivo de Excel, expuesto en el Anexo. Gracias a este programa resulta más sencillo el cálculo matemático.

Con todas las ecuaciones expuestas, las dos líneas quedarían divididas por partes iguales, tal y como aparece en la figura (4.6). Para obtener todos los nodos intermedios, se utiliza Newton-Raphson de nuevo.

Cuando obtenemos todos estos puntos, se hace la simetría para obtener una cúpula de forma de concha. Desde Excel obtenemos la función para pasar a AutoCad todos estos puntos unidos por líneas que en este caso serían las barras que mantienen rígida la estructura.



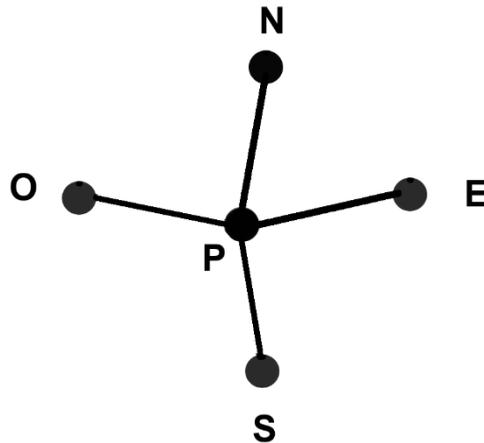


*Figura 4. 7. Cúpula invernadero*

## 4.2 Ángulos cenitales y azimutales de la estructura

Una vez obtenidas todas las coordenadas “x”, “y”, “z” de cada uno de los nodos, por lo que ahora hay que sacar los ángulo cenitales y azimutales de los estos. Tal y como se ha comentado al principio de este capítulo, cada nodo une 4 barras y cada una de ellas tiene un ángulo cenital y otro azimutal, pues cada nodo consta de 4 ángulos cenitales y 4 ángulo azimutales, que serán calculados con un vector normal y un plano de referencia.

Así pues, un nodo está compuesto por 4 barras que a su vez están unidas a otros 4 nodos. Para ello hemos nombrado al nodo central como “P”, y a partir de este nodo “P” se va a sacar sus ángulos cenitales y azimutales de las 4 barras. Además, se ha establecido una nomenclatura para nombrar a los 4 nodos que son unidos mediante las 4 barras al nodo de referencia “P”: nodo “Norte” al nodo superior de “P”, nodo “Sur” al nodo inferior de “P”, nodo “Este” al nodo que queda a la derecha de “P”, y nodo “Oeste” al nodo que queda a la izquierda de “P”, es decir, los puntos cardinales. Cada uno de los nodos es un vector con las coordenadas “x”, “y”, “z”.



*Figura 4. 8. Referencia de los nodos*

### 4.2.1 Ángulos cenitales

El ángulo de elevación tiene aplicación en la ingeniería solar y térmica, por lo que su definición viene dada por la altura angular del Sol medido desde la horizontal, siendo la altitud la altura en metros sobre el nivel del mar de 0° cuando sale el Sol y de 90 grados cuando está directamente encima [10]. Esto ocurre en los equinoccios de primavera y otoño en el ecuador. El ángulo cenital es similar al ángulo de elevación, pero en vez de medirse desde la horizontal se mide desde la vertical, con lo que el ángulo cenital es 90° - la elevación.

El ángulo cenital es el ángulo de la barra con la normal de la superficie.

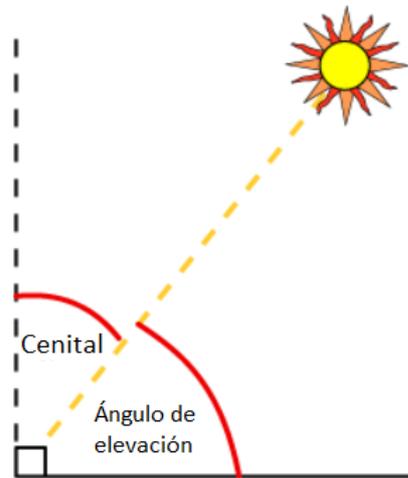


Figura 4. 9. Ángulo cenital y ángulo de elevación

Para poder obtener el ángulo cenital, necesitamos el vector normal, para ello construimos los vectores  $\overline{NS}$  y  $\overline{EO}$ .

$$\overline{NS} = (x_N - x_S, y_N - y_S, z_N - z_S) \quad [4.2.1]$$

$$\overline{EO} = (x_E - x_O, y_E - y_O, z_E - z_O) \quad [4.2.2]$$

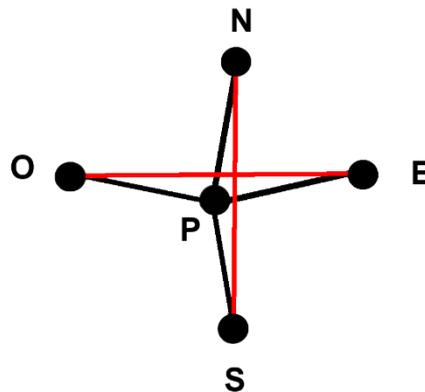


Figura 4. 10. Vector normal entre el nodo de referencia y los nodos cardinales

A continuación, hacemos el producto vectorial y obteniendo a la vez su módulo, podemos obtener el vector normal normalizado, siendo la dirección del eje del cilindro.

$$\overline{NS} \wedge \overline{EO} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_{NS} & y_{NS} & z_{NS} \\ x_{EO} & y_{EO} & z_{EO} \end{vmatrix} \quad [4.2.3]$$

$$|\overline{NS} \wedge \overline{EO}| = \sqrt{(\overline{NS} \wedge \overline{EO}_x)^2 + (\overline{NS} \wedge \overline{EO}_y)^2 + (\overline{NS} \wedge \overline{EO}_z)^2} \quad [4.2.4]$$

$$\vec{n} = \left( \frac{\overline{NS} \wedge \overline{EO}_x}{|\overline{NS} \wedge \overline{EO}|}, \frac{\overline{NS} \wedge \overline{EO}_y}{|\overline{NS} \wedge \overline{EO}|}, \frac{\overline{NS} \wedge \overline{EO}_z}{|\overline{NS} \wedge \overline{EO}|} \right) \quad [4.2.5]$$

Antes de obtener el ángulo, es importante hacer la recta de vectores entre el nodo de referencia “P” y los demás nodos “N”, “S”, “E” y “O” además de su módulo que se utiliza para dividir en la ecuación del ángulo.

$$\overline{PN} = (x_N - x_P, y_N - y_P, z_N - z_P) \quad [4.2.6]$$

$$\overline{PS} = (x_S - x_P, y_S - y_P, z_S - z_P) \quad [4.2.7]$$

$$\overline{PE} = (x_E - x_P, y_E - y_P, z_E - z_P) \quad [4.2.8]$$

$$PO = (x_O - x_P, y_O - y_P, z_O - z_P) \quad [4.2.9]$$

Finalmente, es posible obtener el ángulo cenital que tiene cada barra y que deberá de estar apoyada y a su vez comprimida por el nodo con el mismo ángulo de inclinación. Como se ha comentado antes, los módulos de dichos vectores se sitúan en el denominador y el módulo de n es igual a 1, por lo que sólo se muestra en la fórmula [4.2.10], para presentar la ecuación del ángulo.

$$\alpha_{PN} = \text{Acos} \left( \frac{\overline{PN} * n}{|\overline{PN}| * |n|} \right) \quad [4.2.10]$$

$$\alpha_{PS} = \text{Acos} \left( \frac{\overline{PS} * n}{|\overline{PS}|} \right) \quad [4.2.11]$$

$$\alpha_{PE} = \text{Acos} \left( \frac{\overline{PE} * n}{|\overline{PE}|} \right) \quad [4.2.12]$$

$$\alpha_{PO} = \text{Acos}\left(\frac{\overline{PO} \cdot \vec{n}}{|\overline{PO}|}\right) \quad [4.2.13]$$

El resultado de dichos ángulos dará en radianes, por lo que deberemos de multiplicar cada uno de ellos por  $\frac{180}{\pi}$  para convertirlos en grados.

### 4.2.2 Ángulos azimutales

El ángulo azimutal es el ángulo que se forma desde el norte, medido en el sentido de rotación de las agujas del reloj. Por ejemplo, el ángulo azimut que se halla en el Norte es de  $0^\circ$  y en el Este es de  $90^\circ$ .

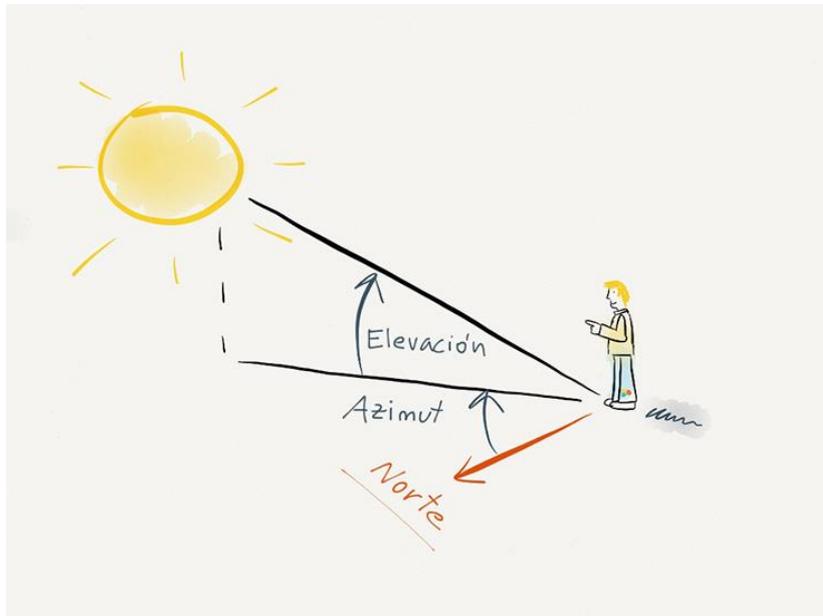


Figura 4. 11. Ángulo azimut

Para obtener los ángulos en los nodos, necesitamos el vector normal calculado anteriormente y sacar un plano de referencia que le hemos llamado “r”, con el que sabremos que ángulo hay entre las barras de cada nodo, es decir, el ángulo azimutal. Este plano se calcula con el producto vectorial del vector normal **y con “j”**.

$$\vec{r} = |\vec{n} \wedge \vec{j}| = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad [4.2.14]$$

Obtenido el plano de referencia, debemos de hacer el producto vectorial de  $\vec{n}$  con las rectas entre el nodo de referencia y los demás nodos unidos a este y sacar a su vez cada uno de los módulos. Hay que mencionar que también debemos sacar el módulo de “r”.

$$\vec{n} \wedge \overrightarrow{PN} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ PN_x & PN_y & PN_z \end{vmatrix} \quad \vec{n} \wedge \overrightarrow{PE} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ PE_x & PE_y & PE_z \end{vmatrix}$$

$$\vec{n} \wedge \overrightarrow{PS} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ PS_x & PS_y & PS_z \end{vmatrix} \quad \vec{n} \wedge \overrightarrow{PO} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ PO_x & PO_y & PO_z \end{vmatrix}$$

[4.2.15]

A partir de aquí ya podemos sacar los ángulos azimutales. Primero voy a exponer el ángulo azimutal “N” y después voy a comentar que hay que hacer con los siguientes ángulos para obtenerlos correctamente. La ecuación para sacar el ángulo entre el plano de referencia y el nodo “Norte” es:

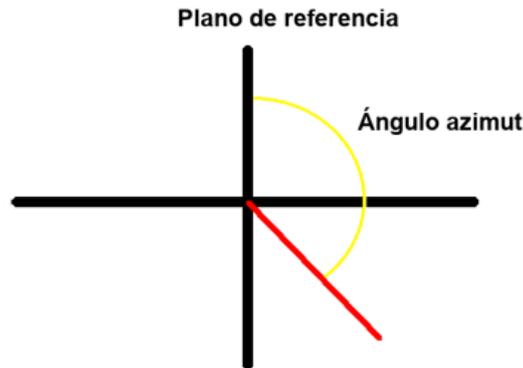
$$\gamma_N = \text{Acos} \frac{(\vec{n} \wedge \overrightarrow{PN}) * r}{|\vec{n} \wedge \overrightarrow{PN}| * |r|} \quad [4.2.16]$$

A partir de este ángulo podemos sacar los demás relativamente, es decir, el ángulo “ $\gamma_E$ ” lo haremos de la misma forma, pero sumándole el ángulo “ $\gamma_N$ ”, ya que al hacer el arccoseno de “N” simplemente, sólo estamos hallando el ángulo entre el plano de referencia y “N”, por lo que si hacemos solo “ $\gamma_E$ ” obtendremos un ángulo azimut que no corresponde al del plano de referencia y al “Este”. Debemos de sumarle el ángulo “ $\gamma_N$ ” para que sea el correcto. Con los demás ángulos haremos lo mismo sucesivamente.

$$\gamma_E = \gamma_N + \text{Acos} \frac{(\vec{n} \wedge \overrightarrow{PE}) * r}{|\vec{n} \wedge \overrightarrow{PE}| * |r|} \quad [4.2.17]$$

$$\gamma_S = \gamma_E + A \cos \frac{(\vec{n} \wedge \overrightarrow{PS}) * r}{|\vec{n} \wedge \overrightarrow{PS}| * |r|} \quad [4.2.18]$$

$$\gamma_O = \gamma_S + A \cos \frac{(\vec{n} \wedge \overrightarrow{PO}) * r}{|\vec{n} \wedge \overrightarrow{PO}| * |r|} \quad [4.2.19]$$



*Figura 4. 12. Ángulo azimut respecto al plano de referencia*

Ahora bien, todos estos cálculos nos sirven para saber en qué posición va a estar cada nodo y por ello cada una de las barras en la cúpula, pero en el centro de mecanizado estos ángulos no sirven y hay que obtener los ángulos para el mecanizado dentro de la máquina herramienta.

### 4.3 Ángulos del mecanizado

En este apartado hallaremos los ángulos que introduciremos en las líneas del código numérico, calculando los planos para que la herramienta entre perpendicularmente a estos.

Los ángulos son iguales en las dos partes, pero girados 180. A continuación, se comentan en los siguientes dos apartados, todos los planos con las matrices de rotación para obtener dichos ángulos.

### 4.3.1 Nodo inferior

Nos situamos primeramente en la parte inferior, puesto que los cálculos de los ángulos para este nodo son muy similares a los calculados en el apartado 4.2 y que nos pueden servir para nuestra pieza inferior.

Para ello necesitamos de nuevo las posiciones de los nodos, tanto el de referencia “P” como el “N”, “S”, “E” y “O” con las ecuaciones [4.2.(6-7-8-9)] para hallar el vector normalizado con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} n &= \frac{(\overrightarrow{PN})}{|\overrightarrow{PN}|} & s &= \frac{(\overrightarrow{PS})}{|\overrightarrow{PS}|} \\ e &= \frac{(\overrightarrow{PE})}{|\overrightarrow{PE}|} & o &= \frac{(\overrightarrow{PO})}{|\overrightarrow{PO}|} \end{aligned} \quad [4.3.1]$$

Siendo n el vector normalizado del nodo “N”; s vector normalizado de “S”; e vector normalizado de “E”; o vector normalizado de “O”.

La ecuación [4.2.5] también es necesaria para obtener el vector normal normalizado ( $\overrightarrow{NormN}$ ).

Haciendo el producto vectorial de estas dos ecuaciones calculamos el vector que es perpendicular al vector de los puntos cardinales normalizados (n, s, e, o) y a la normal.

$$\overrightarrow{n1} = | n \wedge \overrightarrow{NormN} | = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ NormN_x & NormN_y & NormN_z \end{vmatrix} \quad [4.3.2]$$

Con esta última ecuación y con los vectores normalizados de los puntos cardinales, saco los vectores normales a la superficie con el producto vectorial.

$$\overrightarrow{nn} = | n \wedge \overrightarrow{n1} | = \begin{vmatrix} i & j & k \\ n_x & n_y & n_z \\ n1_x & n2_y & n3_z \end{vmatrix} \quad [4.3.3]$$

Con estos últimos vectores ya podríamos sacar los ángulos cenitales y azimutales, pero antes hay hacer coincidir el vector normal con el eje “Z” y esas rotaciones hay que aplicarlas a todas las barras, es decir, a todas las normales a la superficie normalizadas.

Al vector normal (NormN) le quitamos la componente en “X” y en “Y” y hacerlo coincidir con “Z”, por último, calcular las rotaciones que hay que dar para conseguir cada uno de los ángulos de cada nodo.

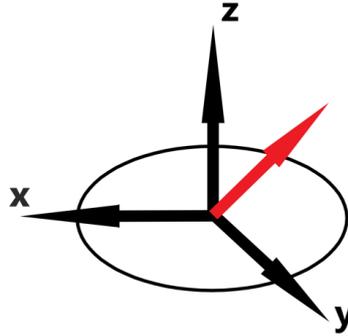


Figura 4. 13. Vector Normal en el espacio

Calculamos primero el giro en C, que sería el giro respecto del eje “Z” de la máquina herramienta. Con la función “atan2” de Excel y con la componente en “X” y en “Y” del vector normal, calculamos el giro al que habría que llevar el vector al plano “XZ”, pero nos interesa que el vector nos dé en negativo para que, al hacer el giro en B, en el eje “Z” sea igual a 1. Por lo que se nos queda esta ecuación en Excel.

$$C = \text{PI}() - \text{ATAN2}(\text{Norm}N_x, \text{Norm}N_y) \quad [4.3.4]$$

Esto nos da una rotación alrededor de “Z”

$$\text{Rot}_Z = \begin{vmatrix} \cos(C) & -\text{sen}(C) & 0 \\ \text{sen}(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad [4.3.5]$$

Para poder comprobar que el vector obtenido está en el eje “XZ”, se multiplica la rotación anterior por el vector normal y obtenemos el resultado que se muestra a continuación, siendo 0 en la coordenada del eje y.

$$\text{Comprobación 1} = \begin{vmatrix} \cos(C) & -\text{sen}(C) & 0 \\ \text{sen}(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \text{Norm}N_x \\ \text{Norm}N_y \\ \text{Norm}N_z \end{vmatrix} \quad [4.3.6]$$

Giramos en sentido antihorario para que la coordenada x de negativo, para luego girar en positivo. En el caso del ángulo B, que es el giro respecto al eje x en el centro de mecanizado, se hace similar, pero esta vez en el atan2 utilizamos la componente en Z y en X del vector obtenido de la primera comprobación, esto hará que Z sea igual a 1 y que se convierta en la vertical. Se le resta 90 grados para obtener el ángulo B.

$$B = \text{ATAN2}(\text{Comp}1_x, \text{Comp}1_z) - \text{Pi}()/2 \quad [4.3.7]$$

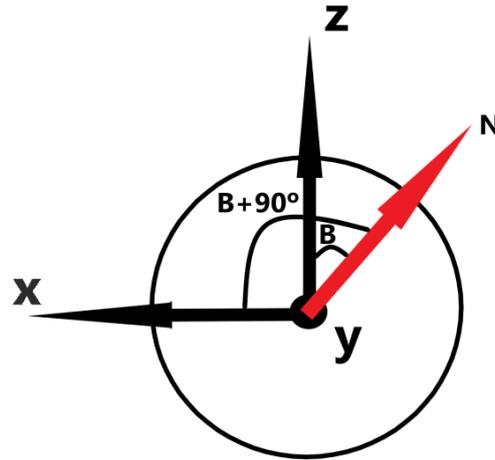


Figura 4. 14. Vector Normal girado al plano XZ

Para hacer la segunda comprobación, calculamos la matriz de rotación alrededor del eje Y.

$$\text{Rot}_Y = \begin{vmatrix} \cos(B) & 0 & -\text{sen}(B) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(B) & 0 & \cos(B) \end{vmatrix} \quad [4.3.8]$$

Con el producto de la anterior rotación y la Comprobación 1, obtenemos la segunda rotación, siendo el resultado de la coordenada Z = 1 y las coordenadas X e Y son 0.

$$\text{Comprobación 2} = \begin{vmatrix} \cos(B) & 0 & -\text{sen}(B) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(B) & 0 & \cos(B) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \text{Comp}_x \\ \text{Comp}_y \\ \text{Comp}_z \end{vmatrix} \quad [4.3.9]$$

La matriz de rotación compuesta sería el producto de las dos matrices de rotación.

$$\text{Rot Comp} = \begin{vmatrix} \cos(B) & 0 & -\text{sen}(B) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(B) & 0 & \cos(B) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \cos(C) & -\text{sen}(C) & 0 \\ \text{sen}(C) & \cos(C) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad [4.3.10]$$

Ahora sí, con la matriz de rotación compuesta y la ecuación [4.3.3] de los vectores normales a la superficie, se sacan los vectores normalizados en el plano XY con una coordenada en Z que tiende a 1. Se pone el signo menos para que Z salga hacia arriba.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{nn'} &= -\overrightarrow{nn} \cdot \text{Rot Comp} \\ \overrightarrow{ns'} &= -\overrightarrow{ns} \cdot \text{Rot Comp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overrightarrow{ne'} &= -\overrightarrow{ne} \cdot \text{Rot Comp} \\ \overrightarrow{no'} &= -\overrightarrow{no} \cdot \text{Rot Comp}\end{aligned}\quad [4.3.11]$$

Los vectores calculados son vectores normalizados normales a la superficie con un módulo de valor de 1. Cada uno de ellos aparece en cuadrantes diferentes. Los vectores obtenidos son los rotados tomando la referencia de la máquina.

Para obtener el ángulo de giro que necesita hacer la fresadora en cada uno de los nodos, utilizamos dos funciones del Excel:

- Ángulo C:
 
$$-\text{ATAN2}(nn'_x, nn'_y) \quad [4.3.12]$$

- Ángulo B:
 
$$-\text{ATAN}\left(\left(nn'_x^2 + nn'_y^2\right)^{\frac{0.5}{nn'_z}}\right) \quad [4.3.13]$$

Estas funciones se calculan para cada uno de los nodos, obteniendo el ángulo que debe girar el plato de garras del centro de mecanizado para que la herramienta entre perpendicularmente a la pieza y mecanice con el ángulo correcto para poder conectar los nodos entre ellos mismos.

### 4.3.2 Nodo superior

Obtenidos todos los planos y los ángulos de la parte inferior del nodo, podemos calcular fácilmente los planos para la parte superior, puesto que es una pieza dual, es decir que los planos entre nodos son paralelos. Mientras que el nodo inferior es una pieza divergente, la pieza del nodo superior es convergente, pues los planos están dirigidos hacia el eje de nuestra pieza.

Para conseguir las direcciones de las facetas, basta con dar un giro de 180 grados en el eje "Y" y posteriormente cambiar el sentido a los vectores. El vector tiene la misma dirección y magnitud, pero cuentan con sentidos contrarios.

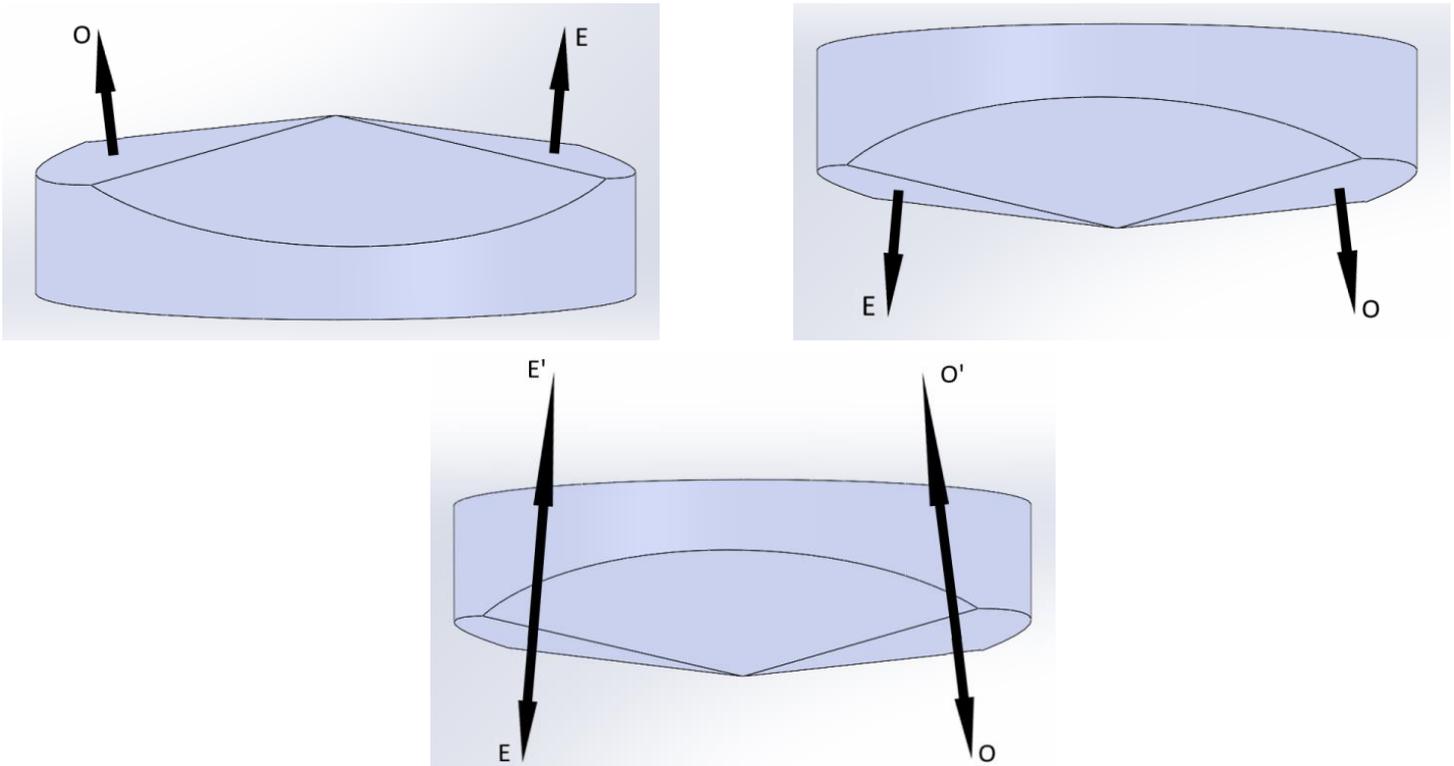


Figura 4. 15. Vectores del nodo inferior girados respecto al eje Y con cambio de sentido

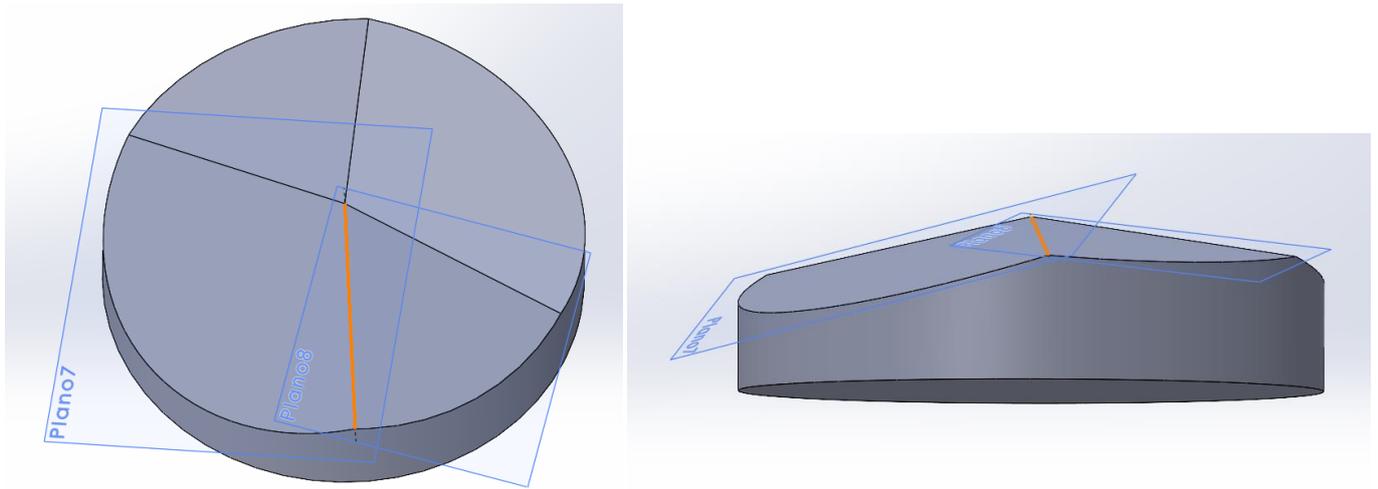
Al girar el nodo, los únicos vectores de la parte superior serán los mismos, pero con el componente en Y cambiado. Con el vector de posición P y los vectores de las coordenadas nos dan las ecuaciones del plano una vez transformados todos los componentes. Si mecanizamos directamente con estos planos obtenemos una pirámide inversa, siendo la cúspide el punto de referencia P. La ecuación del plano en este caso es:

$$n_x \cdot x + n_y \cdot y + n_z \cdot z = n_x \cdot P_x + n_y \cdot P_y + n_z \cdot P_z \quad [4.3.13]$$

Con la intersección entre planos, obtenemos la ecuación de la recta, por ejemplo, para sacar la ecuación de la recta Este-Norte, necesitamos el siguiente vector:  $\vec{v}_{en}$

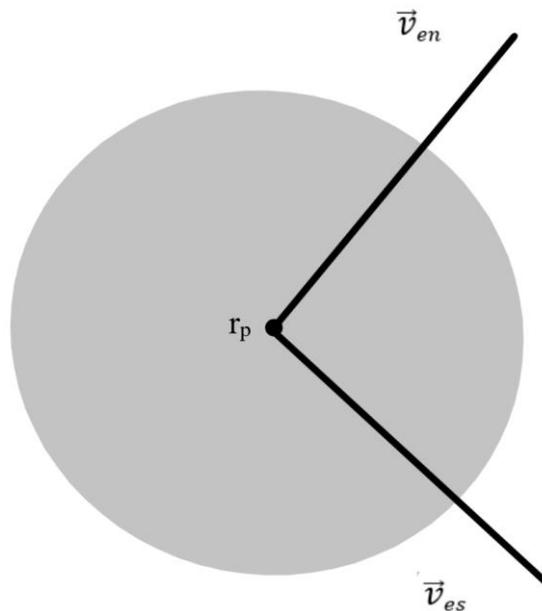
$$\vec{v}_{en} = \frac{n_e \wedge n_n}{|n_e \wedge n_n|} \quad [4.3.14]$$

Al dividirlo por el módulo pasa a ser normalizado.



*Figura 4. 16. Intersección entre planos*

La ecuación [4.3.14] se hace para sacar las otras 3 rectas, siendo la división de cada una de las caras a mecanizar por la fresadora, pero hay que tomar unas distancias de seguridad para no comer parte de las otras caras y que el resultado no sea el adecuado. Para ello hay que sacar tres puntos, el primero ( $r_0'$ ) será donde se sitúa la herramienta con la distancia de seguridad para empezar a mecanizar; el segundo ( $r_0''$ ) cuando la herramienta ha entrado al tocho y ha mecanizado la mitad de la cara del nodo; el tercero ( $r_0'''$ ) para situarse con la distancia de seguridad después de haber mecanizado la segunda parte del nodo. La forma que hará la herramienta al mecanizar será la de un triángulo.



*Figura 4. 17. Rectas entre el Plano de la cara Este*

- Punto  $r_1'$ :

Los tres puntos se calculan prácticamente igual, pero con sus vectores correspondientes. Para calcular los puntos se necesita el vector de referencia, un parámetro donde se toma la distancia de seguridad y el vector de una de las rectas más cercano donde se empieza a mecanizar. Para el punto  $r_1$ , se utiliza el vector de la recta que interseca con el mismo plano, siendo los demás parámetros los mismos.

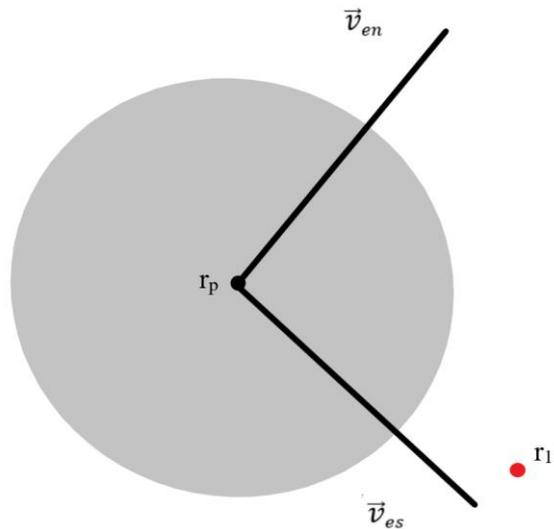
$$r_0 = r_p + \left(\frac{d_w}{2} + d_s + \frac{d_t}{2}\right) \cdot \vec{v}_{es} + \frac{d_t}{2} \cdot (\vec{v}_{es} \wedge \vec{n}\vec{e}) \quad [4.3.14]$$

Siendo  $d_w$  el diámetro del tocho;  $d_s$ , la distancia de seguridad de 8 mm para todos los puntos;  $d_t$ , el diámetro de la herramienta.

La última suma de la ecuación sirve para desplazar el punto perpendicularmente a  $\vec{v}_{es}$ , a una distancia del radio de la herramienta, para que el mecanizado sea tangente a dicha recta y al mismo tiempo, no comer parte de una de las demás caras.

Para obtener la recta que pasa por el punto y que es paralela a  $\vec{v}_{es}$ , calculamos:

$$\vec{v}_0 = r_0 + \lambda_0 \cdot \vec{v}_{es} \quad [4.3.15]$$



*Figura 4. 18. Posición del punto  $r_1'$*

- Punto  $r_1''$ :

Este punto es similar al anterior, se utilizan las coordenadas referidas a este para calcular la salida y la recta por donde pasará la herramienta para mecanizar la segunda parte del tocho.

$$r_1 = r_p + \left(\frac{d_w}{2} + d_s + \frac{d_t}{2}\right) \cdot \vec{v}_{en} + \frac{d_t}{2} \cdot (\vec{v}_{en} \wedge \vec{n}\vec{e}) \quad [4.3.16]$$

$$\vec{v}_1 = r_p + \lambda_1 \cdot \vec{v}_{en} \quad [4.3.17]$$

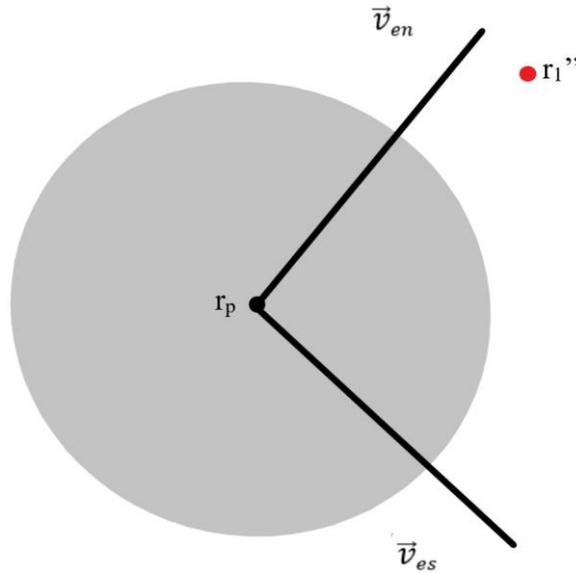


Figura 4. 19. Posición del punto  $r_1''$

- Punto  $r_1'''$ :

Nos situamos en el punto central para mecanizar una de las caras del nodo superior, con la diferencia al resto de los puntos de que este se encuentra situado dentro de la pieza. La herramienta pasará por este punto una vez situada en  $r_1'$ , a continuación, saldrá de la pieza llegando a  $r_1''$ . Este punto lo he dejado para el final puesto que se calcula con la intersección de las rectas  $\vec{v}_{en}$  y  $\vec{v}_{es}$ . Para calcular la intersección

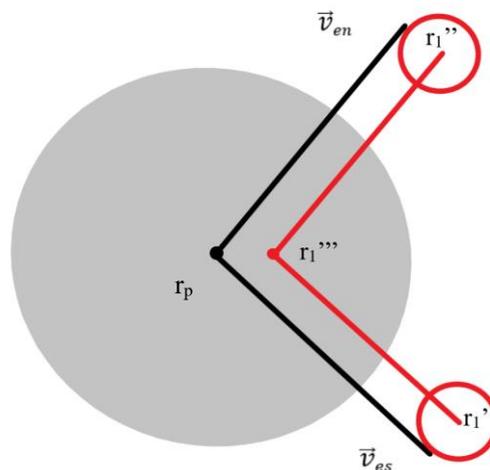


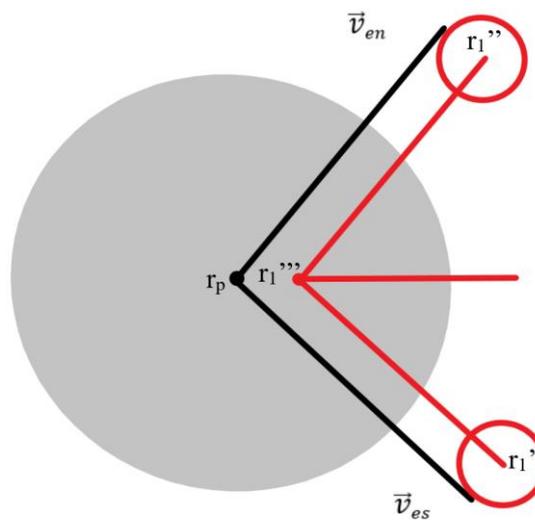
Figura 4. 20. Posición del punto  $r_1'''$  y pasada que sigue la herramienta

Durante las pruebas del mecanizado del nodo superior, en todas las caras se queda una rebaba en la parte externa de la pieza, con un espesor de 3 mm aproximadamente, pues la herramienta no es lo suficientemente grande como para mecanizar toda la cara con el paso tangente a la recta entre planos.



*Figura 4. 21. Nodo superior con imperfecciones*

Esta imperfección imposibilita el cierre completo y correcto de los nodos, por lo que no obtendremos una buena rigidez y presión hacia los perfiles y el nodo inferior. Para ello, se hace se le hace una última pasada por el centro del extremo, hasta  $r_1'''$ , obteniendo el desbaste total de la cara, dejando la cara perfectamente plana y con su debido ángulo.



*Figura 4. 22. Colocación y pasada de la herramienta del plano Este*

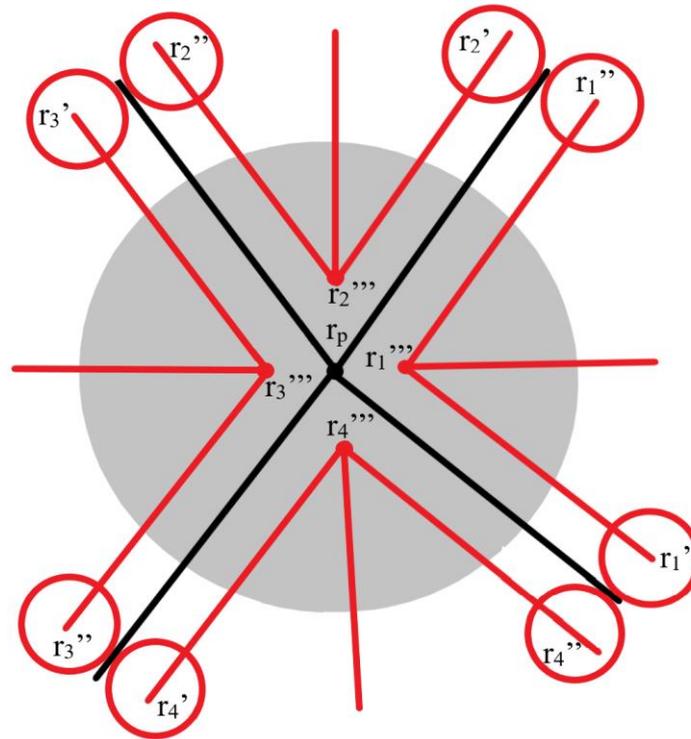


Figura 4. 23. Colocación y pasada de la herramienta de todas las caras

Para la parte de mecanizado, la máquina no puede situarse en los puntos de r2 y r4, porque no está implementado el giro alrededor del eje “x”. Para que sea posible la fabricación, se hace una serie de rotaciones para que todas las facetas se mecanicen desde el mismo lado. Las siguientes figuras están realizadas por una gráfica que se ha sacado desde los cálculos de Excel. La primera muestra la trayectoria de los cálculos aportados en este documento y la segunda, la trayectoria que hará la máquina herramienta a la hora del mecanizado.

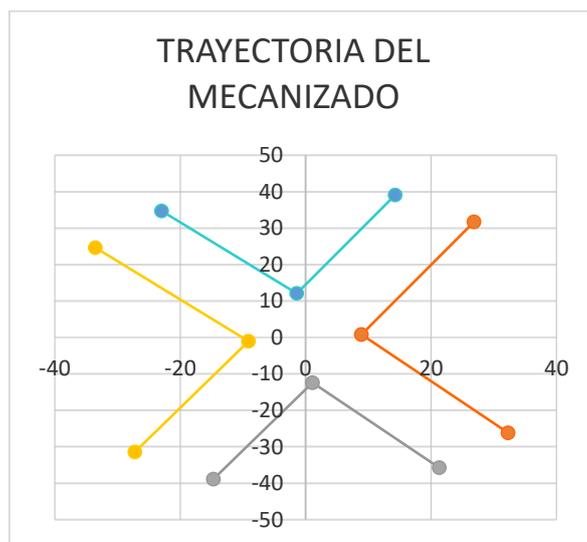


Figura 4. 24. Trayectoria del mecanizado

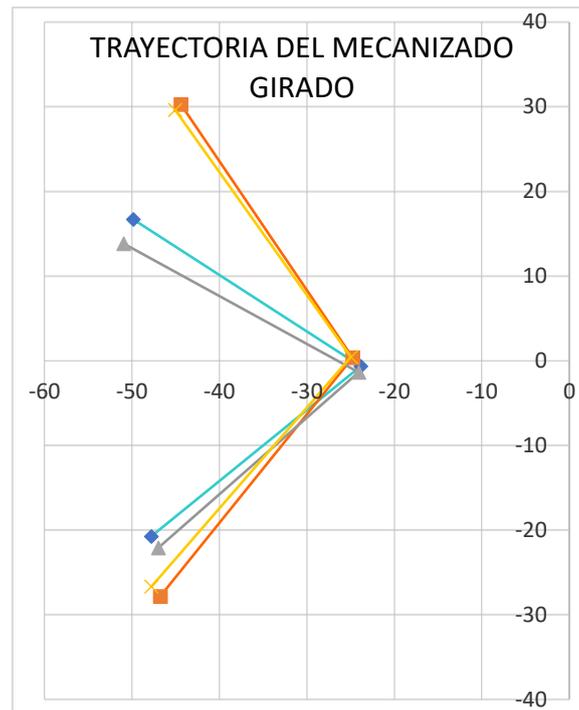
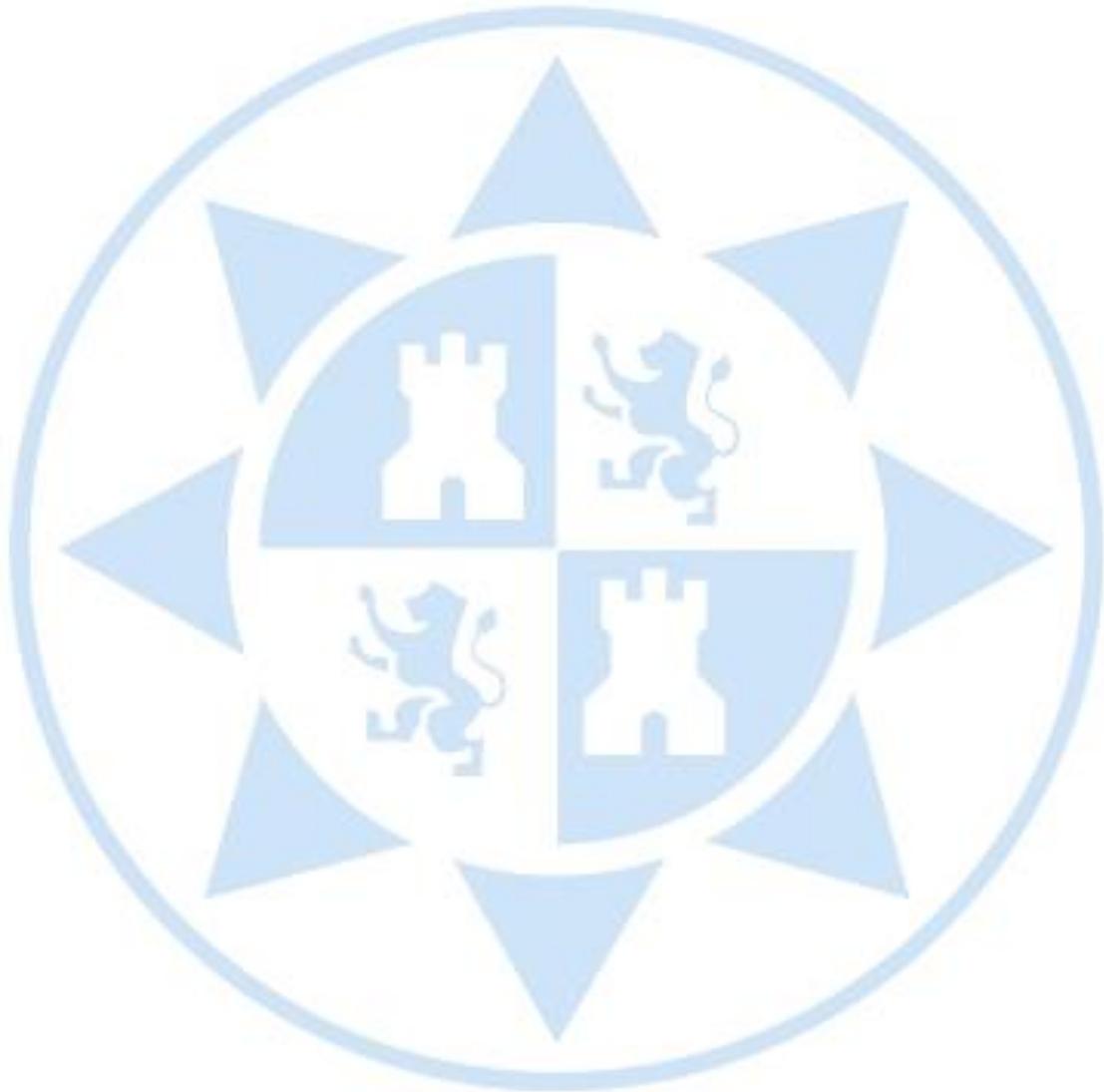


Figura 4. 2. Trayectoria del mecanizado girados

En cuanto a los ángulos de las facetas, salen muy pequeños, en torno a 2 y 4 °, pero son los grados que nos va a dar estabilidad a la estructura, si ponemos menos barras o las mismas, pero más largas, los ángulos serán más pronunciados. Conforme aumente la estructura y al mismo tiempo, tengamos los nodos más espaciados, también aumentará los grados de las caras planas.

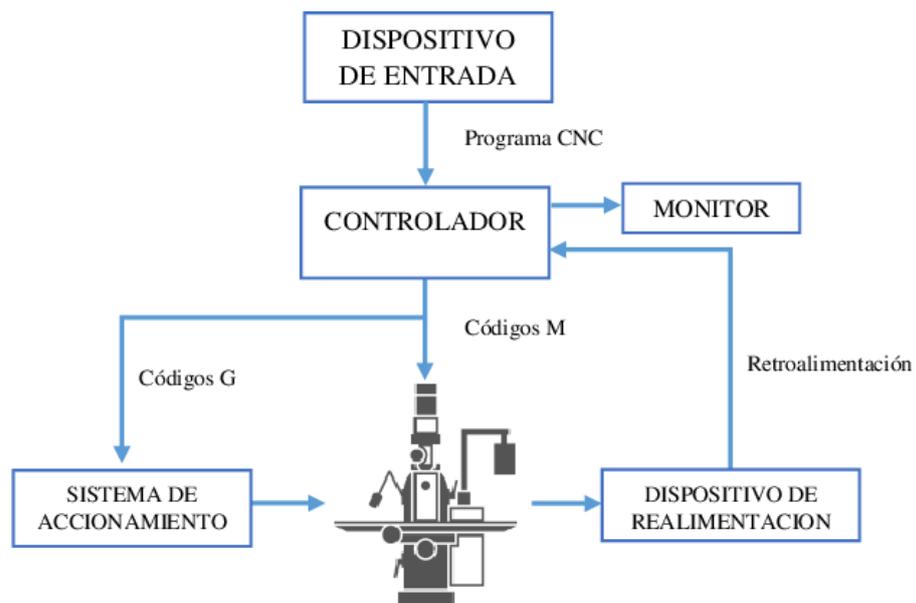
Todos estos cálculos se han hecho desde Excel, aplicando todas las formas necesarias para facilitar y aligerar el cálculo, pues en total hay 613 nodos por 4 barras cada uno y 2 ángulos cada una de las barras, o más bien, 8 ángulos por cada nodo, esto hace un total de 4.904 ángulos. Al principio, utilizar este programa es algo tedioso, por tener que establecer cada una de las fórmulas, pero posteriormente, ya sea utilizando macros, con Visual Basic o manualmente, obtenemos directamente cada uno de los ángulos cenitales y azimutales de cada nodo. El cálculo completo de uno de los nodos se expone en el Anexo N° 3.



# **CAPÍTULO 5: Control numérico por computadora**

El control numérico por computadora o comúnmente conocido como CNC, es un sistema de automatización que permite controlar y monitorear los movimientos de un elemento físico, como es la de una herramienta montada en una máquina. Para ello, la máquina está dotada de una computadora con un software integrado que hace posible los movimientos y la mecanización de piezas que con otro tipo de procesos sería imposible de fabricar, al menos con tanta precisión y detalle. El control numérico se encuentra en fresadoras, tornos, rectificadoras, máquinas de corte por diferentes métodos, prensas y demás.

Una máquina con control numérico consiste en seis elementos principales, que se exponen en el siguiente diagrama de bloques:



*Figura 5. 1. Diagrama de bloques de una máquina con control numérico*

En la figura se observa que el programa CNC creado desde el ordenador, es agregado al controlador, y, mediante códigos G y códigos M, el software convierte esas instrucciones en señales eléctricas capaces de poner en marcha el sistema de accionamiento moviendo los ejes y la herramienta para poder mecanizar la pieza deseada.

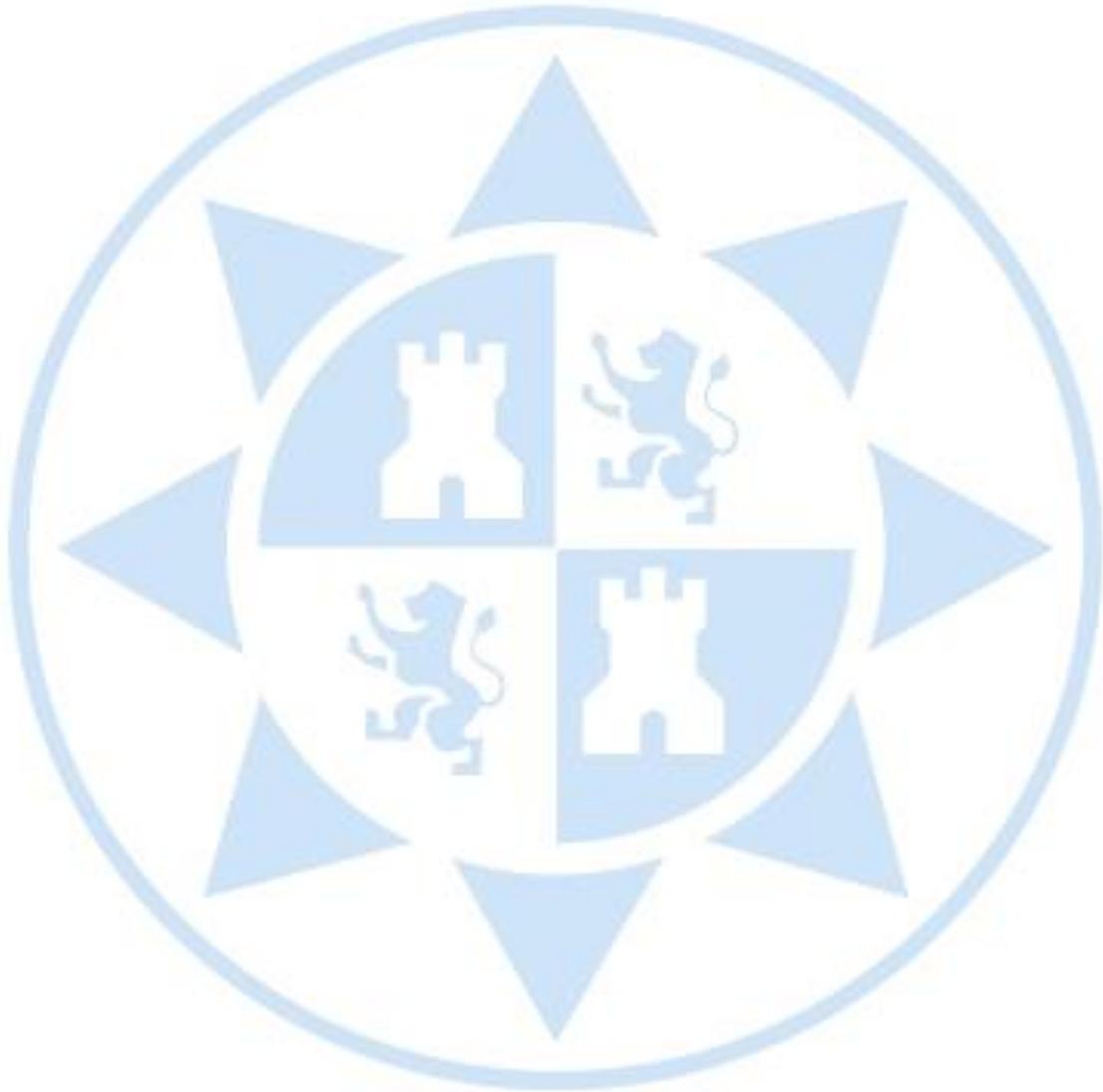
El movimiento de los ejes puede realizarse de dos maneras distintas, que pueden funcionar combinadas o individualmente.

- G90 (Programación en valores absolutos), siendo una función que sirve para indicarle al control que queremos programar con cotas absolutas, es decir, definiremos el punto al cual queremos llevar la herramienta, siendo las coordenadas del punto de destino referidas al origen de coordenadas.
- G91 (Programación en valores incrementales), sirve para mover la herramienta a un punto tomando de referencia el punto actual de dicha herramienta, de otra forma, hay que pensar cuando queremos desplazar la herramienta en los distintos ejes para alcanzar la cota deseada.

Estas funciones serán fundamentales para la creación de nuestra pieza, que estarán en nuestro programa CNC y estarán acompañadas de multitud de instrucciones que será ejecutadas por la máquina. El programa CNC está compuesto por instrucciones Generales (código G) e instrucciones Misceláneas (Código M), de ahí el nombre del lenguaje con el que está escrito el programa, denominado G y M. El programa está dividido en bloques, encabezados por la letra N y numerados de 1 hasta el número de bloques del programa. El código G no se puede utilizar en el mismo bloque, pues los códigos G se reemplazan entre sí, es por lo que este tipo de código se utiliza para determinar el tipo de movimiento como, por ejemplo, los movimientos rápidos, ciclos, pausas, avances, etc. El código M son las funciones que no corresponden a los movimientos de la máquina, cómo arranque, cambio de herramienta, detención del programa y más. Por ello pueden aparecer varias funciones M en el mismo bloque. Pero no solo nos encontramos con estas dos letras dentro del programa, si no que existen también otras variables con funciones específicas, siendo estas por ejemplo la S que es la velocidad del husillo, la F que es la velocidad del avance, la T que es el tipo de herramienta seleccionada y más que estarían integradas en ciclos, que en nuestro caso no vamos a utilizar.

El código contiene 1390 líneas, para la parte inferior, pudiéndose dividir en 4 secciones y de 590 líneas para la superior con otras 4 secciones. Cada una de las secciones es un ángulo cenital y otro azimut, mecanizándose al mismo tiempo los dos.

En el Anexo N° 4, estará expuesto el programa de control numérico que va a hacer posible el mecanizado de nuestros nodos para conseguir la estructura del invernadero.



## CAPÍTULO 6: Diseño 3D

En el presente apartado se va a comentar el programa que he utilizado para crear el diseño final de la pieza superior e inferior y los prototipos que han sido diseñados, desde el primero al último.

El programa que se ha utilizado para desarrollar las piezas es el SolidWorks, pues este programa es un software de diseño CAD 3D, el cual el significado de sus siglas es “Diseño asistido por computadora”, que sirve para modelar piezas, hacer planos técnicos en 2D, ensamblar piezas en 3D y tiene funciones para hacer simulaciones de esfuerzos para probar el rendimiento del producto en circunstancias reales. SolidWorks es reconocida por su facilidad, cuenta con un completo conjunto de herramientas para crear, publicar, simular, administrar datos, gestionar proyectos y procesos, todo ello funcionando junto permitiendo a organizadores diseñar mejores productos, que lleva a la solución de acelerar el proceso ahorrando dinero y tiempo.

En SolidWorks hay 4 pasos muy importantes, siendo el primero la parte de diseño en 2D, con la creación de un croquis donde se dibujará en el plano de trabajo el diseño de la pieza deseado, mediante las herramientas de croquizado (línea, rectángulo, círculo, etc.), herramientas de acotación, relaciones geométricas como otras. Dentro del segundo paso estarían las operaciones, donde nos encontramos la revolución, redondeo, extrusión, chaflán y demás donde el croquis en 2D pasa a ser un modelado en 3D. El tercer paso es el ensamblaje, que con la creación de demás piezas pueden juntarse todas ellas en una sola, usando las relaciones geométricas de posición. Posteriormente se puede hacer un análisis y un estudio con la finalidad de detectar fallos o interferencias entre los componentes, evitando diseños inadecuados. Por último, podemos pasar al módulo dibujo para representar la pieza o el ensamblaje con un plano con diferentes vistas.

Dado que los nodos deben ser fabricados con una barra cilíndrica de acero de 50 mm de diámetro, el diseño está basado a partir de estas barras longitudinales cilíndricas de  $x$  metros, que son aportadas por la universidad y que hablaremos más tarde en el apartado de mecanizado.

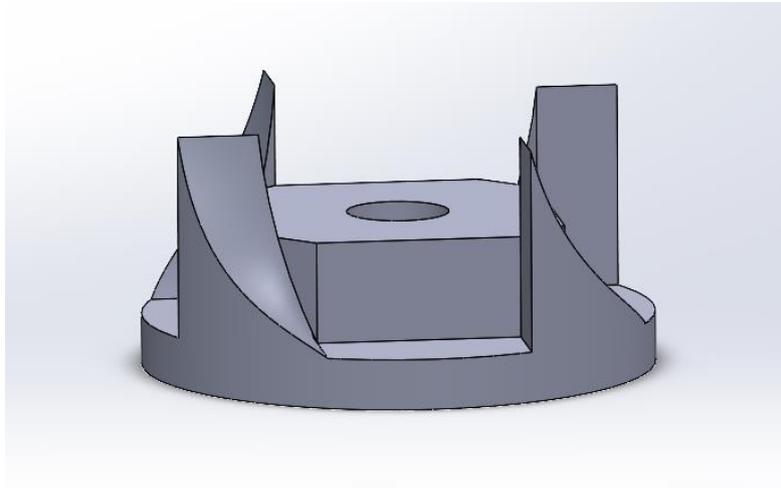
Así pues, vamos a pasar al diseño de nuestra pieza, para conseguir que sea una estructura rígida y que sea capaz de soportar esfuerzos sin que llegue a deformarse, los nodos estarán divididos en dos partes, superior e inferior, que irán unidas mediante un tornillo y una tuerca, presionando cada una de las 4 barras del nodo. Las barras unidas a los nudos son perfiles en “L” de acero de 20x20x1,5 mm, que al igual que las barras hablaremos en la parte de mecanizado.

El primer pensamiento para el diseño del nodo, fue dibujar una circunferencia a mano alzada y proyectar desde la planta los cuatro perfiles como si fuera una “Rosa de los vientos”, es decir, generando cuatro ángulos a 90 grados y totalmente paralelas a la horizontal, sin ningún ángulo cenital. A continuación, dibujé el alzado y una perspectiva axonométrica del nodo.

Para el primer prototipo de la parte inferior se pensó en cuatro dientes que voy a llamar “paletas”, acompañados de un agujero pasante en el centro de 10 mm de diámetro.

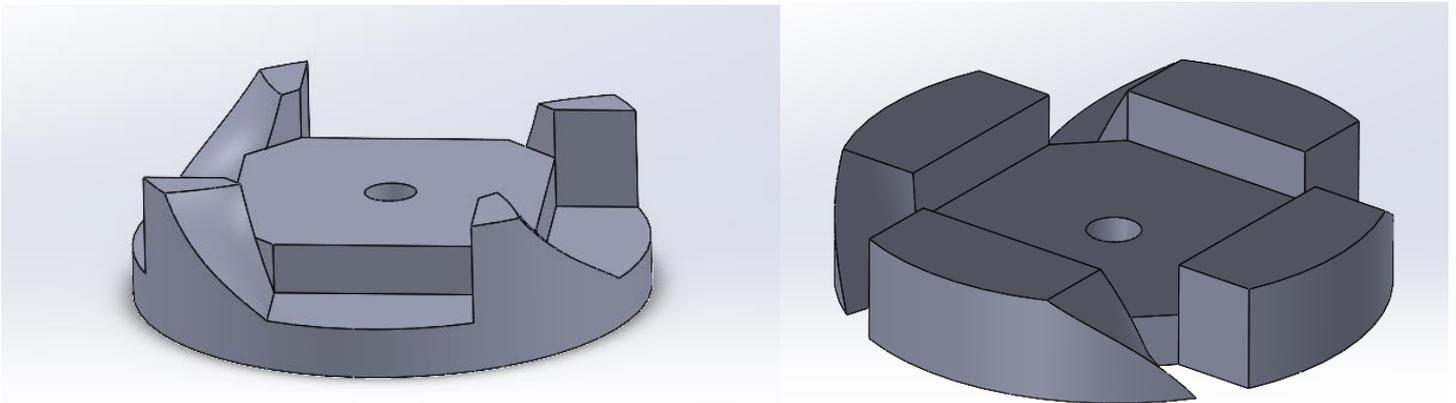
Estas paletas tendrían una longitud de 20mm, igual que los perfiles, y un asiento de 5mm para sujetar las cuatro paletas y hacer la pieza aún más rígida.

Los perfiles irán apoyados en las superficies rectas de la pieza, comprimidos junto a la parte superior, siendo una pieza dual de la parte inferior.

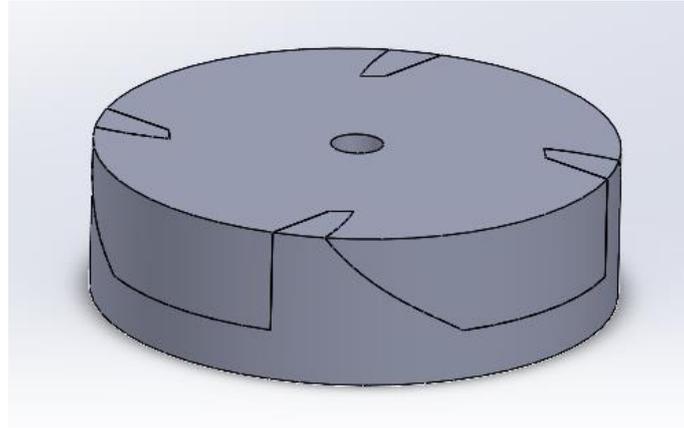


*Figura 6. 1. Primer prototipo del nodo inferior: "Paletas"*

El diseño encaja a la perfección con la pieza que queremos fabricar, pero hay un problema con este tipo de paletas, y es que son demasiado delgadas y altas, con un simple golpe se pueden partir fácilmente, por no hablar que será dificultosa su mecanización, sobre todo por la programación, por lo que decidí recortar estas paletas y dejarlas en tipo de "muelas", haciendo las dos piezas más pequeñas todavía, ahorrando material y tiempo de fabricación. El ensamblaje de la pieza quedaría de esta forma:



*Figura 6. 2. Segundo prototipo nodo superior e inferior: "Muelas"*

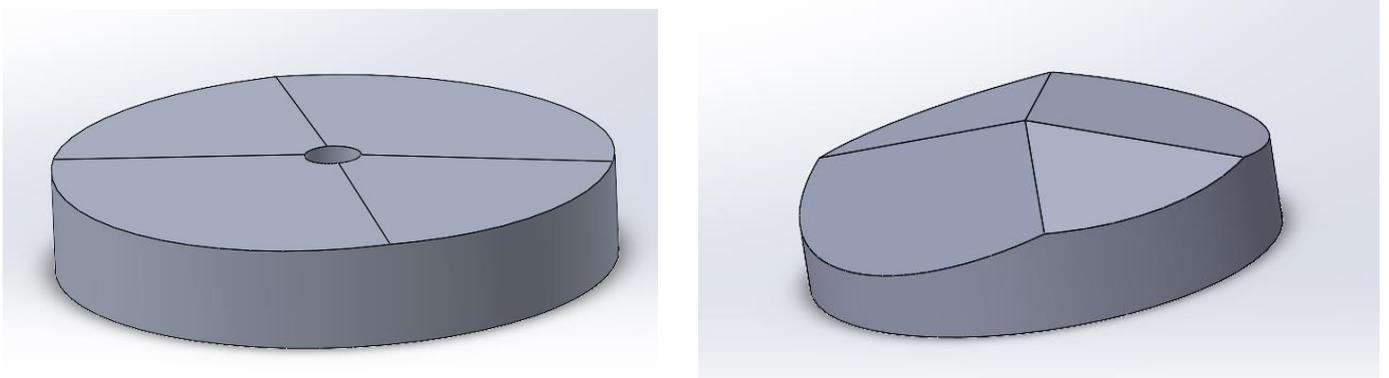


*Figura 6. 3. Ensamblaje nodo “Muelas”*

Como he comentado antes, este diseño ha sido creado para barras totalmente paralelas a la horizontal y a 90 grados cada una de ellas, pero esto en realidad no va a ser así, por lo que he cogido uno de los nodos “E4” con sus otros 4 acompañantes para hacer un diseño en SolidWorks, pero esta vez, el diseño es totalmente distinto a lo anteriormente visto, ya no dispone de las 4 “muelas” y de la caja del centro, ahora el diseño es como el de una “pirámide”, pero todos sus lados tienen una inclinación distinta. Puede que este diseño no sea tan bonito y llamativo como el anterior, pero sí es más práctico.

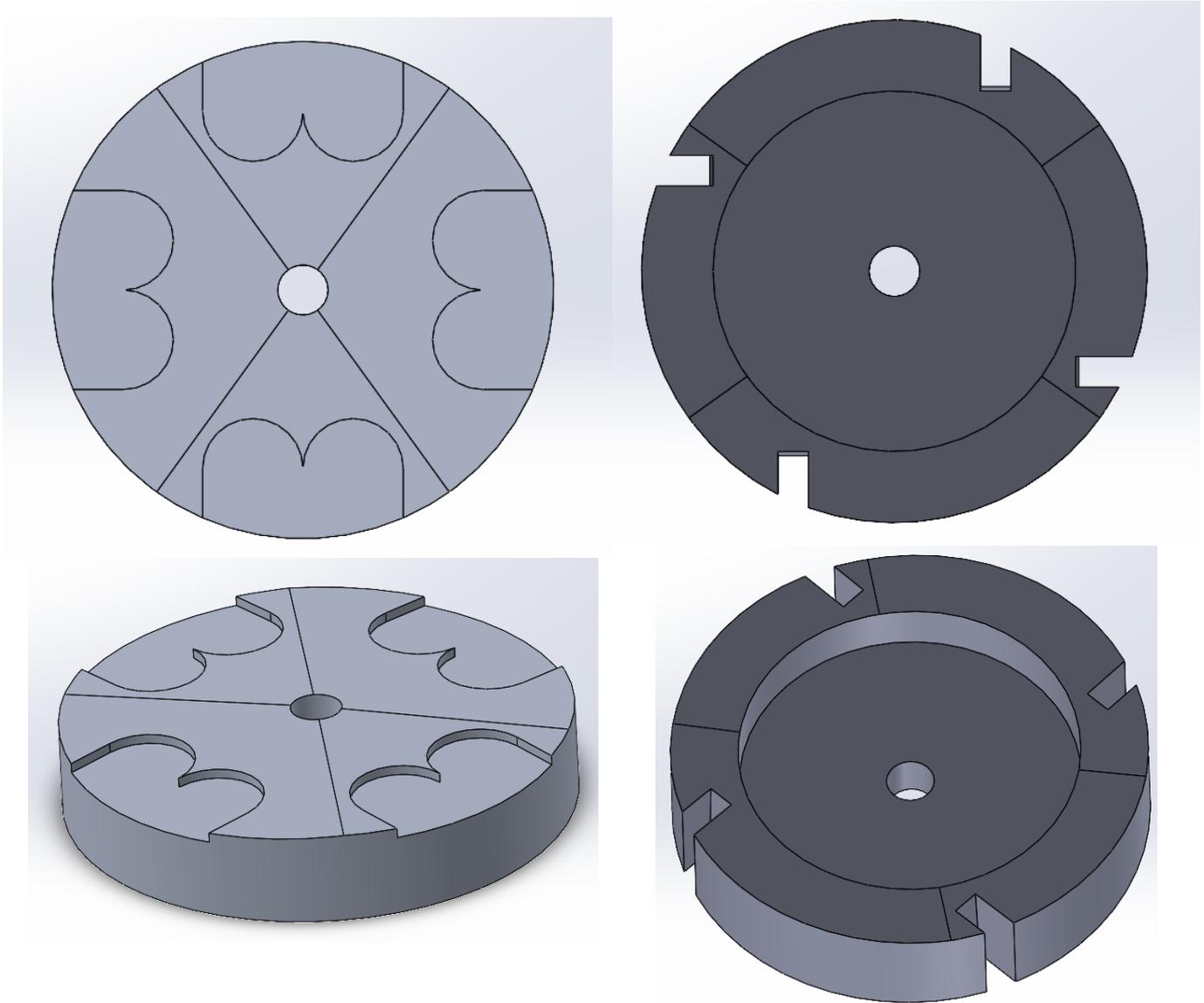
Para conseguir el diseño final he creado un total de 4 planos para cada nodo con los respectivos ángulos cenitales. El ángulo azimut no se tiene en cuenta en el diseño, este servirá sólo en la parte de mecanizado y en la dirección y posición de la estructura. Al finalizar el mecanizado de la pieza, el ángulo al que hemos llamado “norte” irá marcado para poder diferenciarlo entre los 3 ángulos restantes y para poder montar la estructura del invernadero correctamente.

Como la diferencia entre ángulos es muy pequeña, es decir, entre 1 y 2 grados, se muestra el diseño con unos ángulos más grandes y sin el agujero del centro, para notar la diferencia entre todos los planos y la forma de pirámide.



*Figura 6. 4. A la izquierda, el tercer prototipo: “pirámide”, a la derecha el diseño alterado*

Pero este no es el diseño final, si no que cada uno de los lados contiene una caja de 1 mm de espesor para asentar el perfil en L, que mencionaremos más adelante. Tiene una anchura de 20 mm y una entrada al redondo de 5 mm de longitud más los 8 mm del radio de la herramienta. Además, también consta del agujero de 10 mm de diámetro en el centro, que se realizará con el torno antes de meter el tocho de aluminio al centro de mecanizado y posteriormente se le hará la métrica.

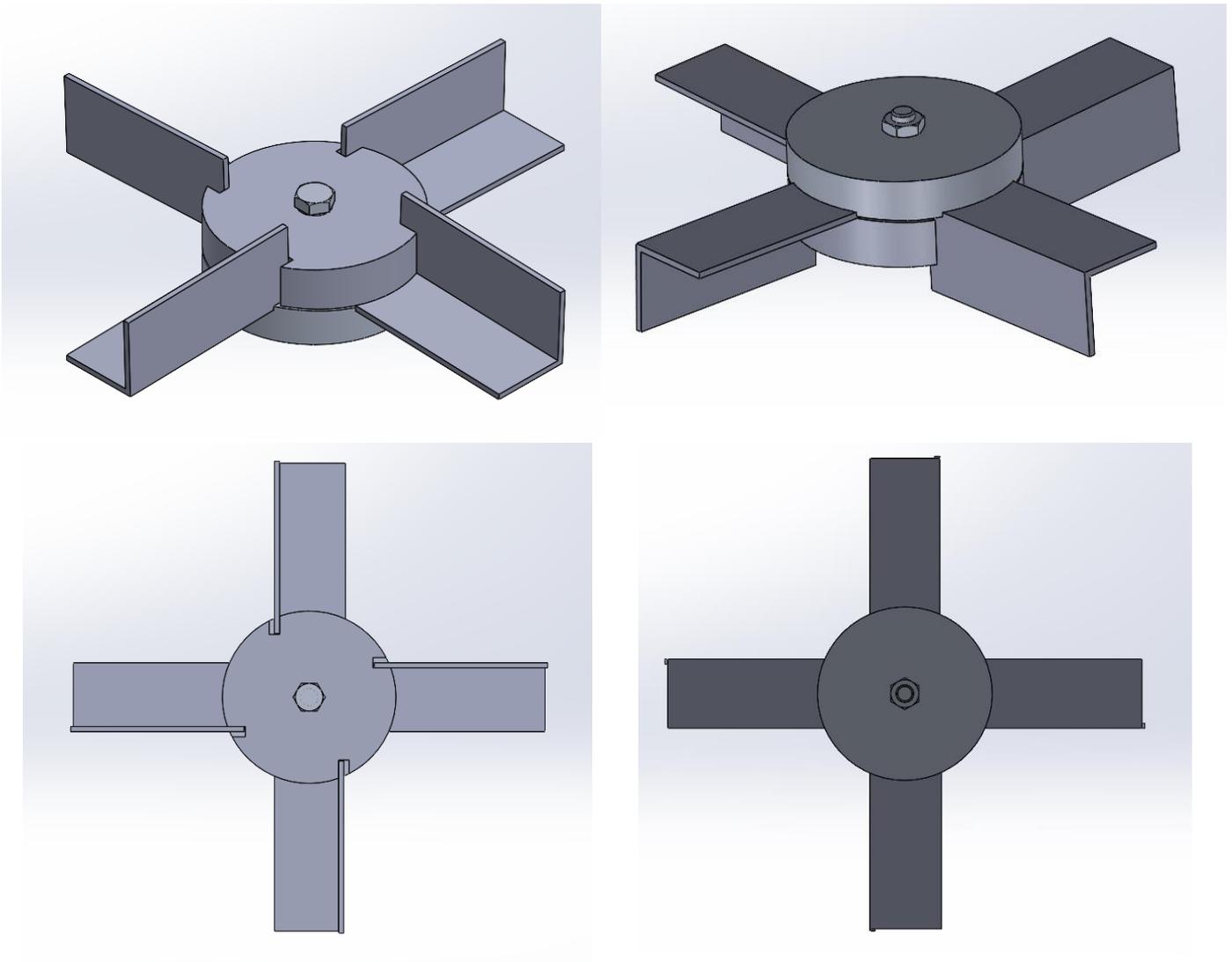


*Figura 6. 5. Diseño final completo*

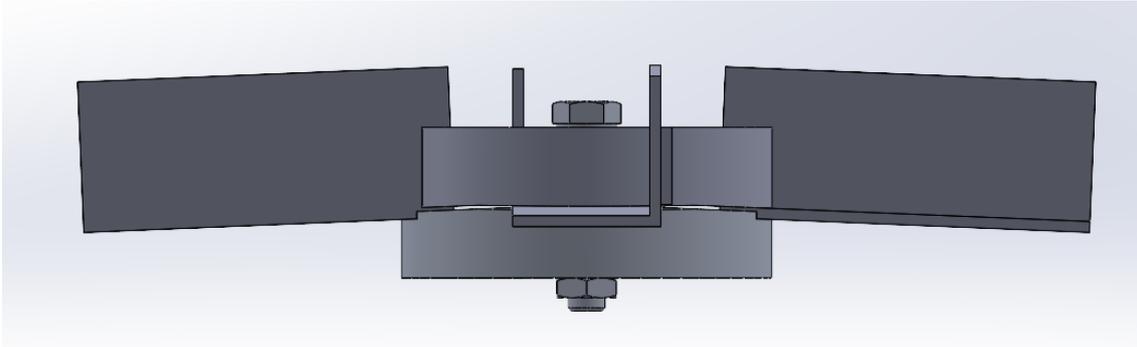
Este diseño nos va a hacer ahorrar tanto material como tiempo de mecanizado. Al contener las muelas, teníamos que cortar 22 mm de longitud de las barras de aluminio para poder mecanizar cada una de las piezas. Gracias a este diseño, nos ahorramos 10 mm de material, por lo tanto, cada pieza mide 12 mm de espesor antes de ser mecanizada en el torno, posteriormente pasará a medir 10 mm cada uno. Esta parte será explicada en el capítulo 8 de fabricación.

Podemos añadir que el mecanizado de las muelas podía llegar a ser dificultoso tanto para la programación como para el mecanizado, ya que la propia máquina debía de hacer muchos giros consecutivos para poder conseguir el anterior diseño. Tanto es así, que nos ahorramos más de la mitad de tiempo en fabricar una pieza con el nuevo diseño.

Para el ensamblaje se ha añadido los 4 perfiles en L, el tornillo pasante y la tuerca que hará presión a los perfiles y mantendrá unidos los nodos para poder crear la estructura monocapa.



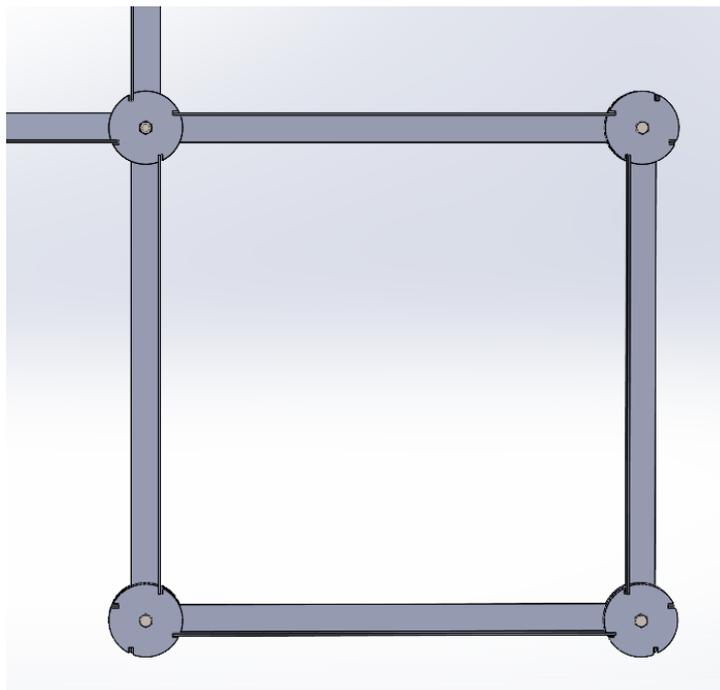
*Figura 6. 6. Ensamblaje del nodo con perfiles, tornillo y tuerca*



*Figura 6. 7. Ensamblaje del nodo con vista de ángulo cenital*

En la imagen anterior se puede apreciar como los perfiles están inclinados hacia abajo, esto es, por los planos donde están apoyados. Cada nodo con sus respectivos ángulos, forman la estructura del invernadero, tomando una red cuadrada.

En la siguiente imagen se muestra una pequeña red de 4 nodos unidos mediante los perfiles en L, con una forma cuadrada como se comentaba anteriormente. En este ejemplo, se ha tomado 30 mm como longitud de barra.

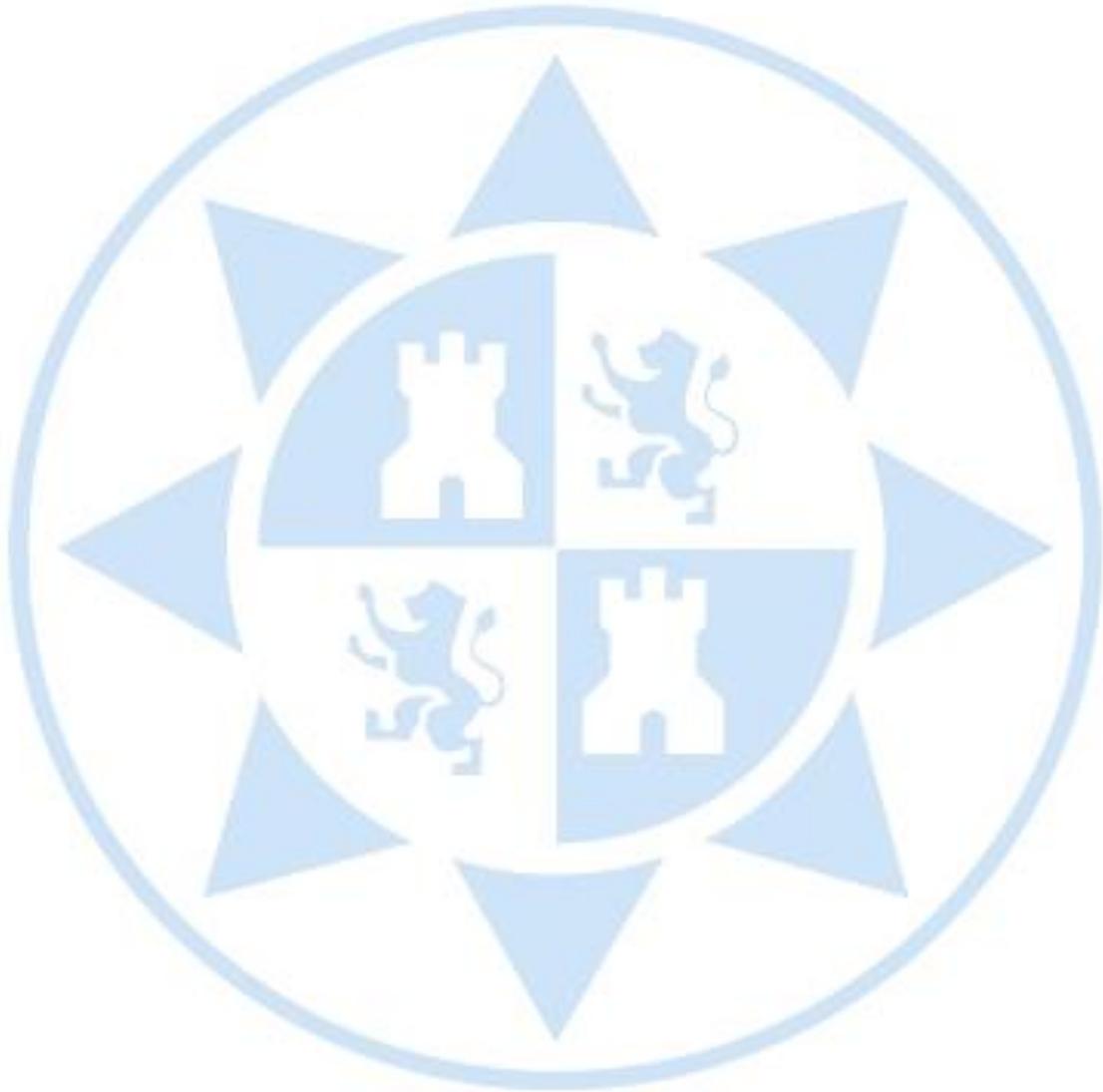


*Figura 6. 8. Red cuadrada unida por los nodos*

Como se puede observar, dos de los cuatros nodos son tipo “dextrógiro” y los dos restantes son tipo “levógiros”. En realidad, el significado de dextrógiro es el viraje que se traza en el sentido de las agujas del reloj, y en contraposición el significado de levógiro.

Como bien se ha comentado anteriormente, los grados de las caras salen diminutos, tanto que en el diseño del nodo no se aprecia la diferencia de ángulos, siendo entre 2 y 4 grados. Esto viene dado a la longitud entre barras y al mismo tiempo al tamaño de la estructura. En el capítulo 6, se expondrán varias fotos donde se aprecia el ángulo de cada una de las caras.

Para este trabajo se ha nombrado a los nodos cuyas barras quedan a la izquierda como levógiros y, los nodos que cuyas barras quedan a la derecha como dextrógiros. Estos nodos se tendrán en cuenta a la hora de la fabricación en el centro de mecanizado, pues en el Excel de la programación, habrá una opción de indicar si es levógiro o dextrógiro, cambiándose automáticamente el control numérico para la mecanización en la fresadora y, solo afecta a los nodos superiores, pues los nodos inferiores son iguales para un tipo o para otro.



## CAPÍTULO 7: Calibración

En el presente capítulo se va a mencionar la forma de calibrar correctamente, de manera segura y sencilla el centro de mecanizado de la Universidad Politécnica de Cartagena. Para ello, se ha utilizado la máquina habilitada para este proceso situada en el ELDI. Es necesario mencionar que la parte más costosa de esta etapa ha sido aprender su funcionamiento de manera precisa, llegando a alcanzar varias semanas, incluso meses de estudio para alcanzar resultados óptimos.

Cabe destacar que, teniendo preparadas las dos piezas y el código numérico, no podemos empezar con el mecanizado, antes de ello debemos de calibrar el centro de mecanizado, sobre todo porque no está bien programado el cero pieza.

Para ello arrancamos la máquina y ponemos en marcha los rotores, activamos la luz y comprobamos que haya aire a presión para poner la máquina en funcionamiento.

El primer paso a seguir en el taller fue realizar una búsqueda de ceros en todos los ejes menos en el eje “Z”. He de recordar que el centro de mecanizado tiene 5 ejes, “X”, “Y”, “Z”, “B” y “C”, siendo estos dos últimos el giro cenital y el azimut respectivamente. Después de que la propia máquina encuentre los ceros, hacemos un “Preselect” que mi tutor D. Manuel Estrems ya había corregido en su momento. Este preselect es:

- X → -539,31
- Y → 234,527
- Z → Se mantiene
- B → 0,809
- C → 0

Al colocar estas coordenadas y buscar el punto “0,0” en el eje “X” e “Y”, tendría que colocarnos el centro del plato de garras en el centro de la herramienta, pero esto no es así, debido a que la máquina cada vez que se enciende se descalibra, por lo que siempre que se encienda debemos de hacer lo siguiente:

## 7.2 Calibración centro de mecanizado

En primer lugar, vamos a utilizar un palpador 3D Digital con inserto palpador que colocaremos en el cono y sucesivamente pondremos en el portaherramientas.

El palpador utilizado es de la marca “Garant”, contiene un indicador combinado, donde aparece una barra gráfica que informa del recorrido y la indicación digital que proporciona el valor de medición exacto. Tiene un intervalo de trabajo muy amplio porque trabaja en todas las direcciones, una precisión  $\leq 0,001$  mm y un recorrido de desviación de 7 mm, con una esfera palpadora de 4 mm de diámetro.



*Figura 7. 1. Micrómetro digital*

A continuación, hacemos 3 calibrados, uno en el eje “X”, uno en el eje “Y” y otro en el eje “B”. En los ejes “Z” y “C” no hace falta hacer el calibrado, ya que el eje “Z” depende del portaherramientas, que es el que se mueve en vertical y el eje “C” gira totalmente en su horizontal, y en el “preselect” ya le hemos tomado la cota 0.

- **Eje B.**

Hay que empezar por el Eje “B” primero, pues si calibramos los demás ejes antes que este, vamos a obtener un error de nuevo en los ejes “X” e “Y” teniendo que calibrar otra vez estos dos ejes y habiendo perdido el tiempo de las dos primeras calibraciones.

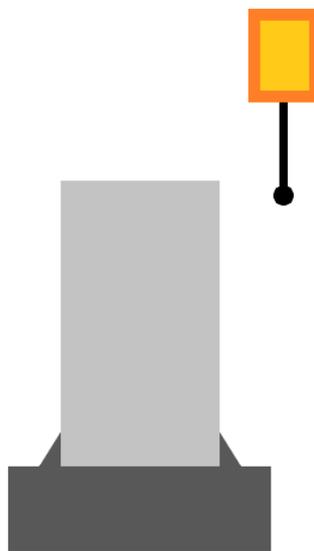
La calibración en el eje “B” es diferente a la de los otros, de tal forma que vamos a tomar dos puntos de referencia que van a estar situados en la superficie horizontal del plato de garras, tomando las coordenadas con el palpador en “X” y en “Z”, pues el ángulo “B” gira entorno al eje “X”. Nos situamos lo más alejado del centro del plato de garras y obtenemos las coordenadas en x y en z. Con estos dos puntos obtenemos la desviación que hay con la siguiente fórmula:

$$\left\{ \operatorname{atg} \left( \frac{Z_1 + Z_2}{X_1 + X_2} \right) \right\}$$

El error que nos suele dar es relativamente pequeño, pero ese simple fallo puede darnos errores muy graves en la pieza final. Para finalizar, corregimos el error y preseleccionamos como cota 0 en el ángulo “B”.

- **Eje X.**

El siguiente paso es calibrar el eje “X”, que suele tener más error que los demás ejes. Para ello acercamos el palpador al tocho y palpamos en las caras extremas de la pieza, es decir, en el lado derecho e izquierdo de la generatriz, en la misma dirección del eje “X”, manteniendo la misma profundidad “Z” y ajustando la misma referencia del palpador en ambos extremos. Acto seguido tomamos los datos y con los valores obtenidos de las coordenadas en “X”, hacemos una suma en valor absoluto y dividimos entre dos. El resultado es el error en mm de este eje, por lo que iremos a la coordenada en “X” que hemos obtenido con dicha fórmula y preseleccionaremos en 0. No hace falta contar la esfera del palpador, pues hemos tenido en cuenta el valor de medición y lo hemos igualado en ambos extremos para no tener que integrar el radio en dicha fórmula.



*Figura 7. 2. Calibración eje X*

- **Eje Y.**

Los pasos que debemos seguir en este eje son los mismos que en el eje “X”, pero esta vez utilizaremos la dirección “Y” y sus respectivas coordenadas para ajustar al 0 pieza. En este caso, el error es mucho menor que en los demás ejes, esto es debido a que no está tan descalibrado o que al haber sido calibrados los dos anteriores ejes, este último eje tiene un mínimo de error, pero el suficiente para obtener un mecanizado desperfecto en la pieza final.



*Figura 7. 3. Calibración eje Y*

Conforme avanzaban los días en el taller, nos dimos cuenta de que había una forma más práctica y rápida. Para esta forma, utilizamos para el eje “B” un comparador horizontal palpador oscilante de la marca “Mitutoyo”, analógico y con una graduación de 0,01 mm. Palpamos en la parte superior de la pieza, desde un extremo a otro, y con el recorrido de la trayectoria y la diferencia de coordenadas en “z” de cada extremo, sacamos el error con:  $atg\left(\frac{z}{x}\right)$ . Para los ejes “X” e “Y”, volvemos a utilizar el palpador digital, que seguiría montado en el portaherramientas ya que el palpador analógico tiene una base magnética y puede superponerse a este. De nuevo, empezando por el eje “X” porque es el eje que más error tiene, desplazamos el carro hasta que el palpador toque en la generatriz de un extremo y en ese momento, la coordenada obtenida en “X” la preseleccionamos a 0.

A continuación, nos vamos al extremo opuesto y con la coordenada en “X” ahora obtenida, la dividimos entre 2 y preseleccionamos de nuevo en la coordenada de “X” la solución a esa división. Ahora el 0 en el eje “X” ya está corregido. Esto ocurre porque la herramienta está fija en la dirección horizontal, por ello al solo “medir” el diámetro de la pieza, nos sale las coordenadas para dividir y solucionar el fallo. Como pasaba anteriormente, para el eje “Y” hay que seguir exactamente los mismos pasos que en el eje “X”, pero en su misma dirección.



*Figura 7. 4. Reloj comparador*

## 7.2 Cálculo del centro de giro

Este paso es muy importante antes de empezar con el mecanizado y sobre todo con el código del programa, pues la distancia desde el centro hasta la base superior de la pieza nos va a decir la altura total, que con las matrices de transformación obtendremos fácilmente las coordenadas para situar la pieza en el ángulo correcto para poder mecanizarla.

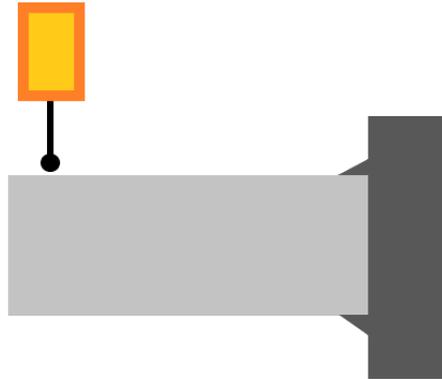
Después de calibrar todo, volvemos a colocar el palpador en la parte superior del plato de garras y anotamos la coordenada en “Z”. Después de llevar el palpador a una distancia de seguridad giraremos “B” 90 grados, quedando totalmente paralela a la mesa. A continuación, tocaremos con el palpador en el extremo de la pieza, y como sabemos que el radio de la pieza es de 25 mm, le sumamos en valor absoluto esos 25 mm a las coordenadas en “Z” de ese punto. Ahora bien, sabiendo la distancia total desde el centro hasta la parte superior de la pieza, la distancia de giro será la recta entre esta distancia obtenida y la longitud de la pieza. Se puede hacer de otra forma más sencilla, y es preseleccionando el 0 del eje “Z” en el plato de garras, y cuando giremos 90 grados y nos llevemos el palpador al extremo de la pieza sumándole el radio a dicha coordenada, obtendremos directamente el centro de giro.

Un pequeño resumen del cálculo del centro de giro sería que si el cero en el eje “Z” está situado en el plato de garras, la distancia de giro sería la obtenida en dicha suma, pero si

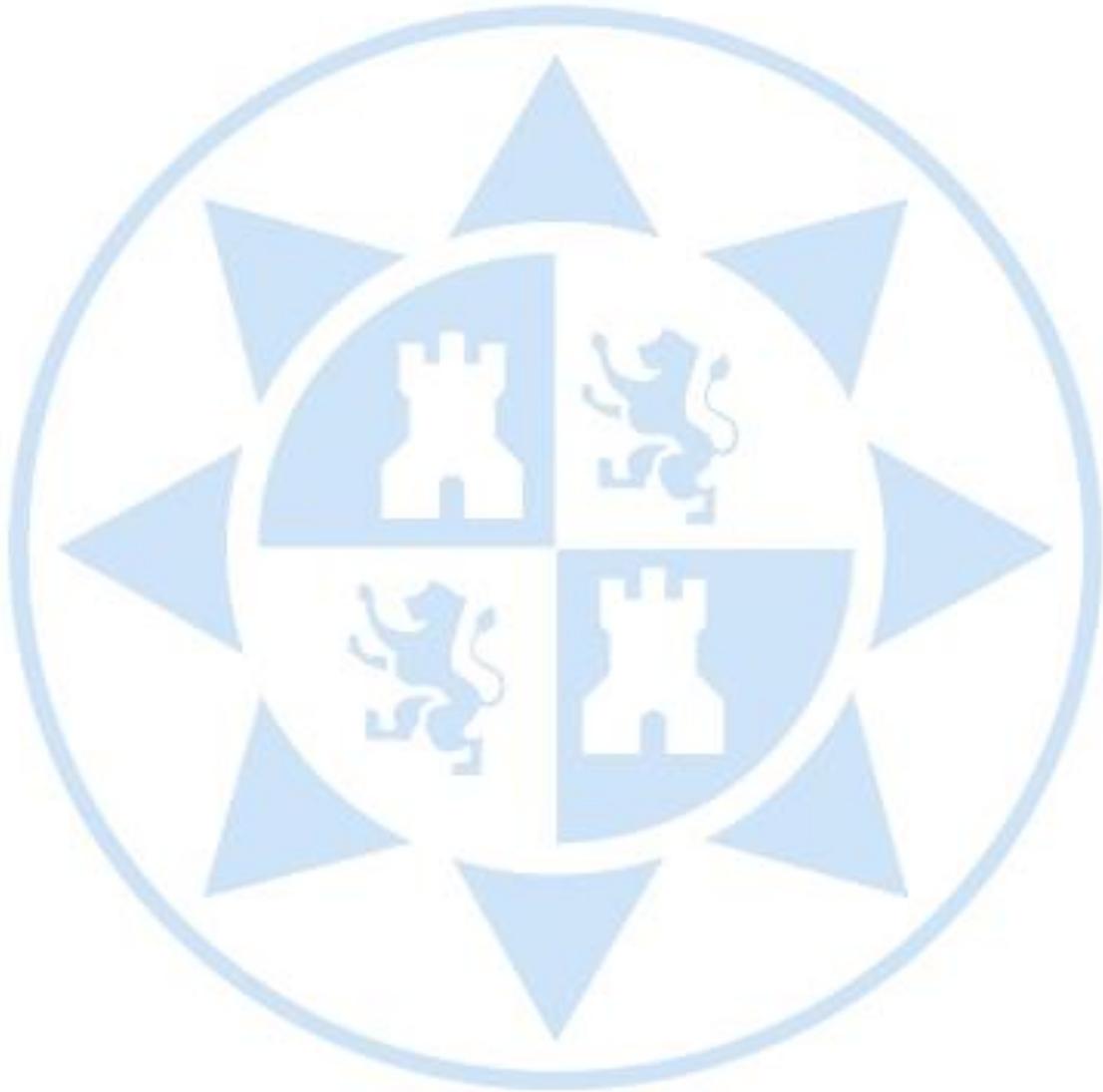
está encima de la pieza, habría que restar la suma total menos la altura de la pieza obteniendo la distancia del centro de giro.

Por último, he de añadir que el centro de giro no varía, por lo que no habrá que calcularlo cada vez que arranque la máquina.

La distancia del centro de giro es de 174,1 milímetros.



*Figura 7. 5. Calibración eje B*



## **CAPÍTULO 8: Fabricación**

Por último, nos situamos en el apartado de fabricación, donde veremos el material utilizado para los nodos y el proceso de la fabricación de la pieza de principio a fin. Posteriormente, veremos los tiempos y los costes de fabricación de cada nodo y del invernadero. Para ello, este capítulo va a estar dividido en 4 partes: Material, Mecanizado, Tiempos de mecanizado y Costes económicos.

## 8.1 Material

Antes de pasar al apartado de mecanizado, donde veremos el proceso de la fabricación de la pieza de principio a fin, se va a nombrar el material escogido y las propiedades de dicho material, además de nombrar sus características.

El material seleccionado ha sido el aluminio, en específico el aluminio 6060. La principal razón por la que optamos por el aluminio en vez del acero es por su peso, ya que tiene una densidad 3 veces menor que el acero. Otras de las propiedades del aluminio es que tiene una alta resistencia a la corrosión y a la oxidación, debido a su capa pasivada. En el aluminio se encuentra una capa muy delgada de óxido de aluminio, protegiéndolo del óxido, pero no lo protege de otras formas de corrosión. La superficie se vuelve de color blanco si se oxida y puede llegar a ocasionar pequeños orificios. El costo del acero es más elevado que el del aluminio, otra ventaja que nos lleva escoger el aluminio como material para los nodos. Unas de las ventajas irrelevantes es que el aluminio tiene mayor conductividad térmica y eléctrica que el acero, pero este en cambio puede ser fácilmente soldado mientras que el aluminio es más difícil. A la hora de mecanizar el material, el aluminio es bastante suave, por lo que es más fácil de manipular, cortar y moldear. Inclusive, mediante aleaciones adecuadas puede aumentar su resistencia mecánica. Finalmente, la mayor ventaja que tiene el acero frente al aluminio es su resistencia. Mientras que el aluminio es más ligero y menos denso, el acero es bastante más fuerte, pero todo dependerá de la aplicación que queramos darle.

Cabe destacar que hoy en día estamos rodeados de aluminio. Su uso más popular son unas láminas de aluminio con un espesor muy pequeño que hace que sea fácilmente maleable y que puede proteger el embalaje alimentario, es decir, el papel de aluminio. Sus usos en la industria vienen dados desde estructuras portantes en la arquitectura hasta piezas industriales de vehículos, así como las herramientas y los utensilios de cocina, es decir, lo utilizamos en todas partes.

Como bien se ha comentado anteriormente, el aluminio escogido es el 6060. A continuación, expongo una tabla sobre la composición química de esta aleación.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,30-0,60	0,10-0,30	≤0,10	≤0,10	0,35-0,60	≤0,05	≤0,15	≤0,10	Resto

Tabla 8. 1. 1. Composición química del material utilizado

Las propiedades mecánicas a temperatura ambiente para barras y tubos extruidos son:

Designación de estado	Medidas			Límite elástico R (N/mm)	Tensión de rotura	Alargamiento de rotura		Dureza HBW
	D (mm)	S (mm)	T (mm)			A	A	
<b>T4</b>	-	-	≤ 5	≥ 65	≥ 130	≥ 12	≥ 10	50
	≤ 80	≤ 80	5 < t ≤ 20	≥ 65	≥ 130	≥ 15	≥ 13	50
<b>T6</b>	≤ 80	≤ 80	≤ 20	≥ 160	≥ 215	≥ 12	≥ 10	75

Tabla 8. 1. 2. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente del material

Siendo \*T4 un tratamiento térmico de solución, temple y maduración natural y T6, un tratamiento térmico de solución, temple y maduración artificial.

Podemos incluir los perfiles en L o en ángulo, que serán las barras que estarán unidas mediante cada uno de los nodos, el cual el material seleccionado también es el aluminio. Estas tienen unas dimensiones de 20x20x15 y de 2 metros de largo. Se produce con una chapa laminada en caliente o galvanizada, cuya sección tiene forma de ángulo recto, con las alas de igual longitud en nuestro caso, pero pueden ser de distinta longitud. De la misma forma se encuentran perfiles en L plegados y dos placas rectangulares soldadas entre sí para formar la L. Esta sección es utilizada comúnmente para aplicaciones de carga puntual para resistir el corte, compresión y tensión. La mejor opción cuando se requiere flexibilidad en la construcción son los perfiles conformados en frío, pero no es nuestro caso, ya que no necesitamos flexibilidad si no rigidez, por eso están laminados en caliente. Es perfecta para ser utilizada como miembro de conexión o como componente principal de un miembro integrado. Los beneficios de estos perfiles vienen dados por una alta capacidad estructural en las conexiones para resistir la soldadura o el cizallamiento de perno, es ofrece una buena combinación de capacidad tensión compresión y se puede colocar de forma consecutiva para crear una sección en forma de T. Las desventajas que muestra es que es asimétrica en ambas direcciones X-X e Y-Y.



En el siguiente paso, se va a utilizar el torno para un proceso de varias operaciones seguidas, y las piezas pasan de 13 mm de espesor a 10 mm. Se va a mecanizar las piezas por separado:

- **Parte inferior:**

La primera operación es hacer un refrentado de 1 mm por una de las caras, con una herramienta de 90°. A continuación, con la broca de punto se marca el centro con un par de mm de espesor, para posteriormente cambiar dicha broca por un taladro de 9,25 mm, que se usará para taladrar los 12 mm del troncho. Para hacer la rosca en el agujero, se utiliza tres machos de roscar de 10 mm, de más fino a más grueso, con la ayuda del del carro del torno para entrar totalmente recto y que no se desvíe la rosca. El último paso para los nodos inferiores antes de pasar al centro de mecanizado será refrentar la cara posterior, consiguiendo un acabado más atractivo y pulido. Para que tenga una buena sujeción en el plato de garras y no se dañe, se coloca un útil, evitando las rozaduras por las propias garras.



*Figura 8. 3. Mecanizado en el torno del taller ELDI*

Todo este proceso sirve para poder agarrar bien la pieza en el centro de mecanizado con un útil diferente al anterior mencionado, que irá unido mediante la rosca mecanizada, pues este tiene un agujero pasante. El útil va a tener dos funciones, la primera, hará como sujeción de nuestra pieza a mecanizar, y la segunda, evitará la rozadura del plato de garras con nuestra pieza para no causar ningún tipo de desperfecto. La rosca interior la usaremos también como métrica para apretar las dos partes del nodo con un tornillo y una tuerca.



*Figura 8. 4. Sujeción del nodo al útil*

- **Parte superior:**

Las operaciones de esta parte son similares a la anterior, pero antes de hacer el taladrado, se iba a hacer un avellanado interior de 5 mm de longitud y con un diámetro de 35,84 mm desde el centro, pero en el centro de mecanizado hay una forma más rápida y precisa que en el torno, que se comentará próximamente. Esta operación tiene dos funciones, la primera de ellas, por la forma que obtiene el diseño del nodo superior, la fresa va a mecanizar desde los extremos hasta el centro con un ángulo negativo, pues con la misma superficie en toda la pieza, conforme la herramienta se acerque al centro, sería más complicado el mecanizado, hasta podría romper la herramienta y si no tenemos este gran agujero la herramienta seguirá mecanizando y no habrá una distancia segura para que la herramienta vuelva a hacer la pasada sin dañar otras partes de la pieza. La segunda, con un carácter importante, nos va a servir para hacer el nodo más liviano y a su vez, la estructura completa más ligera. Igual que para la parte inferior, hacemos un taladrado y la rosca para poder sujetar la pieza con el útil.



*Figura 8. 5. Cajera circular del nodo superior*

Colocada la pieza en el centro de mecanizado, se introduce el código mediante un pendrive a la computadora, seleccionamos el programa y por seguridad, hay que hacer una prueba al aire, es decir, colocar el offset de la herramienta unos 50 mm más arriba para hacer una simulación del programa sin tocar la pieza, comprobando que la herramienta no puede llegar a dañar tanto la pieza, como la misma herramienta y el centro de mecanizado al mismo tiempo, por una función mal escrita o por un cambio de velocidad brusco provocando un colapso.

Con un buen resultado en la prueba de seguridad, eliminaremos el offset para colocar la altura de la herramienta en su sitio. Pulsaremos la marcha en el centro de mecanizado y el código numérico se pondría en funcionamiento.

Durante el proceso de fabricación de los nodos, la herramienta estará situada en dos posiciones distintas según la parte del nodo que sea mecanizada. Para la parte inferior, la herramienta estará situada a la derecha del nodo, y en la parte superior, estará situada a la izquierda, esto tiene que ver por los siguientes motivos:



*Figura 8. 6. Ejes de la máquina herramienta*

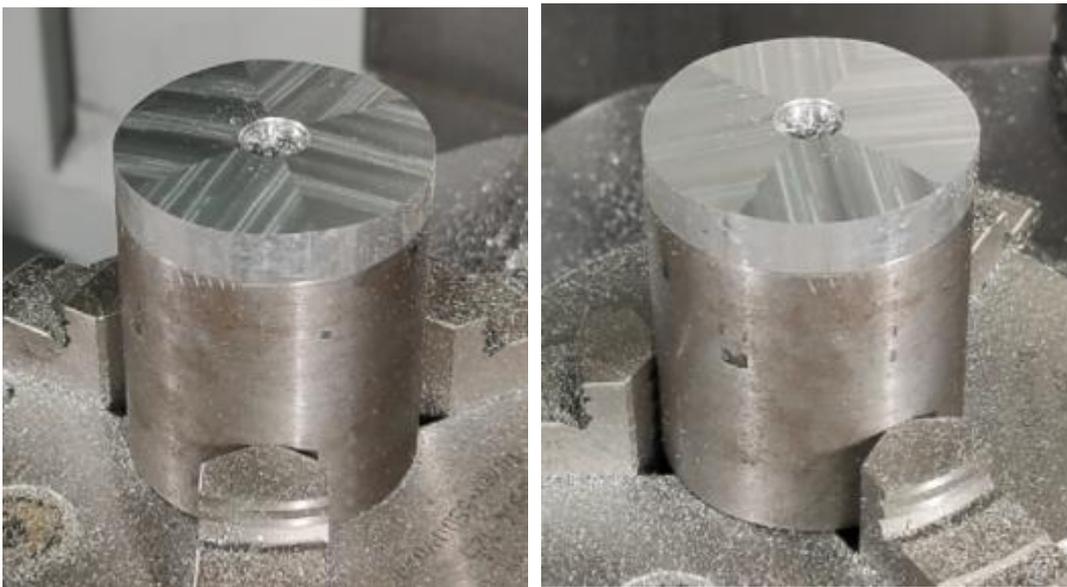
- **Parte inferior:** Durante el mecanizado de la parte inferior, la mesa con el plato de garras se colocará en X positivo, es decir, la herramienta quedará a la derecha de la pieza a mecanizar.



*Figura 8. 6. Prueba de mecanizado del nodo inferior*

Esto es porque la forma que vamos a conseguir es divergente y, el ángulo B se inclinará en sentido contrario al de las agujas del reloj. Este giro, hará que el extremo de la pieza quede más alto que el centro, pues las pasadas de la herramienta llegarán hasta el centro de nuestra pieza, dejando un ángulo hacia abajo cuando la pieza esté totalmente horizontal, obteniendo una forma de pirámide. Para el mecanizado de esta parte, la máquina hará un total de 4 giros sobre el ángulo B (ángulo azimut) y otros 4 giros sobre el ángulo C (ángulo cenital). La herramienta irá moviéndose sobre el eje Y para situarse en las coordenadas adecuadas para posteriormente hacer 4 entradas sobre el eje X para mecanizar cada una de las caras.

En el siguiente enlace se puede ver el mecanizado de las facetas:  
<https://youtu.be/3J36Pzz-Bt4>



*Figura 8. 7. Mecanizado piramidal del nodo inferior*

Seguidamente, se harán las cuatro cajas de 1 mm de espesor y de 20 mm de ancho que soportarán los perfiles. Para ello, se hará los mismos giros que anteriormente, pero el eje Z de la herramienta bajará 1 mm más y, solamente hará dos pasadas en vez de cuatro. Para esta pieza se utiliza una herramienta de 8 mm de diámetro. El resultado del nodo inferior se muestra en la siguiente imagen.



*Figura 8. 8. Mecanizado completo nodo inferior*

Para ver la mecanización de las cajas, se adjunta el siguiente enlace: <https://youtu.be/eCLpx2nAg-U>

Como se puede comprobar, el útil cumple perfectamente su función, da una buena sujeción y no es dañado. Un imprevisto que se dio a la hora del mecanizado fue que, si la velocidad de avance era demasiada alta, la herramienta hacía girar la pieza, destrozando gran parte de esta, haciendo un mecanizado desfavorable.



*Figura 8. 9. Mecanizado desfavorable del nodo superior*

Como se ve en la imagen anterior, la parte exterior del nodo queda completamente destrozada. Esta disminución de velocidad para conseguir un correcto acabado hará que el tiempo de mecanizado sea más duradero.

- **Parte superior:** Como se ha comentado en el capítulo [4] de Metodología y aplicación, el presente nodo tiene los mismos planos que la parte inferior, por lo que al mecanizar obtendremos los mismos giros. Pero antes de mecanizar las cuatro caras, se va a activar la función G88, siendo la función de cajera circular automática, programada para obtener una cajera de 17,93 mm de radio y 5 mm de espesor. Al tener una cajera interior, solo será mecanizada el borde de la pieza, que será suficiente para rigidizar las barras.



*Figura 8. 10. Cajera circular*

En el siguiente enlace se puede observar el mecanizado de la cajera circular:  
<https://youtu.be/0oM0jLDy7hc>

En cuanto a la diferencia con el mecanizado del nodo inferior mencionado anteriormente, la mesa con el plato de garras se situará en X negativo, es decir, la herramienta estará situada a la izquierda de nuestra pieza. En la siguiente imagen se puede observar la parte superior con la cajera ya realizada y la pieza colocada a la derecha de la herramienta.



*Figura 8. 11. Mecanizado nodo superior*

Igual que el nodo inferior, esta pieza tiene una forma piramidal, pero con la diferencia de que la pirámide es interior, y que, para poder mecanizarla correctamente, está girada 180 grados respecto a su colocación futura. Como el ángulo B gira al contrario de las agujas del reloj, la pieza se coloca a la derecha de la herramienta, para que el centro de la pieza esté situado más alto que el extremo de esta. Las pasadas que hará la herramienta para este mecanizado se han mencionado en el capítulo [] de cálculos matemáticos.

Por último, se harán 4 cajeras con la misma profundidad que el espesor de la pieza, con la función de que los perfiles puedan sobresalir de la misma pieza. Para estas cajeras se utilizará una herramienta de 3mm de diámetro y se harán dos pasadas, desbastando 5 mm por cada pasada. La velocidad de avance será del 10 % del total (300 mm/s), para evitar romper la herramienta, ya que es muy delgada y soporta un fuerte momento flector al desbastar la pieza con gran parte de su longitud. Estas cajeras pueden observarse en el enlace adjuntado:

<https://youtu.be/aG5qNDMEutc>

El resultado final de esta pieza es el siguiente.



*Figura 8. 12. Mecanizado completo nodo superior*

El mecanizado de la herramienta se divide en 4 pasadas, pues en cada una de ellas la máquina herramienta hará 2 giros para obtener las caras planas.

### 8.3 Tiempos de mecanizado

Se va a tratar los tiempos de mecanizado para las operaciones expuestas en el apartado anterior, para ello se adjunta el siguiente diagrama de Gantt con el tiempo total transcurrido de inicio a fin y el tiempo que conlleva cada una de las operaciones por separado.

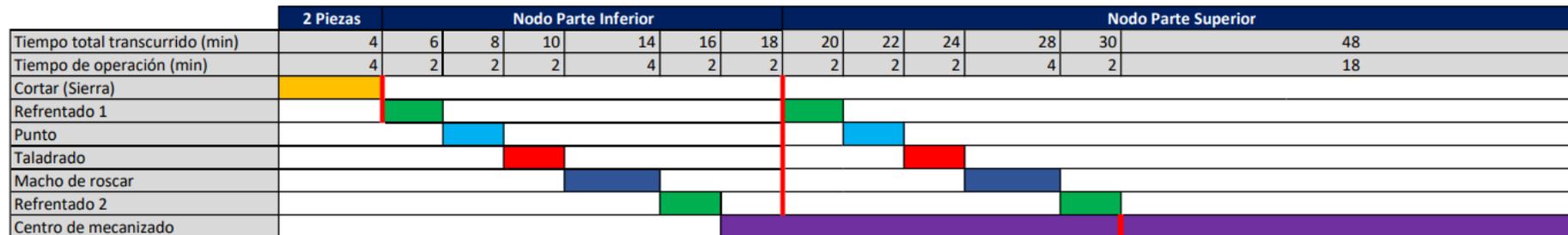


Figura 8. 13. Diagrama de Gantt para el mecanizado de los nodos

En el diagrama se puede observar que cada operación tiene un color distinto y que la operación que necesita más tiempo para completarse es el centro de mecanizado, debido al gran código numérico para hacer posible la fabricación. El torno es la segunda máquina que más se utiliza, con un tiempo total de 22 minutos para cada pieza y la sierra sólo se utiliza al principio para cortar las dos piezas seguidamente, con una duración de 5 minutos en total. Este tiempo también cuenta con la preparación de la pieza y máquina, medición y el transporte de esta.

El diagrama está dividido en 3 partes; una primera parte donde se usa la sierra automática, con una duración de 2,5 minutos para colocar, medir y cortar cada una de las piezas; en la segunda parte se encuentra el mecanizado de la parte inferior, puesto a que sólo tenemos una máquina de fresado multieje, se hace las operaciones necesarias en la parte inferior del nodo para poder introducirlo en el centro de mecanizado, siendo el refrentado por las dos caras del nodo, punteado, taladrado y la rosca, comentada anteriormente su utilidad; la tercera parte viene dada cuando se ha puesto en marcha el fresado multieje con el código numérico y volvemos al torno para mecanizar la parte superior del nodo, haciendo las mismas operaciones que en la parte inferior.

El periodo de tiempo que se utiliza para mecanizar la parte inferior en la fresa, se utiliza para el mecanizado en el torno de la parte superior. En el caso de mecanizar las dos piezas seguidas en el torno para después mecanizar en el centro de mecanizado, se perdería mucho tiempo, concretamente 32 min, por lo que se ahorraría un mayor tiempo mecanizando solamente una pieza en el torno para después meterla al centro de mecanizado y aprovechar ese tiempo para seguir con la segunda pieza en el torno.

Aunque la parte inferior del nodo contiene más líneas de código numérico, la parte inferior tiene una duración de 14 min y la superior de 18 min, con una duración más larga esta última puesto que tiene que hacer el ciclo fijo de cajera circular, con una duración aproximada de 5 minutos. Si la parte del nodo superior no tuviera este ciclo de cajera circular, las duraciones serían muy parecidas.

## 8.4 Costes económicos

En este apartado estudiaremos la rentabilidad del producto final a desarrollar y comercializar, para ello analizaremos los costes de los componentes del producto, de las herramientas e instalaciones necesarias y los salarios del personal encargado de procesar la materia prima y ensamblar el conjunto.

### 8.4.1 Componentes

Como se ha comentado anteriormente, los materiales que se va a utilizar son cilindros de aluminio de 1 metro y perfiles en L de 2 metros. Con cada una de las barras a utilizar, se puede conseguir un total de 76 redondos de aluminio y de 6 perfiles de 30 cm de longitud. Para completar nuestra estructura, se necesita un total de 613 nodos, y puesto que cada nodo se divide en dos partes, se necesitan 1226 piezas, con un espesor de 13 mm para empezar su mecanizado, con lo cual, se necesita 16 metros de barras cilíndricas de aluminio, por lo que habrá que comprar 16 unidades de cilindros de 1 metro para poder mecanizarlo. Para las barras se va a necesitar cortar 1156 trozos para poder unir toda la estructura, o dicho en barras enteras son un total de 193 perfiles. Con las unidades de los componentes necesarios, se puede calcular un coste no exacto, pero sí aproximado.:

COMPONENTE	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	PRECIO (€)
<b>Barra Perfil en L</b>	8,95	193	1.727,35
<b>Barra Cilindro</b>	45,98	16	735,68
<b>TOTAL (€)</b>			<b>2.463,03</b>

Tabla 8. 4. 1. Presupuesto de los materiales

El coste total de los materiales para fabricar una estructura es de **2.463,03 €**.

El precio de la estructura varía según su tamaño y la distancia entre nodos.

### 8.4.2 Herramientas

Dado que la maquinaria no hay que comprarla porque está disponible en el taller de la Universidad, no vamos a tener en cuenta el costo de estas, pero sí del precio aproximado que se gasta por electricidad y de mano de obra, que se comenta en el siguiente capítulo.

Asimismo, se va a calcular el coste de las herramientas que son desgastadas durante el mecanizado, necesarias para la fabricación del producto final.

Para el centro de mecanizado, se va a aproximar la duración de desgaste de herramienta cada 3 horas, pues se desgastan rápidamente debido a la gran velocidad de mecanizado.

El valor de cada broca ronda los 25 euros, pues haciendo los cálculos, para el mecanizado total de los nodos se necesitan 109 brocas [véase la tabla x], esto hace una suma de 1.090 €.

En el torno, la plaquita se desgasta cada 4 horas, esto hace un total de 41 placas y un aumento de precio de 615 €, costando cada unidad 15€. Por último, como el aluminio es un material dúctil, la sierra se desgasta muy poco comparado con las demás herramientas, siendo a su vez la menos costosa, con un tiempo de recambio que se ha aproximado a cambiar la cinta cada 1000 piezas cortadas. Al tener 1226 partes de los nodos y 1156 perfiles, vamos a necesitar solamente 3 cintas de sierra, suficientes para completar todos los cortes. El costo de cada una de ellas ronda los 30€.

En la siguiente tabla podemos apreciar el costo de este apartado.

Herramienta	Unidades utilizadas	Coste Unidad (€)	Total (€)
Broca	109	25	2725
Plaquita	41	15	615
Cinta de sierra	3	30	90
<b>COSTE TOTAL (€)</b>			<b>3430</b>

Tabla 8. 4. 2. Precio de las herramientas utilizadas

En este caso, las herramientas utilizadas tienen un coste superior a los materiales utilizados para formar la estructura. El coste en este apartado no es tan grande puesto que contamos con las máquinas de la Universidad, pero en el caso de no poseer ninguna, este valor se dispararía.

#### 8.4. Tasa horaria

En este apartado se va a contabilizar el coste de la potencia de la máquina, incluyendo el salario del operario y el gasto de electricidad.

La máquina que más potencia exige es el centro de mecanizado, rondando el valor de unos 60€/hora. El operario deberá de comenzar con el calibrado al inicio del día y posteriormente introducir las partes del nodo. Como bien se ha comentado en el Diagrama de Gantt, mientras se mecaniza la pieza podrá empezar con el inicio del mecanizado en las demás máquinas herramientas, como por ejemplo el torno, que su tasa horaria es de unos 30€/hora. Este valor también se ha adjudicado para la sierra, que al no utilizarse tanto no aumentará demasiado el precio.

Para poder calcular las horas que mantenemos funcionando las máquinas herramientas, hemos tenido en cuenta los tiempos del diagrama de Gantt y se ha añadido la siguiente tabla.

	Unidades	Sierra (min/ud)	Torno (min/2*ud)	Fresadora (min/2*ud)
Nodos	1226	1,5	16	32
Barras	1156	0,5	-	-
TIEMPO TOTAL (minutos)		2417	9808	19616
TIEMPO TOTAL (horas)		40,28	163,47	326,93
TIEMPO TOTAL (días)		1,68	6,81	13,62
<b>TIEMPO TOTAL DEL MECANIZADO DE LA ESTRUCTURA (Días)</b>				<b>22,11</b>

Tabla 8. 4. 3. Tiempo usado en las máquinas herramientas

Las máquinas tienen un uso total de 22 días para el mecanizado de una sola estructura. Suponiendo que tenemos dos operarios trabajando en turnos diferentes, durante 8 horas cada uno, estamos utilizando 16 horas de maquinaria al día. Esto conlleva a que el mecanizado de la estructura completa se pueda fabricar en 33 días.

Con todos estos cálculos y con el precio/hora que se ha comentado anteriormente, podemos ver en la siguiente tabla el costo total del presente apartado.

Máquina	Horas de uso	Tasa horaria (€/h)	Total (€)
Sierra	40,28	30	1208,5
Torno	163,47	30	4904
Fresadora	326,93	60	19616
<b>COSTE TOTAL (€)</b>			<b>25728,5</b>

Tabla 8. 4. 5. Coste de la tasa horaria

El precio total de la tasa horaria de las máquinas herramientas equivale a **25.728,5 €**.

Se puede observar que la máquina herramienta más utilizada es el centro de mecanizado y es la más costosa, haciendo que aumente demasiado el precio total de la tasa horaria.

## 8.5 Resumen de costes

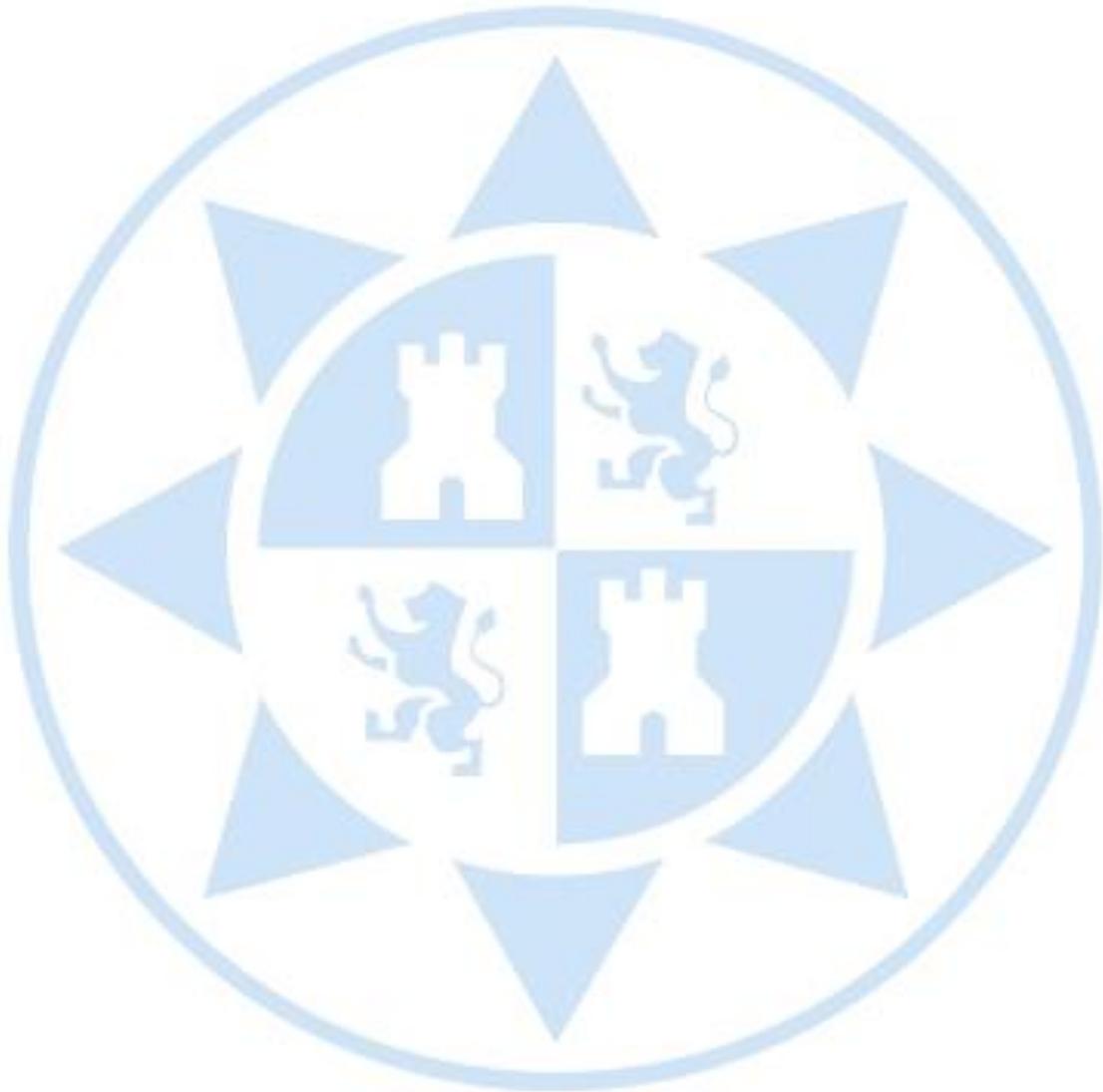
Con todos los cálculos expuestos, se presenta la siguiente tabla con la totalidad.

	Componente	Cantidad	Coste Unitario	Coste (€)
Materiales	Barras cilindros	16	45,98	735,68
	Barras perfil L	193	8,95	1727,35
Herramientas	Broca	109	25	2725
	Plaquita	41	15	615
	Cinta de sierra	3	30	90
Tasa horaria	Sierra	40,28	30	1208,4
	Torno	163,47	30	4904,1
	Fresadora	326,93	60	19615,8
<b>PRECIO TOTAL ESTRUCTURA</b>				<b>31621,33</b>

Tabla 8. 4. 6. Resumen del presupuesto total

La cantidad de dinero total que cuesta la fabricación de la estructura es de **31.621,33**.

Al observar todos los valores, nos damos cuenta de que la parte más cara es el mecanizado, con un 81,36 % del coste total, sobre todo a la hora de utilizar la fresadora de 5 ejes, puesto que es la máquina que más potencia usa al mecanizar los nodos. Para disminuir costes, en el último capítulo se expondrá un apartado de optimización para ahorrar lo máximo posible y no utilizar durante tanto tiempo la fresadora de 5 ejes, y que el precio no sea tan elevado.



# **CAPÍTULO 9: Proyección futura y Conclusión**

Llegamos al final del presente trabajo de estudios, en este último capítulo se va a dar paso a los temas que se pedían en el proyecto y se han resuelto satisfactoriamente. Por otra parte, habrá un apartado con la optimización del proyecto. Por último, se comentarán las posibles líneas de investigación futura de este proyecto o posibles vías para realizar otro similar.

## 9.1 Objetivos

Existe una serie de objetivos que se debían resolver para completar el trabajo realizado en el presente proyecto. Estos son los siguientes:

### 9.1.1 Diseño 3D

El primero de ellos sin orden de prioridad, es el diseño 3D de la parte inferior y superior de los nodos que van a mantener rígida la estructura mediante la presión de sus barras. Como se ha visto en el capítulo 6 de Diseño 3d, se han desarrollado diferentes prototipos en el programa SolidWorks, obteniendo un diseño final que, pese a su simplicidad, cumple perfectamente su función y su mecanizado no es dificultoso ni se gasta demasiado material.

### 9.1.2 Ángulo cenital y azimut

En segundo lugar, nos encontramos con los cálculos matemáticos para obtener los ángulos con los que estarán direccionadas las barras creando así la estructura tipo concha. Este objetivo también se ha resuelto satisfactoriamente y, además, con el Excel que se ha creado para poder realizar todos los cálculos, se puede añadir una estructura totalmente diferente a la nuestra, tanto con forma sinusoidal, hasta una estructura tipo toroide, solo deberíamos tener las coordenadas de los puntos y las longitudes de barras para poder obtener todos los ángulos a la hora del mecanizado. Este archivo nos va a facilitar y nos va a ahorrar horas las matrices y los cambios de giros que nos encontramos para poder realizar el código numérico a la perfección.

### 9.1.3 Programación código numérico

Uno de los objetivos más importantes sin duda es el código numérico del programa a utilizar para el mecanizado de las piezas. Como se ha podido comprobar en anteriores capítulos, las dos piezas que parten del nodo se han fabricado y mecanizado correctamente. Las piezas encajan entre ellas y al ser presionadas incluyendo las barras estas se mantienen fijas. En el Anexo III se encuentra el código numérico tanto de la parte inferior y superior.

### 9.1.4 Centro de mecanizado

Este apartado no entra en la lista de objetivos, pero debo de ponerlo porque ha sido un largo proceso de aprendizaje desde que se empezó este proyecto hasta el proceso de mecanizado. Para lograr esto, he aprendido a usar el centro de mecanizado desde cero y, aplicando los valores y conocimientos aportados en diferentes asignaturas dadas en el Grado de Ingeniería Mecánica, ha sido más moderada tanta información. En el transcurso, han surgido muchos errores, desde hacer mal el calibrado de la máquina por un simple fallo, a no programar una función y que saltase el aviso de que era inviable el mecanizado, hasta a última hora, que se desgastó la herramienta por una mayor velocidad a lo debido y se tuvo que cambiar esta por otra de diámetro menor, cambiando así las coordenadas por donde debía de pasar la herramienta. Pero después de todo, me quedo con lo logrado, por obtener la pieza, y por haber aprendido a usar una fresadora de 5 ejes que jamás me imaginaba que lo iba a hacer.

## 9.2 Optimización

Llegados a este punto, se va a implementar una pequeña sección para explicar como se podría disminuir los costes del mecanizado. Como el coste principal se encuentra en la parte de mecanizado en el fresado de 5 ejes, se va a complementar un método de fabricación más rentable. Se empieza por la cajera de la parte superior, que no hay por qué hacerla realmente en el centro de mecanizado, se puede hacer perfectamente un avellanado en el torno obteniendo un acabado similar, pero con la misma funcionalidad. Para las ranuras, habría que buscar un procedimiento más eficiente, pero el más práctico con las herramientas que se encuentran en el taller, es usar la sierra automática, marcando previamente el paso de la sierra. Al final, solo se usaría el centro de mecanizado para las facetas de los nodos. Con esto se ahorraría una gran parte de uso en la fresa, esto es así, que cada nodo pasaría de pasar más de 15 minutos dentro de la máquina, a pasar tan solo 6 minutos aproximadamente.

Para ver cuanto dinero se ahorraría con esta actualización del mecanizado, se agrega la siguiente tabla sobre los cambios de tiempo en cada máquina.

	Unidades	Sierra (min/ud)	Torno (min/2*ud)	Fresadora (min/2*ud)
Nodos	1226	5	20	12
Barras	1156	0,5	-	-
TIEMPO TOTAL (minutos)		6708	12260	7356
TIEMPO TOTAL (horas)		111,80	204,33	122,60
TIEMPO TOTAL (días)		4,66	8,51	5,11
<b>TIEMPO TOTAL DEL MECANIZADO DE LA ESTRUCTURA (Días)</b>				<b>18,28</b>

Tabla 9. 2. 1. Tiempo de mecanizado optimizado

Se ha aproximado una duración de 5 min que se necesitará en la sierra para cortar los cilindros como para tener el acabado de las ranuras, se ha aumentado de 16 a 20 min el tiempo de mecanizado en el torno para poder hacer la cajera circular interior y, el más importante, con el mayor coste de mecanizado, ha disminuido en un 62,5 %, de 32 a 12 minutos. En comparación con la tabla X, se puede ver que hasta se ha reducido los días de fabricación de todos los nodos, esto también hará que los operarios tarden alrededor de 27 días para obtener todos los componentes de la estructura.

En cuanto al costo de la tasa horaria junto a la del operario, se puede ver en la siguiente tabla la disminución del precio.

Máquina	Horas de uso	Tasa horaria (€/h)	Total (€)
Sierra	111,80	30	3354
Torno	204,33	30	6130
Fresadora	122,60	60	7356
<b>COSTE TOTAL (€)</b>			<b>16840</b>

Tabla 9. 2. 2. Coste de la tasa horaria optimizada

Como vemos, se ha ahorrado casi diez mil euros solo por cambiar el mecanizado de las cajeras y de las ranuras de máquina. Con la suma de la tasa horaria, se calcula el nuevo precio que cuesta la estructura, y este es de **22.733,03**, un precio más accesible y con un mayor porcentaje de obtener más beneficios.

El resumen de la optimización sería dejar el proceso de mecanizado de 5 ejes solo para la parte de fabricación, que con otra máquina no se podría conseguir a diferencia del centro de mecanizado, es decir, los ángulos que se necesitan para el mecanizado de las caras de cada nodo, y lo demás para máquinas de 3 ejes.

### 9.3 Investigación futura

La metodología que se ha aplicado ha resultado exitosa, no obstante, habría algunos estudios que podría ser objeto de mejoras comentados en las siguientes líneas.

Este proyecto se ha basado en obtener los ángulos para poder mecanizar las caras de unas piezas para formar una estructura de tipo concha, pero un segundo estudio más extenso, sería examinar todos los esfuerzos de cada barra, y comprobar si se mantiene la estructura totalmente rígida y estable para poder llevar este trabajo no solo al jardín de tu casa, sino también a la calle, a una piscina cubierta o incluso a un edificio, como podría ser el patio de la Universidad Politécnica de Cartagena.

La resistividad de la estructura podría entrar en otro punto del anterior estudio, para comprobar cuántos kilogramos puede llegar a soportar y cuanto resiste frente a viento, lluvia y nieve después de colocar la cubierta que cubre toda la estructura, otro punto que no se ha hablado en el presente proyecto pero que podría ser visible en el siguiente estudio.

A partir de aquí se da por finalizado el estudio del presente proyecto y se abren las puertas para próximas vías en cuestión. De esta manera, se cierra un proyecto que ha servido para implementar una nueva forma de crear estructuras con la tecnología de máquinas herramientas con 5 ejes.

# Bibliografía

- [1] LOS INVERNADEROS. “Lo que todos debemos saber sobre los invernaderos”. Disponible en: <http://los-invernaderos-123.blogspot.com/2010/10/lo-que-todos-debemos-saber-de-los.html> [Consulta: 12 de abril de 2021]
- [2] HORTOINFO. *Andalucía ya supera las 36.000 hectáreas de invernadero, el 86% en la provincia de Almería.* Disponible en: <https://www.hortoinfo.es/index.php/6498-inv-and-111217> [Consulta: 12 de abril de 2021].
- [3] FRESHPLAZA. *España, potencia mundial en producción y exportación hortofrutícola.* Disponible en: <https://www.freshplaza.es/article/9175273/espana-potencia-mundial-en-produccion-y-exportacion-hortofruticola/> [Consulta: 12 de abril de 2021]
- [4] NOVAGRIC. *Tipos de invernaderos.* Disponible en: <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos> [Consulta: 12 de abril de 2021]
- [5] BERGER. *¿Por qué cultivar en invernadero? Ventajas y desventajas.* Disponible en: <https://www.berger.ca/es/recursos-para-los-productores/tips-y-consejos-practicos/cultivar-invernadero-ventajas-desventajas/> [Consulta: 12 de abril de 2021]

- [6] AVELINO, Ricardo M., BAVEREL, Olivier. Structural análisis of gridshells designed from singularities. Actas de IASS Annual Symposium, Hamburgo, Alemania, 2017. Disponible en: [\(PDF\) Structural analysis of gridshells designed from singularities \(researchgate.net\)](#)
- [7] HARRIS, R., ROYNON, J. The Savill Garden Gridshell design and construction. In: 10th World Conference of Timber Engineering. Universidad de Bath, Inglaterra, 2008. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Savill-Garden-Gridshell-design-and-construction-Harris-Haskins/19439dae02979ef5621a8176360bfc3d9d3b6354#related-papers>
- [8] GARCÍA-ABRIL, A. (2020). “La gran cubierta de vidrio y acero” en El cultural. Disponible en: <https://elcultural.com/La-gran-cubierta-de-vidrio-y-acero> [Consulta: 5 de mayo de 2021]
- [9] LÓPEZ, Aitziber; PUENTE, Iñigo; SERNA, Miguel A. Numerical model and experimental test son single-layer latticed domes with semi-rigid joints. Universidad de Navarra, San Sebastián, España, 2006. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045794906003956>
- [10] PVEDUCATION. *El ángulo de elevación*. Disponible en: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/el-%C3%A1ngulo-de-elevaci%C3%B3n> [Consulta: 9 de mayo de 2021]
- [11] SÁNCHEZ REINOSO, Horacio Tomás; ORTIZ, Óscar de Francisco. Fabricación asistirá por ordenador. Programación Avanzada de CNC. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.
- [12] BOUNAKI, El Houcine. Metodología para la programación de trayectorias en el mecanizado de superficies libres con máquinas herramientas CNC de 5 ejes [en línea]. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2019. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/xmlui/handle/10317/7881?show=full>
- [13] SOLID-BI. *Solidworks, qué es y para qué sirve*. Disponible en: <https://solid-bi.es/solidworks/> [Consulta: 25 de mayo de 2021]

- [14] FAGOR AUTOMOCION. *CNC 8065 para fresadoras*. Disponible en: <https://www.fagorautomation.com/p/cnc/fresadoras/cnc-8065-m/> [Consulta: ]

# Anexos

## Anexo I: Coordenadas de los nodos en la cúpula

## Anexo 1.1: Eje X

1,57079637	1,51417303	1,45178473	1,38374805	1,31023645	1,23148084	1,14779341	1,05957949	0,96735662	0,87177724	0,77365679	0,67400235	0,57406104	0,47534087	0,379659	0,2891548	0,20629486	0,13380548	0,07453194	0,03119238	0,00603972	
1,56761336	1,51082945	1,44827056	1,38005435	1,30635309	1,22740448	1,14352453	1,05512416	0,96272838	0,8670001	0,76876903	0,66906422	0,569152	0,47057498	0,37518862	0,28518364	0,20307603	0,13163753	0,0737326	0,03198717	0,00793266	
1,55807722	1,50081432	1,43774641	1,36899519	1,29473913	1,21522427	1,13077974	1,0418334	0,94893485	0,85277927	0,75423992	0,65440363	0,55461144	0,45650038	0,3620396	0,27354527	0,19364633	0,1251507	0,07070584	0,03193558	0,00705952	
1,54222655	1,48417222	1,42026567	1,35063553	1,27547085	1,19503415	1,1096766	1,01985705	0,92616683	0,82935822	0,7303791	0,63041389	0,53092676	0,43370375	0,34087873	0,25491652	0,17849813	0,11419961	0,06374419	0,02647814		
1,52012551	1,46097815	1,39591718	1,32508266	1,24868107	1,16699898	1,08042169	0,98945516	0,89475352	0,79715252	0,69770867	0,59774363	0,49888742	0,40310985	0,31271338	0,2302355	0,15816352	0,09830417	0,05064698	0,01198748		
1,49186397	1,43133712	1,36482656	1,29248929	1,21455693	1,13135171	1,04330719	0,95099497	0,8551563	0,75674015	0,65694624	0,55726862	0,45952928	0,3658779	0,27871001	0,20042121	0,13287671	0,07650685	0,02924076			
1,45755613	1,39538324	1,3271544	1,25305068	1,17333949	1,08839166	0,998707	0,90494496	0,80796093	0,7088477	0,60897875	0,51004231	0,41404599	0,32324994	0,2399576	0,16606855	0,10233285	0,04746724				
1,41734123	1,35328019	1,28309691	1,20700622	1,12532377	1,03848588	0,94707906	0,85187566	0,75387287	0,65433532	0,55482912	0,45723012	0,36367035	0,27636084	0,19721384	0,12721618	0,06567139	0,00976561				
1,37138224	1,30522084	1,23288631	1,15463996	1,07086074	0,98206955	0,8889631	0,79245234	0,69370216	0,59416604	0,49559748	0,40000683	0,3095127	0,22602142	0,15069434	0,08328833	0,0217066					
1,31986535	1,2514267	1,17679095	1,09628022	1,01035523	0,9196434	0,82497555	0,72742486	0,6283403	0,52936035	0,43238005	0,33942544	0,2523815	0,17253597	0,10000136	0,03326935						
1,26299942	1,19214725	1,11511397	1,0322994	0,94426632	0,85177124	0,75580108	0,6576072	0,55872005	0,46092433	0,36615399	0,27625999	0,1926184	0,11562195	0,04425044							
1,20101476	1,12765992	1,04819345	0,963112	0,87310183	0,77906948	0,68217331	0,58384186	0,48575407	0,38975224	0,29764342	0,21086159	0,13001983	0,0545042								
1,13416278	1,05826879	0,97640139	0,88917387	0,79741567	0,70219791	0,60485137	0,50695384	0,41025659	0,31651527	0,22719714	0,14308718	0,06390949									
1,06271422	0,98430353	0,90014046	0,810974	0,71779144	0,62183052	0,52457112	0,42767519	0,33284053	0,24154836	0,15471603	0,07234784										
0,98695886	0,90611738	0,81984055	0,72902715	0,634826	0,53862286	0,44199085	0,34656599	0,25382778	0,16479306	0,07969792											
0,90720356	0,8240841	0,73595089	0,64385784	0,5491001	0,45316353	0,3576194	0,26393306	0,17319445	0,08582872	0,00140933											
0,82377166	0,73859453	0,64893109	0,55597901	0,46113977	0,36591747	0,27175334	0,17978857	0,09060219	0,00402544												
0,73700118	0,65004891	0,55923325	0,46586236	0,37137267	0,27717423	0,18444113	0,09387564	0,00552849													
0,6472438	0,55885023	0,46728542	0,37390709	0,28008848	0,18702264	0,09550853	0,00578161														
0,55486333	0,46539268	0,37346819	0,28041077	0,18742065	0,09537236	0,00465463															
0,46023414	0,37005132	0,27809802	0,18555923	0,09336769	0,00203765																
0,36373973	0,27317363	0,18142192	0,08944505																		
0,26577118	0,17507809	0,08363351																			
0,16672553	0,07606351																				
0,06700418																					



### Anexo 1.3: Eje Z

-6,8662E-08	0,08242436	0,16057615	0,23386343	0,30165184	0,36327225	0,41800937	0,46510684	0,50377035	0,53317386	0,55247092	0,56081355	0,55738235	0,54143459	0,51237291	0,46984071	0,41385639	0,34496999	0,26442927	0,17430729	0,07751989	
-6,8662E-08	0,08231407	0,16032937	0,2334495	0,30103755	0,36241445	0,41685864	0,46360651	0,50185585	0,53077167	0,5494982	0,55717862	0,55298668	0,53617549	0,50615007	0,46256992	0,40548605	0,33550701	0,25397781	0,16310805	0,06604424	
-6,8662E-08	0,08198142	0,15958591	0,23220325	0,29918101	0,35982275	0,41338682	0,45908773	0,49609876	0,52355945	0,5405882	0,54630476	0,53986633	0,52052355	0,48770478	0,44113624	0,38100284	0,30814469	0,22426748	0,13209012	0,03523361	
-6,8662E-08	0,08142266	0,15833755	0,23011194	0,29606822	0,35548079	0,4075762	0,45153376	0,48648921	0,51154363	0,52577949	0,52828866	0,51821804	0,49484161	0,45766833	0,40659642	0,34211659	0,26554561	0,17921731	0,08642104		
-6,8662E-08	0,08063131	0,15657099	0,22715528	0,29167143	0,34935558	0,3993915	0,44091275	0,47300851	0,49473539	0,5051403	0,50329894	0,48837909	0,45973924	0,41707444	0,36061534	0,2913667	0,21131317	0,12342086	0,03119694		
-6,8662E-08	0,07959753	0,15426609	0,22330262	0,2859512	0,3414003	0,3887831	0,42718139	0,45563444	0,47315818	0,47877878	0,47158924	0,45083982	0,41607386	0,367318	0,30531362	0,23173055	0,14921908	0,06111759			
-6,8662E-08	0,07830911	0,15139738	0,21851555	0,27885693	0,3315562	0,37569121	0,41029045	0,43434909	0,44685864	0,44685805	0,43351668	0,40626019	0,364948	0,31009471	0,24308415	0,16626276	0,08275786				
-6,8662E-08	0,07675062	0,14793368	0,21274696	0,27032802	0,31975394	0,36004713	0,39018932	0,40914774	0,41592154	0,40961775	0,38956714	0,35548922	0,30770007	0,24732454	0,17641838	0,09787343	0,01505517				
-6,8662E-08	0,07490349	0,14383705	0,20594075	0,26029339	0,30591515	0,34177911	0,36683577	0,38005435	0,38049251	0,367403	0,34038559	0,29958227	0,24588308	0,18106964	0,10778519	0,02926873					
-6,8662E-08	0,07274558	0,13906334	0,19803302	0,24867499	0,28995824	0,32082099	0,3402102	0,34714356	0,34080809	0,32070073	0,28680915	0,23981236	0,18123521	0,1134695	0,03958667						
-6,8662E-08	0,07025196	0,13356358	0,1889541	0,23539102	0,27180517	0,29712537	0,31033713	0,31057167	0,29723579	0,27018178	0,2298976	0,17767151	0,11564696	0,04670217							
-6,8662E-08	0,06739475	0,12728426	0,17863193	0,22036393	0,25139564	0,27068517	0,27731636	0,27061772	0,25032076	0,21674308	0,17095424	0,11485945	0,05112841								
-6,8662E-08	0,06414387	0,12016986	0,16699633	0,20352855	0,22870238	0,24155979	0,24136108	0,22773126	0,2008345	0,16154143	0,11153011	0,05325697									
-6,8662E-08	0,0604685	0,11216822	0,15399064	0,18485285	0,20376198	0,20991729	0,20284988	0,18258691	0,14981748	0,10600731	0,05339956										
-6,8662E-08	0,05633985	0,10323625	0,13958395	0,16435929	0,17670919	0,17608066	0,16237895	0,13612914	0,09859856	0,05182373											
-6,8662E-08	0,05173512	0,09335186	0,12379258	0,14215833	0,14782237	0,14058058	0,12081	0,0895957	0,04877498	0,00085522											
-6,8662E-08	0,04664309	0,08252809	0,10670719	0,11848897	0,11757234	0,10420077	0,07929228	0,04449641	0,00213543												
-6,8662E-08	0,04107405	0,07083555	0,08852687	0,09376154	0,08666363	0,06799861	0,03924048	0,00253171													
-6,8662E-08	0,03507018	0,05842512	0,06959312	0,06859218	0,05605032	0,03327869	0,0022479														
-6,8662E-08	0,02871995	0,04555422	0,05041706	0,04381328	0,02690567	0,00150278															
-6,8662E-08	0,02217049	0,03260268	0,03168229	0,02043848	0,00052987																
-6,8662E-08	0,0156345	0,02007019	0,01420804																		
-6,8662E-08	0,00938473	0,00854097																			
-6,8662E-08	0,00372983																				
-6,8662E-08																					

## ANEXO II: Programación en Excel del mecanizado

## Programación nodo inferior

### MECANIZADO NODOS INFERIORES

DATOS		Unidad (mm)	NODO REFERENCIA		COORDENADAS	VECTORES					VECTORES NORMALIZADOS				VECTOR NORMAL			
			FILA	COLUMNA		NODO P	N	O	S	E	N	O	S	E	E-O	N-S	N	NormN
Radio de centro plato de garras	147,1	Rb	4	3	X	1,420265675	1,448270559	1,542226553	1,36482656	1,27547085	0,14011128	0,61022092	-0,27736736	-0,72455801	-0,2667557	0,083444	0,115427	0,73223784
Altura de la pieza	63	H			Y	0,29783234	0,099937975	0,29822585	0,489822954	0,29730549	-0,99008561	0,00196889	0,96054798	-0,00263635	-0,00092036	-0,38988498	0,02632254	0,1669831
Altura total	210,1	Z			Z	0,158337548	0,160329372	-6,86617E-08	0,154266089	0,29606822	0,00996529	-0,79222885	-0,02036991	0,68920878	0,29606829	0,00606328	0,10408084	0,66026085
Diámetro de la pieza	50	Dw			MÓDULO	1,459770348	0,199876013	0,199863483	0,199876132	0,19983883	1	1	1	1				0,15763594
Diámetro de la herramienta	16	Dt																
Distancia de seguridad en x	8	Dseg																
Distancia al plano de partida	4	Dsz																

NORMALES A N Y BARRAS				NORMALES A SUPERFICIES				VECTORES NORMALIZADOS NOSMALES A LA SUPERF.				ÁNGULO	ROTACIÓN ALREDEDOR DEL EJE Z		COMP. 1	ROTACIÓN ALREDEDOR DEL EJE Y		COMP. 2		
N1	O1	S1	E1	NN	NO	NS	NE	NN'	NO'	NS'	NE'									
-0,655378805	0,13358881	0,63761366	-0,1168269	-0,74010552	-0,778567078	-0,71666282	-0,677221104	0,003522693	-0,075235898	0,00125102	0,074965675	C	-0,9749699	-0,2223369	0	-0,75103636	0,66026085	0	0,75103636	0
-0,08521303	-0,98300493	0,16821919	0,98306203	-0,11138674	-0,167132581	-0,2209208	-0,166782917	0,056042481	0,010184353	-0,056139115	-0,01207193		0,2223369	-0,9749699	0	2,498E-16	0	1	0	2,498E-16
0,748374366	0,10045488	-0,7496652	-0,1190585	-0,66082043	-0,600113193	-0,65911702	-0,712593468	0,998422171	0,997113754	0,998422173	0,997113041		0	0	1	0,66026085	-0,75103636	0	0,66026085	1
0,998422171	0,99711375	0,99842217	0,99711304	0,99842217	0,997113754	0,99842217	0,997113041	1	1	1	1	B								
				2,99221261	2,930134898	2,84257225	2,900122531	-1,508021366	-3,007044879	1,548515734	0,15966209		0,8496303							
				-0,84749272	-0,924980355	-0,84976639	-0,774663207	0,056182638	0,075995203	0,056182605	0,076004597									

MATRIZ DE ROTACIÓN COMPUESTA			
-0,643734455	-0,14680035	0,75103636	
0,222336904	-0,9749699	0	
0,732237839	0,1669831	0,66026085	

POSICIÓN ENTRADA DESPUÉS DE GIRO EN B				POSICIÓN CENTRO DESPUÉS DE POSICIÓN ENTRADA			
41,03950807	41,072365	41,03950802	41,07238295	-11,79776339	-15,95122793	-11,79775636	-15,9531961
0	0	0	0	0	0	0	0
-0,331501938	-0,60640027	-0,331501543	-0,606550137	-0,331501938	-0,606400271	-0,331501543	-0,60655014

ÁNGULOS DE GIRO	N	O	S	E
C	-86,403	-172,291	88,723	9,148
B	3,219	4,354	3,219	4,355

DATOS PARA LAS PASADAS DEL MECANIZADO					
	N	O	S	E	
ÁNGULO B	3,219	4,354	3,219	4,355	
ÁNGULO C	-86,403	-172,291	88,723	9,148	
X CENTRO	-11,798	-15,951	-11,798	-15,953	
Z CENTRO	-0,332	-0,606	-0,332	-0,607	
X SEG.	41,04	41,072	41,04	41,072	
Nº PASADAS	4				

Bloque inicial	N1F300S1000M3
bloque final	Z50M5 X0Y0B0C0M30

DATOS PARA LAS RANURAS DEL MECANIZADO	
PROFUNDIDAD	1
DISTANCIA I	17,93
Y1	2,25
Y2	-2,25

CÓDIGO NUMÉRICO PLANOS NODO INFERIOR						
POSICIONES	X	Y	Z	B	C	FUNCIÓN PROGRAMA
1	0	0	50	0	0	GO N1F300S1000M3
2	41,04	20,5	50	3,219	-86,403	GO N10G0X0Y0Z50B0C0
3	41,04	20,5	-0,332	3,219	-86,403	GO N20G0X41,04Y20,5Z50B3,219C-86,403
4	-11,798	20,5	-0,332	3,219	-86,403	GO N30G0X41,04Y20,5Z-0,332B3,219C-86,403
5	-11,798	20,5	3,668	3,219	-86,403	GO N40G1X-11,798Y20,5Z-0,332B3,219C-86,403
6	41,04	20,5	3,668	3,219	-86,403	GO N50G0X-11,798Y20,5Z3,668B3,219C-86,403
7	41,04	8	-0,332	3,219	-86,403	GO N60G0X41,04Y20,5Z3,668B3,219C-86,403
8	-11,798	8	-0,332	3,219	-86,403	GO N70G0X41,04Y8Z-0,332B3,219C-86,403
9	-11,798	8	3,668	3,219	-86,403	GO N80G1X-11,798Y8Z-0,332B3,219C-86,403
10	41,04	8	3,668	3,219	-86,403	GO N90G0X-11,798Y8Z3,668B3,219C-86,403
11	41,04	-4,5	-0,332	3,219	-86,403	GO N100G0X41,04Y8Z3,668B3,219C-86,403
12	-11,798	-4,5	-0,332	3,219	-86,403	GO N110G0X41,04Y-4,5Z-0,332B3,219C-86,403
13	-11,798	-4,5	3,668	3,219	-86,403	GO N120G1X-11,798Y-4,5Z-0,332B3,219C-86,403
14	41,04	-4,5	3,668	3,219	-86,403	GO N130G0X-11,798Y-4,5Z3,668B3,219C-86,403
15	41,04	-17	-0,332	3,219	-86,403	GO N140G0X41,04Y-4,5Z3,668B3,219C-86,403
16	-11,798	-17	-0,332	3,219	-86,403	GO N150G0X41,04Y-17Z-0,332B3,219C-86,403
17	-11,798	-17	3,668	3,219	-86,403	GO N160G1X-11,798Y-17Z-0,332B3,219C-86,403
18	41,04	-17	3,668	3,219	-86,403	GO N170G0X-11,798Y-17Z3,668B3,219C-86,403
19	41,04	-29,5	-0,332	3,219	-86,403	GO N180G0X41,04Y-17Z3,668B3,219C-86,403
20	-11,798	-29,5	-0,332	3,219	-86,403	GO N190G0X41,04Y-29,5Z-0,332B3,219C-86,403
21	-11,798	-29,5	3,668	3,219	-86,403	GO N200G1X-11,798Y-29,5Z-0,332B3,219C-86,403
22	41,04	-29,5	3,668	3,219	-86,403	GO N210G0X-11,798Y-29,5Z3,668B3,219C-86,403
23	0	0	50	3,219	-86,403	GO N220G0X41,04Y-29,5Z3,668B3,219C-86,403
24	0	20,5	50	4,354	-172,291	GO N230G0X0Y0Z50B3,219C-86,403
25	41,072	20,5	-0,606	4,354	-172,291	GO N240G0X0Y20,5Z50B4,354C-172,291
26	-15,951	20,5	-0,606	4,354	-172,291	GO N250G0X41,072Y20,5Z-0,606B4,354C-172,291
27	-15,951	20,5	3,394	4,354	-172,291	GO N260G1X-15,951Y20,5Z-0,606B4,354C-172,291
28	41,072	20,5	3,394	4,354	-172,291	GO N270G0X-15,951Y20,5Z3,394B4,354C-172,291
29	41,072	8	-0,606	4,354	-172,291	GO N280G0X41,072Y20,5Z3,394B4,354C-172,291
30	-15,951	8	-0,606	4,354	-172,291	GO N290G0X41,072Y8Z-0,606B4,354C-172,291
31	-15,951	8	3,394	4,354	-172,291	GO N300G1X-15,951Y8Z-0,606B4,354C-172,291
32	41,072	8	3,394	4,354	-172,291	GO N310G0X-15,951Y8Z3,394B4,354C-172,291
33	41,072	-4,5	-0,606	4,354	-172,291	GO N320G0X41,072Y8Z3,394B4,354C-172,291
34	-15,951	-4,5	-0,606	4,354	-172,291	GO N330G0X41,072Y-4,5Z-0,606B4,354C-172,291
35	-15,951	-4,5	3,394	4,354	-172,291	GO N340G1X-15,951Y-4,5Z-0,606B4,354C-172,291
36	41,072	-4,5	3,394	4,354	-172,291	GO N350G0X-15,951Y-4,5Z3,394B4,354C-172,291
37	41,072	-17	-0,606	4,354	-172,291	GO N360G0X41,072Y-4,5Z3,394B4,354C-172,291
38	-15,951	-17	-0,606	4,354	-172,291	GO N370G0X41,072Y-17Z-0,606B4,354C-172,291
39	-15,951	-17	3,394	4,354	-172,291	GO N380G1X-15,951Y-17Z-0,606B4,354C-172,291
40	41,072	-17	3,394	4,354	-172,291	GO N390G0X-15,951Y-17Z3,394B4,354C-172,291
41	41,072	-29,5	-0,606	4,354	-172,291	GO N400G0X41,072Y-17Z3,394B4,354C-172,291
42	-15,951	-29,5	-0,606	4,354	-172,291	GO N410G0X41,072Y-29,5Z-0,606B4,354C-172,291
43	-15,951	-29,5	3,394	4,354	-172,291	GO N420G1X-15,951Y-29,5Z-0,606B4,354C-172,291
44	41,072	-29,5	3,394	4,354	-172,291	GO N430G0X-15,951Y-29,5Z3,394B4,354C-172,291
45	0	0	50	4,354	-172,291	GO N440G0X41,072Y-29,5Z3,394B4,354C-172,291
46	0	20,5	50	3,219	88,723	GO N450G0X0Y0Z50B4,354C-172,291
47	41,04	20,5	-0,332	3,219	88,723	GO N460G0X0Y20,5Z50B3,219C88,723
48	-11,798	20,5	-0,332	3,219	88,723	GO N470G0X41,04Y20,5Z-0,332B3,219C88,723
49	-11,798	20,5	3,668	3,219	88,723	GO N480G1X-11,798Y20,5Z-0,332B3,219C88,723
50	41,04	20,5	3,668	3,219	88,723	GO N490G0X-11,798Y20,5Z3,668B3,219C88,723
51	41,04	8	-0,332	3,219	88,723	GO N500G0X41,04Y20,5Z3,668B3,219C88,723
52	-11,798	8	-0,332	3,219	88,723	GO N510G0X41,04Y8Z-0,332B3,219C88,723
53	-11,798	8	3,668	3,219	88,723	GO N520G1X-11,798Y8Z-0,332B3,219C88,723
54	41,04	8	3,668	3,219	88,723	GO N530G0X-11,798Y8Z3,668B3,219C88,723
55	41,04	-4,5	-0,332	3,219	88,723	GO N540G0X41,04Y8Z3,668B3,219C88,723
56	-11,798	-4,5	-0,332	3,219	88,723	GO N550G0X41,04Y-4,5Z-0,332B3,219C88,723
57	-11,798	-4,5	3,668	3,219	88,723	GO N560G1X-11,798Y-4,5Z-0,332B3,219C88,723
58	41,04	-4,5	3,668	3,219	88,723	GO N570G0X-11,798Y-4,5Z3,668B3,219C88,723
59	41,04	-17	-0,332	3,219	88,723	GO N580G0X41,04Y-4,5Z3,668B3,219C88,723
60	-11,798	-17	-0,332	3,219	88,723	GO N590G0X41,04Y-17Z-0,332B3,219C88,723
61	-11,798	-17	3,668	3,219	88,723	GO N600G1X-11,798Y-17Z-0,332B3,219C88,723
62	41,04	-17	3,668	3,219	88,723	GO N610G0X-11,798Y-17Z3,668B3,219C88,723
63	41,04	-29,5	-0,332	3,219	88,723	GO N620G0X41,04Y-17Z3,668B3,219C88,723
64	-11,798	-29,5	-0,332	3,219	88,723	GO N630G0X41,04Y-29,5Z-0,332B3,219C88,723
65	-11,798	-29,5	3,668	3,219	88,723	GO N640G1X-11,798Y-29,5Z-0,332B3,219C88,723
66	41,04	-29,5	3,668	3,219	88,723	GO N650G0X-11,798Y-29,5Z3,668B3,219C88,723
67	0	0	50	3,219	88,723	GO N660G0X41,04Y-29,5Z3,668B3,219C88,723
						GO N670G0X0Y0Z50B3,219C88,723

68	0	20,5	50	4,355	9,148	GO	N680G0X0Y20,5Z50B4,355C9,148
69	41,072	20,5	-0,607	4,355	9,148	GO	N690G0X41,072Y20,5Z-0,607B4,355C9,148
70	-15,953	20,5	-0,607	4,355	9,148	G1	N700G1X-15,953Y20,5Z-0,607B4,355C9,148
71	-15,953	20,5	3,393	4,355	9,148	GO	N710G0X-15,953Y20,5Z3,393B4,355C9,148
72	41,072	20,5	3,393	4,355	9,148	GO	N720G0X41,072Y20,5Z3,393B4,355C9,148
73	41,072	8	-0,607	4,355	9,148	GO	N730G0X41,072Y8Z-0,607B4,355C9,148
74	-15,953	8	-0,607	4,355	9,148	G1	N740G1X-15,953Y8Z-0,607B4,355C9,148
75	-15,953	8	3,393	4,355	9,148	GO	N750G0X-15,953Y8Z3,393B4,355C9,148
76	41,072	8	3,393	4,355	9,148	GO	N760G0X41,072Y8Z3,393B4,355C9,148
77	41,072	-4,5	-0,607	4,355	9,148	GO	N770G0X41,072Y-4,5Z-0,607B4,355C9,148
78	-15,953	-4,5	-0,607	4,355	9,148	G1	N780G1X-15,953Y-4,5Z-0,607B4,355C9,148
79	-15,953	-4,5	3,393	4,355	9,148	GO	N790G0X-15,953Y-4,5Z3,393B4,355C9,148
80	41,072	-4,5	3,393	4,355	9,148	GO	N800G0X41,072Y-4,5Z3,393B4,355C9,148
81	41,072	-17	-0,607	4,355	9,148	GO	N810G0X41,072Y-17Z-0,607B4,355C9,148
82	-15,953	-17	-0,607	4,355	9,148	G1	N820G1X-15,953Y-17Z-0,607B4,355C9,148
83	-15,953	-17	3,393	4,355	9,148	GO	N830G0X-15,953Y-17Z3,393B4,355C9,148
84	41,072	-17	3,393	4,355	9,148	GO	N840G0X41,072Y-17Z3,393B4,355C9,148
85	41,072	-29,5	-0,607	4,355	9,148	GO	N850G0X41,072Y-29,5Z-0,607B4,355C9,148
86	-15,953	-29,5	-0,607	4,355	9,148	G1	N860G1X-15,953Y-29,5Z-0,607B4,355C9,148
87	-15,953	-29,5	3,393	4,355	9,148	GO	N870G0X-15,953Y-29,5Z3,393B4,355C9,148
88	41,072	-29,5	3,393	4,355	9,148	GO	N880G0X41,072Y-29,5Z3,393B4,355C9,148
89	0	0	50	4,355	9,148	GO	N890G0X0Y0Z50B4,355C9,148
90	0	0	50	0	0	GO	N900G0X0Y0Z50B0C0
91							N910Z50M5
92							N920X0Y0B0C0M30

CÓDIGO NUMÉRICO RANURAS NODO INFERIOR							
POSICIONES	X	Y	Z	B	C	FUNCIÓN	PROGRAMA
93	0	0	50	0	0	GO	N1F300S1000M3
94	41,04	2,25	50	3,219	-86,403	GO	N930G0X0Y0Z50B0C0
95	41,04	2,25	-1,332	3,219	-86,403	GO	N940G0X41,04Y2,25Z50B3,219C-86,403
96	6,132	2,25	-1,332	3,219	-86,403	G1	N950G0X41,04Y2,25Z-1,332B3,219C-86,403
97	6,132	2,25	3,668	3,219	-86,403	GO	N960G1X6,132Y2,25Z-1,332B3,219C-86,403
98	41,04	2,25	3,668	3,219	-86,403	GO	N970G0X6,132Y2,25Z3,668B3,219C-86,403
99	41,04	-2,25	-1,332	3,219	-86,403	GO	N980G0X41,04Y2,25Z3,668B3,219C-86,403
100	6,132	-2,25	-1,332	3,219	-86,403	G1	N990G0X41,04Y-2,25Z-1,332B3,219C-86,403
101	6,132	-2,25	3,668	3,219	-86,403	GO	N1000G1X6,132Y-2,25Z-1,332B3,219C-86,403
102	41,04	-2,25	3,668	3,219	-86,403	GO	N1010G0X6,132Y-2,25Z3,668B3,219C-86,403
103	0	0	50	3,219	-86,403	GO	N1020G0X41,04Y-2,25Z3,668B3,219C-86,403
104	0	0	50	0	0	GO	N1030G0X0Y0Z50B3,219C-86,403
105	41,072	2,25	50	4,354	-172,291	GO	N1040G0X0Y0Z50B0C0
106	41,072	2,25	-1,606	4,354	-172,291	GO	N1050G0X41,072Y2,25Z50B4,354C-172,291
107	1,979	2,25	-1,606	4,354	-172,291	G1	N1060G0X41,072Y2,25Z-1,606B4,354C-172,291
108	1,979	2,25	3,394	4,354	-172,291	GO	N1070G1X1,979Y2,25Z-1,606B4,354C-172,291
109	41,072	2,25	3,394	4,354	-172,291	GO	N1080G0X1,979Y2,25Z3,394B4,354C-172,291
110	41,072	-2,25	-1,606	4,354	-172,291	GO	N1090G0X41,072Y-2,25Z3,394B4,354C-172,291
111	1,979	-2,25	-1,606	4,354	-172,291	G1	N1100G0X41,072Y-2,25Z-1,606B4,354C-172,291
112	1,979	-2,25	3,394	4,354	-172,291	GO	N1110G1X1,979Y-2,25Z-1,606B4,354C-172,291
113	41,072	-2,25	3,394	4,354	-172,291	GO	N1120G0X1,979Y-2,25Z3,394B4,354C-172,291
114	41,072	-2,25	50	4,354	-172,291	GO	N1130G0X41,072Y-2,25Z3,394B4,354C-172,291
115	0	0	50	0	0	GO	N1140G0X41,072Y-2,25Z50B4,354C-172,291
116	41,04	2,25	50	3,219	88,723	GO	N1150G0X0Y0Z50B0C0
117	41,04	2,25	-1,332	3,219	88,723	GO	N1160G0X41,04Y2,25Z50B3,219C88,723
118	6,132	2,25	-1,332	3,219	88,723	G1	N1170G0X41,04Y2,25Z-1,332B3,219C88,723
119	6,132	2,25	3,668	3,219	88,723	GO	N1180G1X6,132Y2,25Z-1,332B3,219C88,723
120	41,04	2,25	3,668	3,219	88,723	GO	N1190G0X6,132Y2,25Z3,668B3,219C88,723
121	41,04	-2,25	-1,332	3,219	88,723	GO	N1200G0X41,04Y2,25Z3,668B3,219C88,723
122	6,132	-2,25	-1,332	3,219	88,723	G1	N1210G0X41,04Y-2,25Z-1,332B3,219C88,723
123	6,132	-2,25	3,668	3,219	88,723	GO	N1220G1X6,132Y-2,25Z-1,332B3,219C88,723
124	41,04	-2,25	3,668	3,219	88,723	GO	N1230G0X6,132Y-2,25Z3,668B3,219C88,723
125	41,04	-2,25	50	3,219	88,723	GO	N1240G0X41,04Y-2,25Z3,668B3,219C88,723
126	0	0	50	0	0	GO	N1250G0X41,04Y-2,25Z50B3,219C88,723
127	41,072	2,25	50	4,355	9,148	GO	N1260G0X0Y0Z50B0C0
128	41,072	2,25	-1,607	4,355	9,148	GO	N1270G0X41,072Y2,25Z50B4,355C9,148
129	1,977	2,25	-1,607	4,355	9,148	G1	N1280G0X41,072Y2,25Z-1,607B4,355C9,148
130	1,977	2,25	3,393	4,355	9,148	GO	N1290G1X1,977Y2,25Z-1,607B4,355C9,148
131	41,072	2,25	3,393	4,355	9,148	GO	N1300G0X1,977Y2,25Z3,393B4,355C9,148
132	41,072	-2,25	-1,607	4,355	9,148	GO	N1310G0X41,072Y-2,25Z3,393B4,355C9,148
133	1,977	-2,25	-1,607	4,355	9,148	G1	N1320G0X41,072Y-2,25Z-1,607B4,355C9,148
134	1,977	-2,25	3,393	4,355	9,148	GO	N1330G1X1,977Y-2,25Z-1,607B4,355C9,148
135	41,072	-2,25	3,393	4,355	9,148	GO	N1340G0X1,977Y-2,25Z3,393B4,355C9,148
136	41,072	-2,25	50	4,355	9,148	GO	N1350G0X41,072Y-2,25Z3,393B4,355C9,148
137	0	0	50	0	0	GO	N1360G0X41,072Y-2,25Z50B4,355C9,148
138							N1370G0X0Y0Z50B0C0
139							N1380Z50M5
							N1390X0Y0B0C0M30

## Programación nodo superior

### MECANIZADO NODOS SUPERIORES

DATOS	Unidad (mm)	VECTORES NORMALIZADOS NORMALES A LA SUPERFICIE				VECTORES NORMALIZADOS GIRADOS				VECTORES DE LAS RECTAS				UNITARIOS DE LAS RECTAS			
		NN	NO	NS	NE	NN'	NO'	NS'	NE'	n1^n2	n2^n3	n3^n4	n4^n1	n12	n23	n34	n41
Altura total	210,1																
Distancia de entrada	41	0,003522693	-0,075235898	0,00125102	0,074965675	0,003522693	-0,0752359	0,00125102	0,074965675	-0,04571244	-0,06614537	0,043924161	0,067933572	0,502051465	0,654151791	-0,51185894	-0,68899268
Radio herramienta	8	0,056042481	0,010184353	-0,056139115	-0,01207193	-0,05604248	-0,01018435	0,056139115	0,01207193	-0,07862971	0,076364598	0,073599984	-0,07133487	0,863575848	-0,75521598	-0,85767853	0,723489152
	0	0,998422171	0,997113754	0,998422173	0,997113041	0,998422171	0,997113754	0,998422173	0,997113041	-0,00425228	-0,00421094	-0,0041934	-0,00424379	0,046702048	0,041644508	0,048866763	0,043041149
Punto de mecanizado	0	1	1	1	1					0,091051313	0,101116238	0,085813019	0,098598395	1	1	1	1
	-2																

### RESOLUCIÓN PRIMER PUNTO PARA EL MECANIZADO

PRODUCTO VECTORIAL NORMALIZADOS Y 1ª RECTA				DISTANCIA DE SEGURIDAD Y RECTAS				PUNTO R'			
n1^n12	n2^n23	n3^n34	n4^n41	12	23	34	41	1'	2'	3'	4'
-0,864830571	0,752612114	0,859068599	-0,720880878	20,58411007	26,82022341	-20,9862166	-28,2486997	14,2708469	32,31429185	-14,7150159	-33,5111301
0,501094797	0,65539691	-0,511112451	-0,69023019	35,40660977	-30,963855	-35,1648198	29,66305522	39,06460178	-26,1794576	-38,8959407	24,62437483
0,031178322	0,063481465	0,027662335	0,062554324	-0,08521603	-0,29257518	0,003537282	-0,23531291	0,142385721	0,170839515	0,20547233	0,221333658
1	1	1	1								

### RESOLUCIÓN SEGUNDO PUNTO PARA EL MECANIZADO

PRODUCTO VECTORIAL NORMALIZADOS Y 2ª RECTA				PUNTO R''			
n1^n41	n2^n12	n3^n23	n4^n34	1''	2''	3''	4''
-0,724759742	-0,861558986	0,756362261	0,855792364	-22,9579536	26,87349066	21,29877891	-27,2335009
-0,688057183	0,504116092	0,653067554	-0,514044557	34,68587266	31,7265623	-35,7312481	-31,4122945
-0,036064229	-0,059858835	-0,037668293	-0,058117325	0,027955962	0,351753465	-0,01759664	0,427793752
1	1	1	1				

### RESOLUCIÓN DEL PUNTO CENTRAL PARA EL MECANIZADO

UNITARIOS DE LAS RECTAS				INTERSECCIÓN DE LAS RECTAS (RESOLUCIÓN DE INTERSECCIÓN DE 2 ECUACIONES CON 2 INCÓGNITAS)				PUNTO R'''				
n41	n12	n23	n34	1	2	3	4	1'''	2'''	3'''	4'''	
-0,68899268	0,502051465	0,654151791	-0,51185894	0,723489152	0,688992675	7,288481846	0,863575848	-0,50205147	7,278930405	-0,75521598	-0,65415179	7,28848186
0,723489152	0,863575848	-0,75521598	-0,85767853	0,863575848	-0,502051465	-7,288481846	-0,75521598	-0,65415179	-7,2789304	-0,85767853	0,511858943	7,278925198
0,043041149	0,046702048	0,041644508	0,048866763					0,723489152	0,688992675	-7,2789252		

PUNTOS DEL MECANIZADO CON ÁNGULOS RESPECTIVOS

Puntos	1'	1''	1'''	1'4''	2'	2''	2'''	2'2''
x	14,2708469	-1,421916439	-22,95795358	-4,34355334	32,31429185	8,914540241	26,87349066	29,59389126
y	39,06460178	12,0715695	34,68587266	36,87523722	-26,17945756	0,835474591	31,7265623	2,773552369
z	210,2423857	208,7826067	210,127956	210,1851708	210,2708395	208,7811682	210,4517535	210,3612965
B	3,219	0,056182638			4,354	0,075995203		
C	-86,403	-1,508021366			-172,291	-3,00704488		

Puntos	3'	3''	3'''	3'3''	4'	4''	4'''	4'4''
x	-14,7150159	1,094429436	21,29877891	3,29188152	-33,51113011	-9,09319192	-27,2335009	-30,3723155
y	-38,8959407	-12,40539668	-35,73124814	-37,3135944	24,62437483	-1,01612036	-31,4122945	-3,39395984
z	210,3054723	208,7961573	210,0824034	210,1939378	210,3213337	208,7959553	210,5277938	210,4245637
B	3,219	0,056182605			4,355	0,076004597		
C	88,723	1,548515734			9,148	0,15966209		



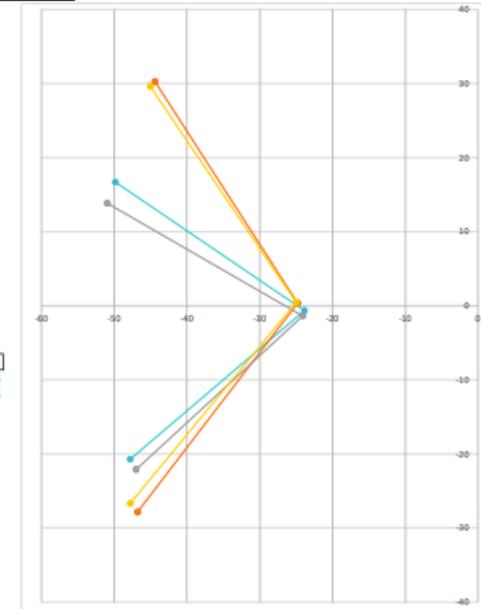
PUNTOS DEL MECANIZADO GIRADOS PARA LA FABRICACIÓN DEL NODO

Posición de 0 en B	C	-1,508021366	-3,007044879	1,548515734	0,15966209
0	B	0,056182638	0,075995203	0,056182605	0,076004597
0	C	-86,403	-172,291	88,723	9,148
210,1	B	3,219	4,354	3,219	4,355

Giro en C 1				Giro en C 2				Giro en C 3				Giro en C 4			
0,062733739	-0,9980303	0	0,056153086	-0,990962095	-0,134142186	0	0,075922075	0,02227875	0,999751798	0	0,056153053	0,987281062	0,158984603	0	0,075931442
0,998030299	0,062733739	0	-3,4694E-18	0,134142186	-0,990962095	0	-1,04083E-17	-0,9997518	0,02227875	0	2,81893E-18	-0,1589846	0,987281062	0	0
0	0	1	0,998422171	0	0	1	0,997113754	0	0	1	0,998422173	0	0	1	0,997113041

Giro en B 1				Giro en B 2				Giro en B 3				Giro en B 4			
0,998422171	0	-0,05615309	0	0,997113754	0	-0,075922075	1,38778E-17	0,998422173	0	-0,05615305	6,93889E-18	0,997113041	0	-0,07593144	1,38778E-17
0	1	0	-3,4694E-18	0	1	0	-1,04083E-17	0	1	0	2,81893E-18	0	1	0	0
0,056153086	0	0,998422171	1	0,075922075	0	0,997113754	1	0,056153053	0	0,998422173	1	0,075931442	0	0,997113041	1

Puntos	1'	1''	1'''	1'4''	2'	2''	2'''	2'2''	3'	3''	3'''	3'3''	4'	4''	4'''	4'4''
x	-49,8380481	-23,8416318	-47,8002303	-48,8191392	-44,39237888	-24,77132287	-46,75526884	-45,5838239	-50,9615399	-24,0829465	-46,9890226	-48,9752813	-45,0557973	-24,9668774	-47,7748302	-46,4153138
y	16,69340613	-0,661821	-20,7367588	-2,02167633	30,27755987	0,367892266	-27,83495185	1,221304006	13,84481065	-1,37053452	-22,08954	-4,1223647	29,63893267	0,442481122	-26,6830562	1,477938258
z	-2,32834628	-2,32834628	-2,32834628	-2,32834628	-2,600627779	-2,600627779	-2,600627779	-2,60062778	-2,32834589	-2,32834589	-2,32834589	-2,32834589	-2,60077622	-2,60077622	-2,60077622	-2,60077622



CÓDIGO NUMÉRICO CICLO FIJO CIRCULAR Y PLANOS

puntos	x	y	z	b	c	función G	N10G40F300S1000M3
40		0	0	50	0	0 G0	N20G0X0Y0Z50B0C0
50	-49,838	16,693		50	3,219	-86,403 G1	N30G88Z5I-5J-17,92B1C2D5
60	-49,838	16,693	-2,328		3,219	-86,403 G1	N40G80
70	-23,842	-0,662	-2,328		3,219	-86,403 G1	N50G1X-49,838Y16,693Z50B3,219C-86,403
80	-47,8	-20,737	-2,328		3,219	-86,403 G1	N60G1X-49,838Y16,693Z-2,328B3,219C-86,403
90	-48,819	-2,022	-2,328		3,219	-86,403 G1	N70G1X-23,842Y-0,662Z-2,328B3,219C-86,403
100	-23,842	-0,662	-2,328		3,219	-86,403 G1	N80G1X-47,8Y-20,737Z-2,328B3,219C-86,403
110	-23,842	-0,662		50	3,219	-86,403 G1	N90G1X-48,819Y-2,022Z-2,328B3,219C-86,403
120	-44,392	30,278		50	4,354	-172,291 G1	N100G1X-23,842Y-0,662Z-2,328B3,219C-86,403
130	-44,392	30,278	-2,601		4,354	-172,291 G1	N110G1X-23,842Y-0,662Z50B3,219C-86,403
140	-24,771	0,368	-2,601		4,354	-172,291 G1	N120G1X-44,392Y30,278Z50B4,354C-172,291
150	-46,775	-27,835	-2,601		4,354	-172,291 G1	N130G1X-44,392Y30,278Z-2,601B4,354C-172,291
160	-45,584	1,221	-2,601		4,354	-172,291 G1	N140G1X-24,771Y0,368Z-2,601B4,354C-172,291
170	-24,771	0,368	-2,601		4,354	-172,291 G1	N150G1X-46,775Y-27,835Z-2,601B4,354C-172,291
180	-24,771	0,368		50	4,354	-172,291 G1	N160G1X-45,584Y1,221Z-2,601B4,354C-172,291
190	-50,962	13,845		50	3,219	88,723 G1	N170G1X-24,771Y0,368Z-2,601B4,354C-172,291
200	-50,962	13,845	-2,328		3,219	88,723 G1	N180G1X-24,771Y0,368Z50B4,354C-172,291
210	-24,083	-1,371	-2,328		3,219	88,723 G1	N190G1X-50,962Y13,845Z50B3,219C88,723
220	-46,989	-22,09	-2,328		3,219	88,723 G1	N200G1X-50,962Y13,845Z-2,328B3,219C88,723
230	-48,975	-4,122	-2,328		3,219	88,723 G1	N210G1X-24,083Y-1,371Z-2,328B3,219C88,723
240	-24,083	-1,371	-2,328		3,219	88,723 G1	N220G1X-46,989Y-22,09Z-2,328B3,219C88,723
250	-24,083	-1,371		50	3,219	88,723 G1	N230G1X-48,975Y-4,122Z-2,328B3,219C88,723
260	-45,056	29,639		50	4,355	9,148 G1	N240G1X-24,083Y-1,371Z-2,328B3,219C88,723
270	-45,056	29,639	-2,601		4,355	9,148 G1	N250G1X-24,083Y-1,371Z50B3,219C88,723
280	-24,967	0,442	-2,601		4,355	9,148 G1	N260G1X-45,056Y29,639Z50B4,355C9,148
290	-47,775	-26,683	-2,601		4,355	9,148 G1	N270G1X-45,056Y29,639Z-2,601B4,355C9,148
300	-46,415	1,478	-2,601		4,355	9,148 G1	N280G1X-24,967Y0,442Z-2,601B4,355C9,148
310	-24,967	0,442	-2,601		4,355	9,148 G1	N290G1X-47,775Y-26,683Z-2,601B4,355C9,148
320	-24,967	0,442		50	4,355	9,148 G1	N300G1X-46,415Y1,478Z-2,601B4,355C9,148
330							N310G1X-24,967Y0,442Z-2,601B4,355C9,148
340							N320G1X-24,967Y0,442Z50B4,355C9,148
							N330M30

CÓDIGO NUMÉRICO CAJERA 3 mm

puntos	x	y	z	b	c	función G	N10G40F300S1000M3
350		-30	-10	50	0	0 G0	N350G0X-30Y-10Z50B0C0
360		-30	-10	-5	0	-86,403 G1	N360G1X-30Y-10Z-5B0C-86,403
370		-10	-10	-5	0	-86,403 G1	N370G1X-10Y-10Z-5B0C-86,403
380		-30	-10	-5	0	-86,403 G1	N380G1X-30Y-10Z-5B0C-86,403
390		-30	-10	-10	0	-86,403 G1	N390G1X-30Y-10Z-10B0C-86,403
400		-10	-10	-10	0	-86,403 G1	N400G1X-10Y-10Z-10B0C-86,403
410		-30	-10	-5	0	-86,403 G1	N410G1X-30Y-10Z-5B0C-86,403
420		-30	-10	-5	0	-172,291 G1	N420G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
430		-30	-10	-5	0	-172,291 G1	N430G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
440		-10	-10	-5	0	-172,291 G1	N440G1X-10Y-10Z-5B0C-172,291
450		-30	-10	-5	0	-172,291 G1	N450G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
460		-30	-10	-10	0	-172,291 G1	N460G1X-30Y-10Z-10B0C-172,291
470		-10	-10	-10	0	-172,291 G1	N470G1X-10Y-10Z-10B0C-172,291
480		-30	-10	-5	0	-172,291 G1	N480G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
490		-30	-10	-5	0	88,723 G1	N490G1X-30Y-10Z-5B0C88,723
500		-10	-10	-5	0	88,723 G1	N500G1X-10Y-10Z-5B0C88,723
510		-30	-10	-5	0	88,723 G1	N510G1X-30Y-10Z-5B0C88,723
520		-10	-10	-10	0	88,723 G1	N520G1X-10Y-10Z-10B0C88,723
530		-30	-10	-5	0	88,723 G1	N530G1X-30Y-10Z-5B0C88,723
540		-30	-10	-5	0	9,148 G1	N540G1X-30Y-10Z-5B0C9,148
550		-10	-10	-5	0	9,148 G1	N550G1X-10Y-10Z-5B0C9,148
560		-30	-10	-5	0	9,148 G1	N560G1X-30Y-10Z-5B0C9,148
570		-30	-10	-10	0	9,148 G1	N570G1X-30Y-10Z-10B0C9,148
580		-10	-10	-10	0	9,148 G1	N580G1X-10Y-10Z-10B0C9,148
590		-30	-10	50	0	9,148 G1	N590G1X-30Y-10Z50B0C9,148
600						G1	N600M30

## Anexo III: Código Numérico

## Parte inferior del nodo

N1F300S1000M3	N340G1X-15.951Y-4.5Z-0.606B4.354C-172.291
N10G0X0Y0Z50B0C0	N350G0X-15.951Y-4.5Z3.394B4.354C-172.291
N20G0X41.04Y20.5Z50B3.219C-86.403	N360G0X41.072Y-4.5Z3.394B4.354C-172.291
N30G0X41.04Y20.5Z-0.332B3.219C-86.403	N370G0X41.072Y-17Z-0.606B4.354C-172.291
N40G1X-11.798Y20.5Z-0.332B3.219C-86.403	N380G1X-15.951Y-17Z-0.606B4.354C-172.291
N50G0X-11.798Y20.5Z3.668B3.219C-86.403	N390G0X-15.951Y-17Z3.394B4.354C-172.291
N60G0X41.04Y20.5Z3.668B3.219C-86.403	N400G0X41.072Y-17Z3.394B4.354C-172.291
N70G0X41.04Y8Z-0.332B3.219C-86.403	N410G0X41.072Y-29.5Z-0.606B4.354C-172.291
N80G1X-11.798Y8Z-0.332B3.219C-86.403	N420G1X-15.951Y-29.5Z-0.606B4.354C-172.291
N90G0X-11.798Y8Z3.668B3.219C-86.403	N430G0X-15.951Y-29.5Z3.394B4.354C-172.291
N100G0X41.04Y8Z3.668B3.219C-86.403	N440G0X41.072Y-29.5Z3.394B4.354C-172.291
N110G0X41.04Y-4.5Z-0.332B3.219C-86.403	N450G0X0Y0Z50B4.354C-172.291
N120G1X-11.798Y-4.5Z-0.332B3.219C-86.403	N460G0X0Y20.5Z50B3.219C88.723
N130G0X-11.798Y-4.5Z3.668B3.219C-86.403	N470G0X41.04Y20.5Z-0.332B3.219C88.723
N140G0X41.04Y-4.5Z3.668B3.219C-86.403	N480G1X-15.951Y20.5Z-0.332B3.219C88.723
N150G0X41.04Y-17Z-0.332B3.219C-86.403	N490G0X-15.951Y20.5Z3.668B3.219C88.723
N160G1X-11.798Y-17Z-0.332B3.219C-86.403	N500G0X41.04Y20.5Z3.668B3.219C88.723
N170G0X-11.798Y-17Z3.668B3.219C-86.403	N510G0X41.04Y8Z-0.332B3.219C88.723
N180G0X41.04Y-17Z3.668B3.219C-86.403	N520G1X-15.951Y8Z-0.332B3.219C88.723
N190G0X41.04Y-29.5Z-0.332B3.219C-86.403	N530G0X-15.951Y8Z3.668B3.219C88.723
N200G1X-11.798Y-29.5Z-0.332B3.219C-86.403	N540G0X41.04Y8Z3.668B3.219C88.723
N210G0X-11.798Y-29.5Z3.668B3.219C-86.403	N550G0X41.04Y-4.5Z-0.332B3.219C88.723
N220G0X41.04Y-29.5Z3.668B3.219C-86.403	N560G1X-15.951Y-4.5Z-0.332B3.219C88.723
N230G0X0Y0Z50B3.219C-86.403	N570G0X-15.951Y-4.5Z3.668B3.219C88.723
N240G0X0Y20.5Z50B4.354C-172.291	N580G0X41.04Y-4.5Z3.668B3.219C88.723
N250G0X41.072Y20.5Z-0.606B4.354C-172.291	N590G0X41.04Y-17Z-0.332B3.219C88.723
N260G1X-15.951Y20.5Z-0.606B4.354C-172.291	N600G1X-15.951Y-17Z-0.332B3.219C88.723
N270G0X-15.951Y20.5Z3.394B4.354C-172.291	N610G0X-15.951Y-17Z3.668B3.219C88.723
N280G0X41.072Y20.5Z3.394B4.354C-172.291	N620G0X41.04Y-17Z3.668B3.219C88.723
N290G0X41.072Y8Z-0.606B4.354C-172.291	N630G0X41.04Y-29.5Z-0.332B3.219C88.723
N300G1X-15.951Y8Z-0.606B4.354C-172.291	N640G1X-15.951Y-29.5Z-0.332B3.219C88.723
N310G0X-15.951Y8Z3.394B4.354C-172.291	N650G0X-15.951Y-29.5Z3.668B3.219C88.723
N320G0X41.072Y8Z3.394B4.354C-172.291	N660G0X41.04Y-29.5Z3.668B3.219C88.723
N330G0X41.072Y-4.5Z-0.606B4.354C-172.291	N670G0X0Y0Z50B3.219C88.723

N680G0X0Y20.5Z50B4.355C9.148  
N690G0X41.072Y20.5Z-0.607B4.355C9.148  
N700G1X-15.953Y20.5Z-0.607B4.355C9.148  
N710G0X-15.953Y20.5Z3.393B4.355C9.148  
N720G0X41.072Y20.5Z3.393B4.355C9.148  
N730G0X41.072Y8Z-0.607B4.355C9.148  
N740G1X-15.953Y8Z-0.607B4.355C9.148  
N750G0X-15.953Y8Z3.393B4.355C9.148  
N760G0X41.072Y8Z3.393B4.355C9.148  
N770G0X41.072Y-4.5Z-0.607B4.355C9.148  
N780G1X-15.953Y-4.5Z-0.607B4.355C9.148  
N790G0X-15.953Y-4.5Z3.393B4.355C9.148  
N800G0X41.072Y-4.5Z3.393B4.355C9.148  
N810G0X41.072Y-17Z-0.607B4.355C9.148  
N820G1X-15.953Y-17Z-0.607B4.355C9.148  
N830G0X-15.953Y-17Z3.393B4.355C9.148  
N840G0X41.072Y-17Z3.393B4.355C9.148  
N850G0X41.072Y-29.5Z-0.607B4.355C9.148  
N860G1X-15.953Y-29.5Z-0.607B4.355C9.148  
N870G0X-15.953Y-29.5Z3.393B4.355C9.148  
N880G0X41.072Y-29.5Z3.393B4.355C9.148  
N890G0X0Y0Z50B4.355C9.148  
N900G0X0Y0Z50B0C0  
N910Z50M5  
N920F300S1000M3  
N930G0X0Y0Z50B0C0  
N940G0X41.04Y2.25Z50B3.219C-86.403  
N950G0X41.04Y2.25Z-1.332B3.219C-86.403  
N960G1X6.132Y2.25Z-1.332B3.219C-86.403  
N970G0X6.132Y2.25Z3.668B3.219C-86.403  
N980G0X41.04Y2.25Z3.668B3.219C-86.403  
N990G0X41.04Y-2.25Z-1.332B3.219C-86.403  
N1000G1X6.132Y-2.25Z-1.332B3.219C-86.403  
N1010G0X6.132Y-2.25Z3.668B3.219C-86.403  
N1020G0X41.04Y-2.25Z3.668B3.219C-86.403  
N1030G0X0Y0Z50B3.219C-86.403

N1040G0X0Y0Z50B0C0  
N1050G0X41.072Y2.25Z50B4.354C-172.291  
N1060G0X41.072Y2.25Z-1.606B4.354C-172.291  
N1070G1X1.979Y2.25Z-1.606B4.354C-172.291  
N1080G0X1.979Y2.25Z3.394B4.354C-172.291  
N1090G0X41.072Y2.25Z3.394B4.354C-172.291  
N1100G0X41.072Y-2.25Z-1.606B4.354C-172.291  
N1110G1X1.979Y-2.25Z-1.606B4.354C-172.291  
N1120G0X1.979Y-2.25Z3.394B4.354C-172.291  
N1130G0X41.072Y-2.25Z3.394B4.354C-172.291  
N1140G0X41.072Y-2.25Z50B4.354C-172.291  
N1150G0X0Y0Z50B0C0  
N1160G0X41.04Y2.25Z50B3.219C88.723  
N1170G0X41.04Y2.25Z-1.332B3.219C88.723  
N1180G1X6.132Y2.25Z-1.332B3.219C88.723  
N1190G0X6.132Y2.25Z3.668B3.219C88.723  
N1200G0X41.04Y2.25Z3.668B3.219C88.723  
N1210G0X41.04Y-2.25Z-1.332B3.219C88.723  
N1220G1X6.132Y-2.25Z-1.332B3.219C88.723  
N1230G0X6.132Y-2.25Z3.668B3.219C88.723  
N1240G0X41.04Y-2.25Z3.668B3.219C88.723  
N1250G0X41.04Y-2.25Z50B3.219C88.723  
N1260G0X0Y0Z50B0C0  
N1270G0X41.072Y2.25Z50B4.355C9.148  
N1280G0X41.072Y2.25Z-1.607B4.355C9.148  
N1290G1X1.977Y2.25Z-1.607B4.355C9.148  
N1300G0X1.977Y2.25Z3.393B4.355C9.148  
N1310G0X41.072Y2.25Z3.393B4.355C9.148  
N1320G0X41.072Y-2.25Z-1.607B4.355C9.148  
N1330G1X1.977Y-2.25Z-1.607B4.355C9.148  
N1340G0X1.977Y-2.25Z3.393B4.355C9.148  
N1350G0X41.072Y-2.25Z3.393B4.355C9.148  
N1360G0X41.072Y-2.25Z50B4.355C9.148  
N1370G0X0Y0Z50B0C0  
N1380Z50M5  
N1390X0Y0B0C0M30

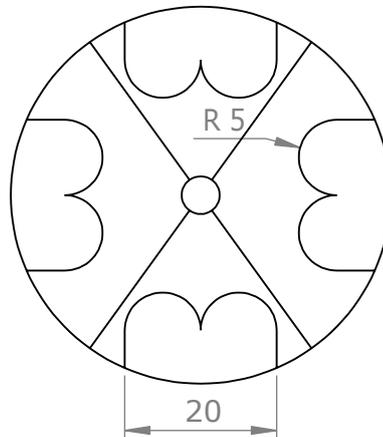
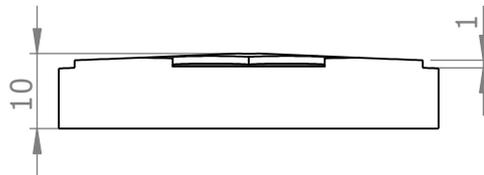
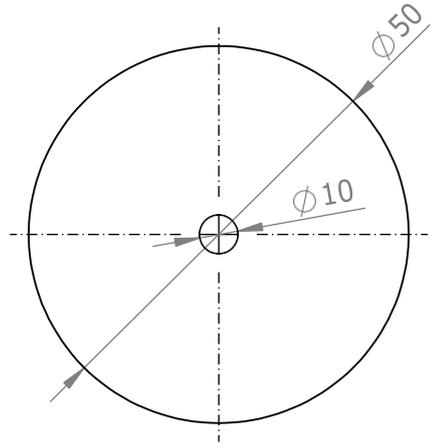
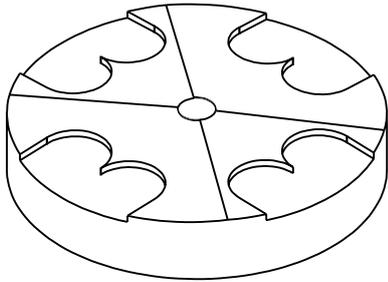
## Parte superior del nodo

N10G40F300S1000M3	N310G1X-24.967Y0.442Z-2.601B4.355C9.148
N20G0X0Y0Z50B0C0	N320G1X-24.967Y0.442Z50B4.355C9.148
N30G88Z5I-5J-17.92B1C2D5	N330G40F300S1000M3
N40G80	N340G0X-30Y-10Z50B0C0
N50G1X-49.838Y16.693Z50B3.219C-86.403	N350G1X-30Y-10Z-5B0C-86,403
N60G1X-49.838Y16.693Z-2.328B3.219C-86.403	N360G1X-10Y-10Z-5B0C-86,403
N70G1X-23.842Y-0.662Z-2.328B3.219C-86.403	N370G1X-30Y-10Z-5B0C-86,403
N80G1X-47.8Y-20.737Z-2.328B3.219C-86.403	N380G1X-30Y-10Z-10B0C-86,403
N90G1X-48.819Y-2.022Z-2.328B3.219C-86.403	N390G1X-10Y-10Z-10B0C-86,403
N100G1X-23.842Y-0.662Z-2.328B3.219C-86.403	N400G1X-30Y-10Z-5B0C-86,403
N110G1X-23.842Y-0.662Z50B3.219C-86.403	N410G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
N120G1X-44.392Y30.278Z50B4.354C-172.291	N420G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
N130G1X-44.392Y30.278Z-2.601B4.354C-172.291	N430G1X-10Y-10Z-5B0C-172,291
N140G1X-24.771Y0.368Z-2.601B4.354C-172.291	N440G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
N150G1X-46.775Y-27.835Z-2.601B4.354C-172.291	N450G1X-30Y-10Z-10B0C-172,291
N160G1X-45.584Y1.221Z-2.601B4.354C-172.291	N460G1X-10Y-10Z-10B0C-172,291
N170G1X-24.771Y0.368Z-2.601B4.354C-172.291	N470G1X-30Y-10Z-5B0C-172,291
N180G1X-24.771Y0.368Z50B4.354C-172.291	N480G1X-30Y-10Z-5B0C88,723
N190G1X-50.962Y13.845Z50B3.219C88.723	N490G1X-10Y-10Z-5B0C88,723
N200G1X-50.962Y13.845Z-2.328B3.219C88.723	N500G1X-30Y-10Z-5B0C88,723
N210G1X-24.083Y-1.371Z-2.328B3.219C88.723	N510G1X-10Y-10Z-10B0C88,723
N220G1X-46.989Y-22.09Z-2.328B3.219C88.723	N520G1X-30Y-10Z-5B0C88,723
N230G1X-48.975Y-4.122Z-2.328B3.219C88.723	N530G1X-30Y-10Z-5B0C9,148
N240G1X-24.083Y-1.371Z-2.328B3.219C88.723	N540G1X-10Y-10Z-5B0C9,148
N250G1X-24.083Y-1.371Z50B3.219C88.723	N550G1X-30Y-10Z-5B0C9,148
N260G1X-45.056Y29.639Z50B4.355C9.148	N560G1X-30Y-10Z-10B0C9,148
N270G1X-45.056Y29.639Z-2.601B4.355C9.148	N570G1X-10Y-10Z-10B0C9,148
N280G1X-24.967Y0.442Z-2.601B4.355C9.148	N580G1X-30Y-10Z50B0C9,148
N290G1X-47.775Y-26.683Z-2.601B4.355C9.148	N590M30
N300G1X-46.415Y1.478Z-2.601B4.355C9.148	

## Anexo IV: Planos

Plano 01 – Nodo Inferior

Plano 02 – Nodo Superior

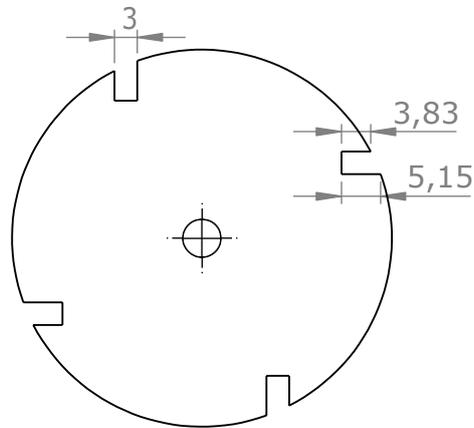
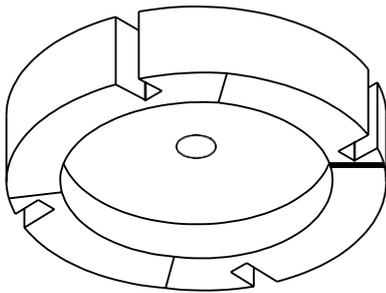
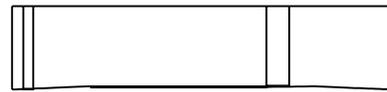
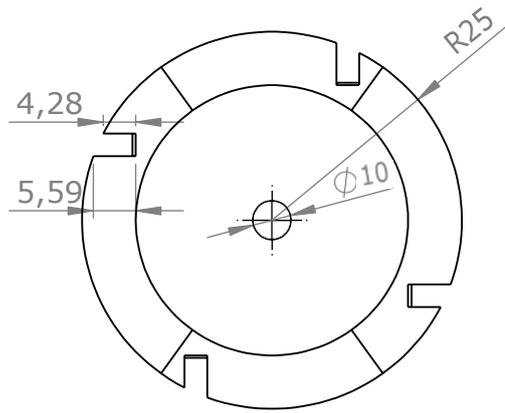
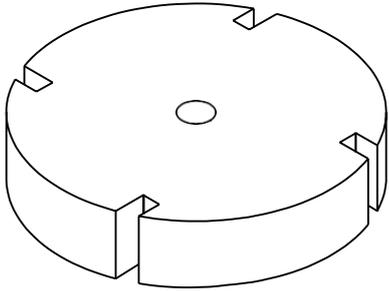


UNIVERSIDAD POLITECNICA  
DE CARTAGENA

TRABAJO FINAL DE ESTUDIOS  
GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO:	NODO PARA ESTRUCTURA MONOCAPA	NUMERO REVISION	01
NOMBRE:	NODO INFERIOR	NUMERO CLASE	
FECHA:	Septiembre 2021	ESCALA:	1:1
		NUMERO PLANO:	01

PLANTILLA  
A4



UNIVERSIDAD POLITECNICA  
DE CARTAGENA

TRABAJO FINAL DE ESTUDIOS  
GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO:	NODO PARA ESTRUCTURA MONOCAPA	NUMERO REVISION	01
NOMBRE:	NODO SUPERIOR	NUMERO CLASE	
FECHA:	Septiembre 2021	ESCALA:	1:1
		NUMERO PLANO:	02

PLANTILLA  
A4