

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Generación de trayectorias para fabricación aditiva de componentes metálicos



Jon Flores Prado
Máster de Ingeniería Industrial
dirigido por
Naiara Ortega Rodríguez

Curso 2017-2018

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

ÍNDICE

ÍNDICE	2
1. RESUMEN TRILÍNGÜE.....	4
2. LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES, IMÁGENES Y ACRÓNIMOS.....	6
2.1. Tablas	6
2.2. Ilustraciones	6
2.3. Imágenes	10
2.4. Acrónimos	11
3. INTRODUCCIÓN.....	13
3.1. IK4-TEKNIKER.....	13
3.2. Contexto	16
3.3. Fabricación Aditiva	22
3.4. Objetivos y alcance.....	30
3.5. Beneficios	32
3.6. Estado del arte	35
4. METODOLOGÍA	48
4.1. Alternativas metodológicas.....	48
4.2. Equipo y material empleado	63
4.3. Descripción de la metodología adoptada	66
5. DIAGRAMA DE GANTT	72
6. DESARROLLO DEL TRABAJO	76
6.1. Fabricación de piezas macizas.....	76
6.2. Fabricación de piezas huecas	113
7. RESULTADOS Y VALIDACIÓN	124

7.1. Trayectoria híbrida	126
7.2. Trayectoria de varios perímetros	135
7.3. Trayectoria de un perímetro	138
7.4. Resultados y ventajas técnicas obtenidas	142
8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	147
9. PRESUPUESTO	149
10. REFERENCIAS	152
ANEXO I: NORMATIVA APLICABLE	156

1. RESUMEN TRILÍNGÜE

Castellano

Título: Generación de trayectorias para fabricación aditiva de componentes metálicos.

Resumen: La inmadurez tecnológica que presenta la fabricación aditiva, junto a los beneficios técnicos que promete ofrecer, han resultado en un gran interés por parte de las grandes industrias manufactureras y los más avanzados sectores del mercado como el médico y el aeronáutico, que demandan un rápido desarrollo de esta tecnología.

A petición del centro tecnológico IK4-TEKNIKER, se ha realizado este trabajo con el objetivo principal de colaborar en este desarrollo mediante la creación de una herramienta capaz de generar las trayectorias que debe seguir la máquina a medida que va depositando el material.

Se ha empleado el software de programación Matlab para desarrollar una herramienta dirigida a la fabricación de piezas sencillas mediante la estrategia de 2,5 ejes y de 5 ejes simultáneos.

Finalmente, se ha verificado la funcionalidad de los programas a través de la utilización de las trayectorias generadas en el proceso de fabricación aditiva LMD mediante el uso de acero en forma de polvo y en forma de hilo.

Palabras clave: Fabricación aditiva, LMD, trayectoria, estrategia de deposición, Matlab.

Euskera

Izenburua: Osagai metalikoen fabrikazio gehigarriko ibilbide sorkuntza.

Laburpena: Fabrikazio gehigarria aurkezten duen heldugabetasun teknologikoa, eskaintzea hitzematzen duen onura teknikoen alboan, interes handia piztu dute manufaktura-industria handien aldetik eta medikuntza eta aeronautika bezalako merkatuko sektore aurreratuenetarikoen artean, teknologia honen garapen azkarra eskatzen dutela.

IK4-TEKNIKER zentro teknologikoaren eskariz, lan hau egin da garapen honetan laguntzeko helburu nagusiaz, makinak materiala uzten duen ahala egin behar duen ibilbidea sortzeko gai den erreminta baten sorreraren bitartez.

Matlab programazio softwarea erabili da 2,5 ardatzeko eta aldibereko 5 ardatzeko estrategia bitartezko pieza errazeko fabrikaziora zuzenduriko erreminta garatzeko.

Azkenik, programen funtzionaltasuna egiaztatu da LMD fabrikazio gehigarriko prozesuan jarraitutako ibilbideen erabileraren bidez, hauts eta hari moduan dagoen altzairuaren erabileren bitartez.

Hitz gakoak: Fabrikazio gehigarria, LMD, ibilbidea, lagatze estrategia, Matlab.

English

Title: Toolpath generation for additive manufacturing of metal components.

Abstract: The technological immaturity shown in additive manufacturing, together with the profit it can offer, has resulted in a great interest from the large manufacturing industries and the more advanced sectors of the market, like the medical or the aeronautic, that demand a faster development of this technology.

At the request of IK4-TEKNIKER technological center, this work has been carried out with the main objective of collaborating in this development by creating a tool capable of generating the toolpaths that the machine should follow as it deposits the material.

The Matlab programming software has been used to develop a tool aimed at the fabrication of simple pieces through the strategy of 2.5 axes and 5 axes simultaneously.

Finally, the functionality of the program had been checked through the use of the toolpaths generated in the LMD additive manufacturing process using steel in different shapes, such as dust and thread.

Key: Additive manufacturing, LMD, toolpath, deposition strategy, Matlab.

2. LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES, IMÁGENES Y ACRÓNIMOS

2.1. Tablas

Tabla 1: Calificación de las características de los tipos de rebanado.

Tabla 2: Coeficientes de ponderación de las características de los tipos de rebanado.

Tabla 3: Resultado de la valoración de los tipos de rebanado.

Tabla 4: Calificación de las características de los ejes de movimiento.

Tabla 5: Coeficientes de ponderación de las características de los ejes de movimiento.

Tabla 6: Resultado de la valoración de los ejes de movimiento.

Tabla 7: Calificación de las características de las estrategias de relleno.

Tabla 8: Coeficientes de ponderación de las características de las estrategias de relleno.

Tabla 9: Resultado de la valoración de los estrategias de relleno.

Tabla 10: Diagrama de Gantt.

Tabla 11: Horas internas del trabajo.

Tabla 12: Amortizaciones.

Tabla 13: Gastos de recursos materiales.

Tabla 14: Resumen de los gastos totales.

2.2. Ilustraciones

Ilustración 1: IK4-TEKNIKER.

Ilustración 2: Áreas de investigación.

Ilustración 3: Ingresos de IK4-TEKNIKER en el año 2016.

Ilustración 4: Réplica de la cadera mediante FA. Fuente: Mizar.

- Ilustración 5: Optimización topológica de una bisagra. Fuente: Prodintec.
- Ilustración 6: Esquema de equipo de Estereolitografía.
- Ilustración 7: Esquema proceso LMD. Fuente: Lasertoday.
- Ilustración 8: Fabricación mediante LMD. Fuente: IK4-TEKNIKER.
- Ilustración 9: Trayectorias de la herramienta en mecanizado. Fuente: 3dcadportal.
- Ilustración 10: Trayectorias de la herramienta en mecanizado. Fuente: grupo plm.
- Ilustración 11: Trayectorias para FA y para mecanizado. Fuente: Siemens PLM
- Ilustración 12: Capacidad de simulación tanto de las operaciones láser como de las de mecanizado.
- Ilustración 13: Simulación del proceso de fabricación aditiva de diferentes partes mediante NX CAM AM. Fuente: Siemens PLM (Youtube).
- Ilustración 14: Trayectorias en Netfabb. Fuente: Autodesk Netfabb (Youtube)
- Ilustración 15: Visualización de las diferentes capas. Fuente: Renishaw.
- Ilustración 16: Visualización de la trayectoria. Fuente: Renishaw.
- Ilustración 17: Rebanado de modelo CAD (slicing). Fuente: iti-global.
- Ilustración 18: Distorsión de la geometría según la colocación de los vértices de las capas adaptables. Fuente: (Pandey, Reddy, & Dhande, 2003).
- Ilustración 19: Diferentes formas de dividir la pieza mediante capas uniformes. Fuente: thomasengineering.
- Ilustración 20: Fabricación aditiva mediante capas no uniformes. Fuente: Siemens.
- Ilustración 21: Modelo CAD y trayectorias en capa no uniforme. Fuente: (Kapil, y otros, 2017).
- Ilustración 22: Trayectorias en 2,5 ejes.
- Ilustración 23: Esquema deposición en una superficie no plana con la inclinación constante de la herramienta.
- Ilustración 24: Mecanizado de 3+1 ejes. Fuente: (Robotmer, 2012).
- Ilustración 25: Fabricación aditiva con 5 ejes simultáneos. Fuente: Polygonica.
- Ilustración 26: Robot ABB modelo IRB4400 (izquierda) y IRB4600 (derecha).
- Ilustración 27: Esquema de los diagramas de ejecución del programa que genera una trayectoria híbrida.
- Ilustración 28: Alabes del rotor del compresor de una turbomáquina. Fuente: Piziadas.
- Ilustración 29: Diseño CAD de una pieza con la tipología de un alabe.
- Ilustración 30: Alabes con pasos de refrigeración (izquierda). Fuente: interempresas. Diseño CAD de la tipología de un alabe hueco (derecha).
- Ilustración 31: Representación del modelo CAD simple y triangulado.
- Ilustración 32: Rebanado de la pieza mediante nube de puntos.
- Ilustración 33: Desacople de puntos en una pieza cilíndrica.
- Ilustración 34: Desacople de puntos empleando una segunda nube con mayor número

de puntos para definir el perímetro.

Ilustración 35: Representación esquemática de la identificación de los puntos de intersección entre vértices y plano.

Ilustración 36: Identificación de puntos del perímetro. Izquierda: Vista 3D. Derecha: Vista de planta.

Ilustración 37: Vista de alzado y de perfil de 2 triángulos consecutivos y los 3 posibles vectores del punto de intersección.

Ilustración 38: Identificación de los puntos de intersección entre capas horizontales y vértices e ilustración de los vectores normales correspondientes a cada punto.

Ilustración 39: Puntos identificados del perímetro para una pieza con superficies planas y curvas.

Ilustración 40: Representación esquemática de la inserción de puntos en los distanciamientos.

Ilustración 41: Puntos del perímetro: intersección con los vértices (azules) y puntos insertados (verdes).

Ilustración 42: Deposición sin inclinación (izquierda) y con inclinación (derecha) en función de la pared.

Ilustración 43: Representación de los sistemas de coordenadas de cada punto en varios puntos de la trayectoria del perímetro.

Ilustración 44: Sistemas de referencia del campo de trabajo.

Ilustración 45: Relación entre el sistema del objeto de trabajo y el sistema de la herramienta.

Ilustración 46: Representación de los sistemas de coordenadas reorientados de los puntos de la pieza según el sistema del TCP. Vista 3D (izquierda) y vista de planta (derecha).

Ilustración 47: Desacople de puntos del interior (verdes) contenidos en el área generada por la trayectoria del perímetro (azul).

Ilustración 48: Creación de las rectas que componen el zigzag para diferentes direcciones.

Ilustración 49: Estrategia de zigzag preliminar en dos capas consecutivas y con direcciones diferentes.

Ilustración 50: División de las secciones en las que se divide la estrategia de zigzag antes de realizar ninguna modificación.

Ilustración 51: De azul, la cantidad de veces que las flechas ficticias cortan la sección.

Ilustración 52: División y ordenación de las secciones en las que se divide la estrategia de zigzag después de la modificación.

Ilustración 53: Representación del resultado de la optimización de la trayectoria.

Ilustración 54: Permutación del sentido del zigzag para reducir las interrupciones.

- Ilustración 55: Representación del error de discretización del zigzag.
- Ilustración 56: Representación de la distancia entre el zigzag y el perímetro, e identificación de los puntos más cercanos del perímetro por cada extremo del zigzag.
- Ilustración 57: Representación del ajuste longitudinal en capas con zigzag paralelo al eje Y.
- Ilustración 58: Representación del ajuste longitudinal en capas con zigzag paralelo al eje X.
- Ilustración 59: Procedimiento de ajuste longitudinal en el caso crítico.
- Ilustración 60: Representación de las separaciones entre la trayectoria del zigzag y la del perímetro en los tramos de inicio y fin.
- Ilustración 61: Ajuste transversal del zigzag para el caso en el que el margen entre trayectorias super en un 50% la distancia entre cordones.
- Ilustración 62: Ajuste transversal del zigzag para el caso en el que el margen entre trayectorias es inferior al 120% de la distancia entre cordones.
- Ilustración 63: Ajuste transversal del zigzag para el caso intermedio en el que la distancia calculada está entre $(1,2 \div 1,5) * \text{distancia entre cordones}$.
- Ilustración 64: Vista 3D de una pared curvada con la trayectoria de 3 capas consecutivas.
- Ilustración 65: Vista de planta de dos capas consecutivas.
- Ilustración 66: Texto del comienzo del movimiento para 3 ejes y polvo.
- Ilustración 67: Texto de una interrupción de la deposición para 3 ejes y polvo.
- Ilustración 68: Texto del comienzo del movimiento para 5 ejes y polvo.
- Ilustración 69: Texto de una interrupción de la deposición para 5 ejes y polvo.
- Ilustración 70: Texto del comienzo del movimiento para 3 ejes e hilo.
- Ilustración 71: Texto de una interrupción de la deposición para 3 ejes e hilo.
- Ilustración 72: Representación de los puntos del perímetro identificados y sus vectores normales.
- Ilustración 73: Representación de los puntos que componen las trayectorias del perímetro interiores.
- Ilustración 74: 4 perímetros de una misma capa antes de realizar el ajuste de la separación de los extremos.
- Ilustración 75: 4 perímetros de una misma capa tras realizar el ajuste de la separación de los extremos.
- Ilustración 76: Representación de las distancias entre capas planas igualmente distanciadas.
- Ilustración 77: Representación de las capas antes de ser ajustadas (azul) y las capas ajustadas (verde).
- Ilustración 78: Representación esquemática del ajuste de un punto de una capa.

Ilustración 79: Representación de las distancias entre los perímetros tras ser adaptados.

Ilustración 80: Representación de la trayectoria perimetral para fabricación mediante 5 ejes.

Ilustración 81: Vista 3D de una pared girada e inclinada. Trayectoria híbrida.

Ilustración 82: Representación de trayectoria híbrida en dos capas consecutivas.

Ilustración 83: Vista lateral de la pieza con los sistemas de coordenadas de los puntos del perímetro.

Ilustración 84: Vista de planta de la pieza con los sistemas de coordenadas de los puntos del perímetro.

Ilustración 85: Vista 3D de un semi-cono. Trayectoria híbrida.

Ilustración 86: Vista 3D de un alabe. Trayectoria híbrida.

Ilustración 87: Trayectoria de varios perímetros para pared curva.

Ilustración 88: Vista en planta de la trayectoria de varios perímetros para pared curva.

Ilustración 89: Trayectoria del perímetro mediante capas planas.

Ilustración 90: Sistemas de coordenadas (X azul, Y rojo, Z verde) en varias capas alternas.

Ilustración 91: Representación de las trayectorias originales (amarillo), las capas adaptadas (azules) y las superiores incorporadas (verdes).

Ilustración 92: Sistemas de coordenadas (X azul, Y rojo, Z verde) en varias capas alternas.

Ilustración 93: Trayectorias originales y adaptadas en la izquierda, y sistemas de coordenadas en varias capas en la derecha.

Ilustración 94: Trayectoria híbrida con la estrategia de zigzag adaptado a la estrategia de contorno para dos capas consecutivas.

2.3. Imágenes

Imagen 1: Cabezal de hilo de Fraunhofer (izquierda) y de polvo de Procitect (derecha).

Imagen 2: Resultado de la fabricación de un semi-cono mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en hilo.

Imagen 3: Vista de planta del resultado del semi-cono fabricado (izquierda) y una de las capas del comienzo de la fabricación del semi-cono (derecha) con 3 ejes y material en hilo.

Imagen 4: Resultado de la fabricación de un alabe mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en hilo.

Imagen 5: Vista de planta del resultado de la fabricación de un alabe mediante

trayectoria híbrida en 3 ejes y material en hilo.

Imagen 6: Pared curva mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en polvo.

Imagen 7: Pared curva inclinada mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en polvo.

Imagen 8: Pared curva inclinada mediante trayectoria híbrida en 5 ejes y material en polvo.

Imagen 9: Vista en planta de pared curva inclinada mediante trayectoria híbrida en 5 ejes y material en polvo.

Imagen 10: Vista en planta de pared curva mediante trayectoria de varios perímetros, movimiento en 3 ejes y 4 contornos por cada capa.

Imagen 11: Construcción de paredes curvas mediante trayectoria de varios perímetros, movimiento en 3 ejes y 4 contornos por cada capa.

Imagen 12: Fabricación mediante movimiento en 3 ejes y hilo. A la izquierda sin adaptar los extremos del zigzag, y a la derecha adaptando dichos extremos.

2.4. Acrónimos

AFM: Asociación Española de Fabricantes de Máquina-herramienta

AMEC: Additive Manufacturing European Conference

ASTM: American Society for Testing and Materials

CAD: Computer Aided Design

CAE: Computer Aided Engineering

CAM: Computer Aided Manufacturing

CNC: Control Numérico Computarizado

DLMD: Direct Laser Metal Deposition

DMD: Direct Metal Deposition

DMLS: Direct Metal Laser Sintering

EBM: Electron Beam Melting

EHU/UPV: Euskal Herriko Unibertsitatea/Universidad del País Vasco

EPMA: Asociación Europea de Polvo Metalúrgico

FDM: Fused Deposition Modelling

GUI: Graphical User Interface

ISO: International Organization for Standardization

LENS: Laser Engineered Net Shaping

LMD: Laser Metal Deposition

SLA: Stereolithography

SLM: Selective Laser Melting

SLS: Selective Laser Sintering

STL: Standard Tessellation Language

TCP: Tool Center Point

TFM: Trabajo de Fin de Máster

TSP: Travelling Salesman Problem

WAAM: Wire and Arc Additive Manufacturing

3. INTRODUCCIÓN

3.1. IK4-TEKNIKER

El Trabajo de Fin de Máster aquí presente se ha realizado en colaboración y a demanda del centro de investigación IK4-TEKNIKER.

IK4-TEKNIKER está ubicado en el parque tecnológico de Eibar, históricamente reconocida por la manufacturación del hierro y la industria armera, de la que proviene su sobrenombre de ``Ciudad Armera``.



Ilustración 1: IK4-TEKNIKER.

Es un centro tecnológico fundado en 1995 por la Asociación de Antiguos Alumnos de la Escuela de Armería de Eibar y está constituido jurídicamente como Fundación privada sin ánimo de lucro, en cuyo patronazgo y junta está mayoritariamente representada la industria.

La junta de patronato actual está constituida por 20 patronos: 8 correspondientes a Instituciones entre las que se encuentra la Universidad del País Vasco (EHU/UPV), y 12

a Entidades Colaboradoras.

En la actualidad IK4-TEKNIKER forma parte de la Alianza Tecnológica IK4, de la que también son socios los centros tecnológicos siguientes: Azterlan, Ceit, Gaiker, Ideko, Ikerlan y Lortek. Esta Alianza fue constituida en 2005 según un modelo federal por el que sus integrantes comparten estrategias y combinan capacidades sin renunciar a su soberanía. La suma de las capacidades de los siete centros ha llevado a IK4 a ser un referente en el entorno europeo, situándose entre las principales corporaciones científico-tecnológicas privadas del continente. Su principal misión es la generación, captación y transferencia de conocimiento científico-tecnológico con el fin de contribuir a la mejora de la competitividad del tejido empresarial del entorno, a través de la innovación, en un contexto global marcado por la competitividad.

IK4-TEKNIKER está integrado por personas con vocación y compromiso por impulsar la capacidad innovadora de sus clientes e incrementar su capital tecnológico para mejorar su competitividad de forma sostenible, a través de la generación y aplicación del conocimiento científico-tecnológico.

Entre los valores que definen la personalidad del centro se pueden destacar la excelencia, la confianza y el compromiso, y siempre orientando las actividades a los resultados, tanto para aumentar el conocimiento interno como dirigidos al cliente.

Cabe destacar las principales áreas de investigación que predominan en IK4-TEKNIKER que son la ingeniería de producto, la ingeniería de superficies, las tecnologías de la información y la comunicación y la fabricación avanzada en la que se encuentra la fabricación aditiva de materiales metálicos.



Ilustración 2: Áreas de investigación.

En el gráfico de la ilustración 3 se expone el origen de los ingresos del centro que se reparten de forma muy equitativa entre empresas privadas (48.5%) y entidades públicas (49.3%). Un pilar fundamental en la innovación y el desarrollo de las tecnologías tanto a nivel local como europeo, son los programas de ayudas en los que IK4-TEKNIKER toma parte entre los que destacan EMAITEK por parte del Gobierno

Vasco y el programa marco europeo Horizonte 2020. Varios indicadores del año 2016 demuestran el buen cumplimiento de los requisitos de dichos programas: se ha logrado solicitar 3,00 patentes por cada 100 investigadores del centro y fueron aprobados 13 proyectos del programa H2020, liderando 4 de ellos con una captación superior a los 6.5M€. De esta forma, los indicadores de la eficiencia de los resultados para el programa EMAITEK muestran un cumplimiento total del 93.33% para el año 2016 y del 96.01% para el año 2017.

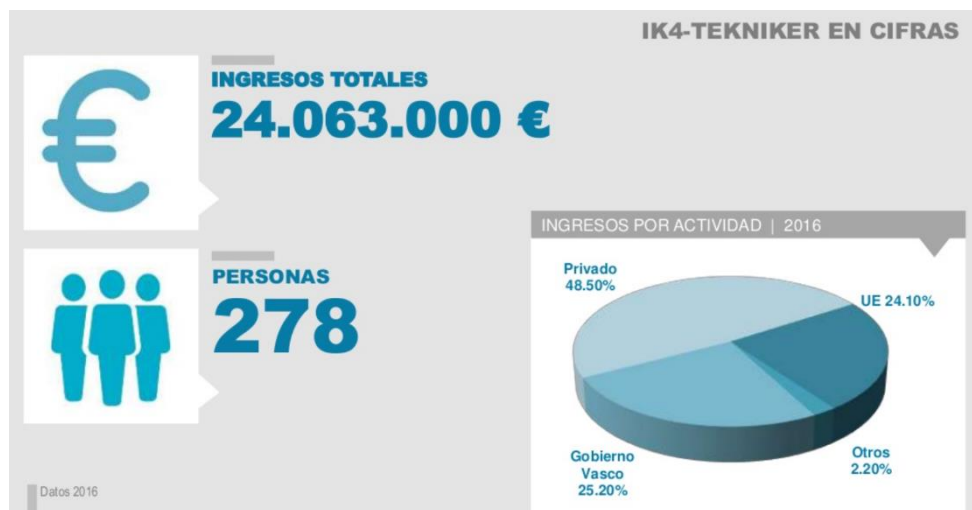


Ilustración 3: Ingresos de IK4-TEKNIKER en el año 2016.

3.2. Contexto

El ámbito tecnológico en el que se enmarca este trabajo es la fabricación avanzada, que es clave en el desarrollo tecnológico a nivel mundial y dentro del centro IK4-TEKNIKER tiene como objetivo avanzar hacia actividades de fabricación más intensivas en conocimiento y de mayor valor añadido. La incorporación de tecnologías de vanguardia para el desarrollo de nuevos productos y mejores procesos, las mejoras en el diseño o la marca como elementos también esenciales en la industria suponen áreas críticas a abordar.

Centrando más el entorno en el que se ubica el trabajo, nos encontramos con la fabricación aditiva. Se trata de un grupo de tecnologías con gran potencial innovador al que se le prevé un mayor crecimiento y desarrollo futuro convirtiéndose en uno de los campos más importantes dentro de la fabricación avanzada. A medida que esta tecnología evoluciona, es más significativa la transformación que origina en la manera de concebir, diseñar y fabricar productos.

La diferencia más relevante y que caracteriza a esta novedosa tecnología yace en el proceso de fabricación, en lugar de moldear o extraer el material como en los métodos de fabricación tradicionales, de tipo extractivo, el material se va depositando capa a capa hasta completar la pieza.

Las ventajas que ofrecen las tecnologías de fabricación aditiva como son la libertad de diseño, la reducción de material y costes o la aceleración en la producción han sido razones esenciales para que varios sectores de la industria inicien su incursión dentro de estas tecnologías. Entre ellos destacan el aeroespacial, la automoción y el médico, que son sectores en los que la innovación y el desarrollo de las nuevas tecnologías son clave para su progreso.

Médico:

La gran ventaja que ofrece la fabricación aditiva al sector médico es la capacidad de personalización a la hora de producir prótesis adaptadas a las necesidades de cada paciente.



Ilustración 4: Réplica de la cadera mediante FA. Fuente: Mizar.

Por otra parte, junto con la creación por parte de la compañía Organovo de la primera bioimpresora 3D comercial capaz de imprimir tejidos humanos, se busca la posibilidad de crear órganos artificiales que sirvan de alternativa y puedan ser trasplantados a los pacientes. Por el momento, el sector se limita a producir tejidos para la industria farmacéutica y al desarrollo de órganos obtenidos del escaneo de los pacientes para aumentar las probabilidades de éxito previas a una cirugía.

Aeroespacial y aeronáutico:

Los procesos de fabricación aditiva se consideran el candidato ideal para superar los retos relacionados con las emisiones, el ruido y el consumo energético del transporte aéreo. Esta tecnología está suponiendo una verdadera revolución debido a la reducción de peso y coste mediante la optimización topológica de los productos que permite aligerar la pieza sin perjudicar a la resistencia, dureza o calidad de la original, pero conlleva una mayor complejidad geométrica.

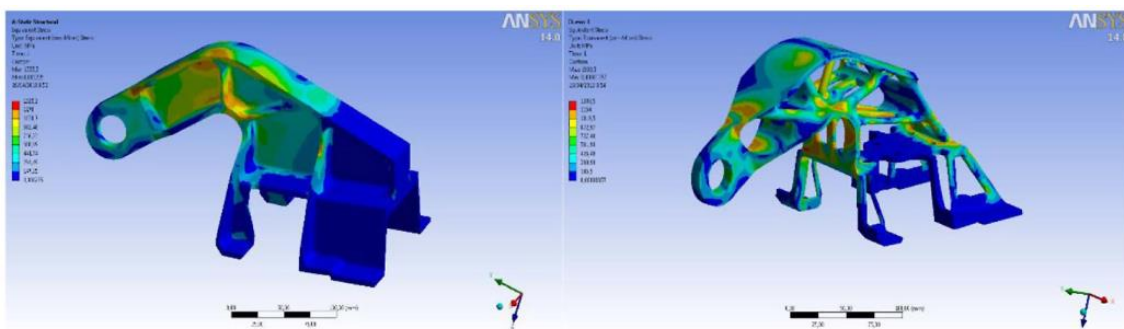


Ilustración 5: Optimización topológica de una bisagra. Fuente: Prodirtec.

En la ilustración 5 se puede ver el resultado estructural obtenido combinando las ventajas de la fabricación aditiva junto con la técnica de optimización topológica para la bisagra de un capot de motor de un avión comercial de la compañía Airbus.

Entre los principales beneficios que aporta se pueden encontrar los siguientes:

- Uso sostenible de la materia prima gracias a la posibilidad de producción de piezas cercanos al diseño final (buy-to-fly ratio próximo a la unidad). Factor importante en el empleo de materiales de mayor coste como el titanio.
- Se elimina la necesidad de depender de útiles de fabricación.
- Facilita y agiliza los cambios de diseño que permiten adecuarse a las necesidades de la pieza y posibilitan la personalización dirigida a cada cliente.
- Posibilita la fabricación de componentes con aleaciones metálicas especiales o diseños complejos de alto valor añadido en series cortas y bajo demanda.

Automoción:

Los elevados costes de la implantación de las tecnologías de fabricación aditiva, y las limitaciones a la hora de producir grandes tiradas como las del sector del automóvil hacen que no sea una solución tan requerida como en el sector aeroespacial. Las técnicas de fabricación tradicionales tienen y seguirán teniendo una posición dominante en la automoción, sin embargo, la fabricación aditiva ha abierto las puertas a la creación de nuevos diseños y plazos de entrega más cortos por lo que, sin duda, tendrán un papel importante en la evolución del sector.

Hoy en día es posible distinguir dos aspectos principales en los que esta novedosa tecnología puede ser crucial para los fabricantes de automóviles:

- Por un lado, la libertad en el diseño permite a los ingenieros mejorar las características de las piezas que las restricciones de los métodos tradicionales de fabricación no dejaban lugar a optimización alguna. Esta nueva técnica permite trabajar al diseñador con estructuras huecos o de tipo celosía que aportan tanto nuevas funcionalidades como un menor peso. Asimismo, la capacidad de personalización y la rápida adaptación a los cambios de diseño son factores clave en un sector en constante evolución.
- Por otro lado, las empresas del sector se ven obligadas a garantizar el suministro de piezas de sustitución para cada vehículo por un mínimo de 5 años a partir de la fecha en que el producto deje de fabricarse. Esto implica un gran inventario previo a la demanda y la necesidad de grandes almacenes donde acumular los productos. A través de la fabricación aditiva, se espera alcanzar una producción bajo demanda y descentralizada a la vez que geográficamente más cercana reduciendo así tanto los tiempos de producción y entrega como los costes debidos al almacenaje y el uso excesivo de la materia prima.

Es destacable el aumento del interés dedicado al uso y desarrollo de la fabricación aditiva a lo largo de las últimas 3 décadas, pasando de ser utilizada únicamente en la producción de prototipos a ser vista como la tecnología clave en la fabricación de piezas funcionales con un gran número de exigencias técnicas. Se ha consolidado una comunidad científica que sigue aumentando cada día y que demuestra sus cualidades

a través de los congresos internacionales organizados y artículos publicados. Tanto el sector industrial de la manufactura, como centros académicos y de investigación, o instituciones públicas han mostrado su interés por esta tecnología que ha visto en los últimos años un crecimiento anual en la cifra de mercado de dos cifras. Según el informe anual Wohlers Reports de 2016, sitúa al mercado de la fabricación aditiva en torno a los 5.1 miles de millones de dólares en 2015 con un crecimiento del 35.2% respecto al año anterior.

Actualmente, el uso de estas tecnologías está en pleno crecimiento en los países más desarrollados, sin embargo, su implantación en los países en vías de desarrollo y subdesarrollados está aún limitada. Es en la industria europea donde se han visto las primeras aplicaciones de la fabricación aditiva, convirtiéndola en uno de los principales competidores y un referente en el sector, según Peter Sanders. Por el otro lado están Estados Unidos, que ha logrado un crecimiento muy rápido y el este de Asia, donde se prevé un gran crecimiento en los años próximos. Aunque la mayor parte de la tecnología de la fabricación aditiva se ha desarrollado en Europa, dos tercios de las máquinas se venden en Estados Unidos y Asia, quedando visible la necesidad de acelerar la llegada al mercado europeo de esta tecnología para poder seguir el camino de la innovación industrial.

Para lograr un desarrollo acelerado de las nuevas tecnologías mediante la interacción de los expertos en la materia de todo el mundo, ISO y ASTM International han elaborado conjuntamente la estructura para la creación de estándares que satisfaga la necesidad de normas técnicas. Entre las publicadas por el momento, se describen los fundamentos de los distintos procesos, terminología, categorías, ensayos y caracterización.

En el mismo sentido, varias asociaciones y congresos han surgido para dar impulso a las tecnologías de fabricación aditiva. A nivel europeo, Cecimo (Asociación Europea de la Industria de Máquina-Herramienta) y EPMA (Asociación Europea de Polvo Metalúrgico) han firmado un acuerdo con el que intercambiar información y coordinar sus actividades. Conferencias o congresos organizados por Cecimo como AMEC (Additive Manufacturing European Conference) o "International Conference on Additive Manufacturing" en EMO (Hannover) sirven para expandir, dar a conocer y conectar tanto a líderes industriales como a empresas manufactureras de los países europeos del sector.

A nivel nacional, la AFM (Asociación Española de Fabricantes de Máquina-Herramienta, Accesorios, Componentes y Herramientas), junto a varias entidades nacionales entre las que se encuentran los centros tecnológicos IK4 y la UPV/EHU, crean la Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D, Addimat, en respuesta a la

demanda de cooperación interempresarial en el sector. Cabe destacar la inauguración de la primera feria profesional de fabricación aditiva y 3D, ADDIT3D, por parte de Addimat y asociada a la internacionalmente reconocida feria BIEMH que se organiza anualmente en Bilbao.

Es notable la importancia dada al sector de la fabricación aditiva en el País Vasco en el que destacan organizaciones dedicadas a la innovación y el desarrollo e incluso empresas que ya producen y comercializan piezas con esta tecnología:

- *Mizar Additive*: Ofrecen un servicio end-to-end, produciendo mediante fabricación aditiva los productos requeridos por el cliente que luego son verificados y validados. Cuentan con varias máquinas en las que trabajan tanto con plásticos (FDM o Polyjet) como con metales (DMLS) y sus principales aplicaciones son el aeroespacial y el sanitario.
- *Addilan*: Disponen de máquinas propias de alta tasa de aporte basándose en la soldadura por arco de hilo metálico (WAAM). Se enfocan en piezas de alto valor añadido, de tamaño medio-grande en sectores altamente exigentes como el aeronáutico, aeroespacial o energía y materiales metálicos como el acero, aleaciones de titanio y superaleaciones de aluminio.
- *GNC Láser*: Empresa especializada en la tecnología láser aplicada al tratamiento superficial y la soldadura de piezas principalmente metálicas. El conocimiento desarrollado en el ámbito del láser industrial les ha conducido a involucrarse en la fabricación aditiva mediante el Laser Cladding. Aportando material en polvo que es fundido con un haz láser en una atmosfera inerte, les permite tanto reparar piezas de alto valor como obtener superficies con características mejoradas.
- *Tecnalia*: Junto a la alianza IK4, forman los dos centros principales de investigación y desarrollo del País Vasco referentes tanto a nivel nacional como europeo. Entre sus actividades, desarrollan nuevas soluciones tecnológicas de fabricación aditiva para superar los retos actuales del sector. Para adecuarse a las necesidades del mercado y de sus clientes, Tecnalia pone el foco en las siguientes tecnologías: Deposición directa de metales (WAAM, LMD), materiales compuestos (FDM, SLS) y materiales en fase líquida, Material Jetting (Binder Jetting, LDM, Ink Jetting).
- *IK4-LORTEK*: Es uno de los centros principales desarrolladores de esta tecnología centrándose en el Laser Cladding para aplicarlo a la ingeniería de superficies, la reparación de piezas de alto valor y la fabricación por aporte de material (LMD). LORTEK lidera el proyecto HyproCell enmarcado en el programa Horizon 2020 que tiene como objetivo implementar y validar la fabricación aditiva en casos reales y posibilitar así su integración en la industria.
- *IK4-CEIT*: Otro de los centros de la alianza IK4 que entre sus áreas de investigación incluye la fabricación aditiva. Aunque disponen de líneas de investigación dedicadas a los procesos de fabricación aditivas, se centran en el

estudio y desarrollo de polvos metálicos o cerámicos.

El correcto desarrollo de las tecnologías aditivas requiere diferentes líneas de investigación que cubran todos los factores involucrados en esta. Un cambio tan drástico en el proceso de fabricación, en el que pasa de extraerse material de un tocho inicial a producir la pieza a partir de la superposición de capas, exige el desarrollo de nuevas tecnologías. En este sentido, las líneas de investigación principales se basan en la creación de nuevos materiales, diferentes métodos de aporte de material y fuentes de energía que comprenden los diferentes tipos de tecnologías de fabricación aditiva, nuevas herramientas CAD adecuadas a la complejidad en el diseño que permite, sistemas CAM centrados en la generación de trayectorias y soluciones multi-axiales, sistemas CAE que regulen la optimización topológica y el control y la simulación del proceso.

En IK4-TEKNIKER se ha realizado una fuerte apuesta en los últimos años a favor de la fabricación aditiva con la intención de ofrecer know-how a las empresas del entorno para dar el salto a la fabricación aditiva con tecnología propia. Enfocándose en el Laser Cladding, cabe destacar el avance logrado en el desarrollo de equipamiento y vienes relacionados con esta tecnología como dos cabezales de aporte concéntrico. Por otra parte, se está desarrollando un sistema de control geométrico en lazo cerrado dirigido a fabricar componentes aeronáuticos de alto valor añadido.

La realización de este trabajo nace como respuesta a la necesidad de un software sustituto al CAM encargado de la generación de trayectorias para piezas simples de materiales metálicos. La falta de sistemas CAM enfocados en esta tecnología y la carencia de cualidades en los actuales softwares desarrollados por grandes de la industria como NX y Autodesk que se encuentran en plena evolución, junto al elevado coste de estos, ha requerido el desarrollo de un programa dirigido tanto a la realización de pruebas como a la fabricación de piezas sencillas.

3.3. Fabricación Aditiva

3.3.1. Introducción a la fabricación aditiva

La Fabricación Aditiva (o Additive Manufacturing en inglés) consiste en la fabricación de piezas a partir de un diseño virtual en 3D mediante la sucesiva superposición de capas de material. El modelo 3D es dividido virtualmente en finas secciones transversales que llamaremos capas, y durante el proceso de fabricación una fuente de energía procesa el material depositado siguiendo una trayectoria previamente definida de forma que cubre completamente la superficie de cada capa de la pieza.

Esta tecnología, también conocida como impresión 3D, debe sus orígenes al prototipado rápido patentado por Chuck Hull en el año 1986 y al que llamo estereolitografía. Es el primer proceso de fabricación por adición, que consiste en la fotopolimerización capa por capa de una resina líquida almacenada en una cuba mediante la focalización de un haz de luz ultravioleta. La resina líquida es curada y solidificada debido a la exposición al láser de forma que se adhiere a la capa previa. La iteración del proceso genera una pieza sólida en 3D utilizado únicamente como prototipo que imita el diseño previamente diseñado en un software CAD. El enlace entre el diseño CAD y el programa que genera las trayectorias del láser se basa en el formato de archivo STL (Standard Tessellation Language) inventado también por Hull y que hoy en día es el formato de archivo principal en la fabricación aditiva.

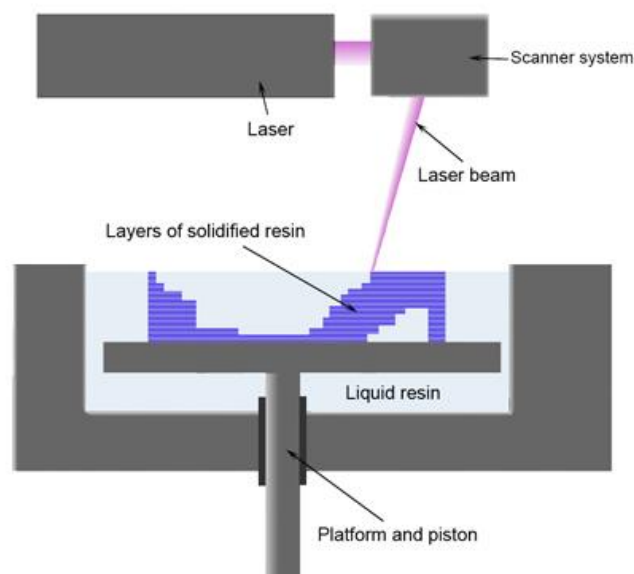


Ilustración 6: Esquema de equipo de Estereolitografía.

Una de las tecnologías que mayor avance ha disfrutado en los últimos años es la

relacionada con la Fabricación Aditiva. Ha despertado un gran interés tanto en la industria como en centros de investigación y universidades debido a su capacidad de fabricación de componentes con geometrías complejas y personalizables en tiempos inalcanzables por otros métodos de fabricación. Prácticamente desconocida hasta hace relativamente poco y aún en situación de estudio, siendo un proceso por perfeccionar, podría ser calificada como una pieza fundamental en la fabricación de la era digital y del futuro industrial. Los métodos tradicionales de fabricación, como los procesos de arranque de material, fundición o inyección se enfrentan a limitaciones físicas que imposibilitan el desarrollo de nuevos productos. (Onemagazine, 2011)

Las principales características que distinguen a la Fabricación Aditiva de los métodos tradicionales de fabricación y que, a su vez, aportan grandes ventajas, son las siguientes: (Fundación Cotec, 2011)

- **La complejidad geométrica deseada no encarece el proceso:** Características geométricas que los métodos tradicionales de fabricación son incapaces de recrear que se resolverían mediante aproximaciones o procesos de costes excesivos, son para la Fabricación Aditiva propiedades que apenas influyen en el proceso de fabricación. No obstante, un alto grado de complejidad, junto con la falta de experiencia avanzada, conllevan un desconocimiento de la calidad en la construcción, suponiendo una mayor cantidad de recursos destinados a la inspección y verificación del producto.
- **La personalización no encarece el proceso:** La Fabricación Aditiva no se basa en la producción en masa, lo que permite fabricar un determinado número de piezas iguales o distintas sin penalizar el coste. El resultado es la capacidad y facilidad de personalización, que es una de las propiedades clave que persigue la industria de los países desarrollados que permite la producción con alto valor añadido.
- **Fabricación competitiva de series cortas de productos:** El hecho de no necesitar utillajes o moldes, posibilita una respuesta inmediata a los cambiantes requerimientos del producto. Por lo tanto, permite la producción de series cortas donde además poder realizar modificaciones de diseño sin depender de los costosos utillajes.
- **Posibilidad de integrar distintas geometrías y materiales en un mismo objeto:** Permite la fabricación directa de mecanismos integrados en la pieza en la que deberá trabajar, manipular la porosidad del material durante el proceso de fabricación o fabricar aportando simultáneamente varios materiales en un mismo sólido. De esta forma se consiguen nuevas funcionalidades de los productos y mejores características de los materiales.
- **Ahorro de material:** A diferencia de los procesos tradicionales de fabricación en los que el material es sustraído de un bloque inicial, en la Fabricación Aditiva el material es añadido selectivamente, minimizando los residuos producidos. Esta ventaja es más notable en el empleo de materiales en forma de hilo.

Utilizando las tecnologías de Fabricación Aditiva y aunque todavía son procesos por mejorar, se pueden valorar positivamente los resultados obtenidos frente a los procesos tradicionales.

Uno de los sectores principales para su aplicación es el sector médico, donde la necesidad de piezas únicas y de gran complejidad para cada circunstancia está siendo cubierta gracias a la capacidad de personalización que aporta esta tecnología. Los requerimientos en las piezas del sector aeronáutico hacen que sea otro de los principales sectores de aplicación. Entre ellos, destacan los bajos volúmenes de producción, la necesidad de geometrías complejas y relación resistencia/peso elevada. Características que la Fabricación Aditiva es capaz de producir, al contrario que los métodos tradicionales que conducen a limitaciones a la hora de conseguir dichas propiedades. Debido a las ventajas mencionadas, el resto de los sectores a destacar en la aplicación de procesos de fabricación aditiva son, el sector de la automoción, sector de moldes y matricería, arquitectura, textil, mobiliario e industria manufacturera en general.

3.3.2. Clasificación de los procesos

Como ya se ha mencionado, la Fabricación Aditiva se basa en una serie de procesos de producción de piezas de forma rápida, directamente a partir del diseño 3D y que permiten geometrías complejas. Pero dentro de este método de fabricación podemos encontrar varios procesos con características distintas como la precisión, la calidad superficial, el material utilizado, la fuente de energía y el precio. De esta forma, existen diferentes criterios de clasificación para presentar los distintos tipos de Fabricación Aditiva, entre ellos, uno de los más simples es la clasificación en función del material empleado, que se construye por dos bloques:

Por un lado, la Fabricación Aditiva con materiales poliméricos posiblemente sea la más conocida debido al reciente crecimiento y expansión de las llamadas "impresoras 3D". Dichas impresoras utilizan la tecnología FDM (Fused Deposition Modelling) en la que un cabezal recorre cada capa del modelo a la vez que realiza la fusión de un hilo de plástico y deposita el material formando una pieza 3D. El auge de esta tecnología se ve representada por el aumento de distribuidores tanto de material como de máquinas que, aunque la calidad de las piezas generadas sea menor que con los métodos tradicionales, es más que compensada por las ventajas ya mencionadas que ofrece la Fabricación Aditiva. Es la razón de que se haya expandido más allá de los sectores de la industria, llegando a centros de diseño, escuelas e incluso plantear su uso doméstico.

Por otro lado, el uso de diversas aleaciones metálicas parece ser el más interesante

desde un punto de vista industrial. Aunque comparta similitudes en la tecnología y el proceso con la Fabricación Aditiva con polímeros, su complejidad conlleva un notable encarecimiento de los sistemas. Actualmente, la Fabricación Aditiva de metales supone un reto tecnológico en proceso de mejora que está llamado a ser la pieza fundamental de una revolución es los procesos de fabricación, y es por eso la importancia que recibe en los sectores de I+D+i. En general, entre las principales limitaciones de esta tecnología y los retos que se tratan de superar hoy en día podemos encontrar: (IK4-LORTEK, 2013)

- **Incremento de la productividad:** Relacionada con la tasa de deposición.
- **Calidad de las piezas:** La capacidad de fabricación de piezas funcionales sin necesidad de procesos posteriores. Metodologías para la selección de parámetros en función de los materiales y los requerimientos. Calidad superficial.
- **Materiales:** Conocimiento de las propiedades y capacidades de distintos materiales y la optimización microestructural.
- **Reducción de costes:** Relacionada con los materiales y los sistemas.

Tal y como se ha comentado, existen en la industria varios procesos de Fabricación Aditiva con distintas características que en general, se distinguen por el material empleado, el método de deposición de material o el tipo de aporte de energía. A continuación, se identifican y resumen varios de los procesos más destacables de este ámbito tecnológico.

- **Estereolitografía (SLA):** Considerada la precursora de los actuales procesos de Fabricación Aditiva basados en las tecnologías de prototipado rápido. Su mayor distinción es el uso de resinas epoxi en estado líquido y consiste en la solidificación del material mediante un haz de luz. El láser recorre la superficie de cada capa de la pieza de modo que solamente se solidifica el material afectado por la luz. Existe una gran variedad de resinas que ofrecen propiedades diferentes, pero en general, este proceso permite fabricar piezas muy complejas y espesores delgados con excelente calidad en precisión y acabado. Una variante, es el proceso llamado **Polyjet**, en el cual la resina se va depositando a través del cabezal y dispone de múltiples haces de luz ultravioleta.
- **Fused Deposition Modelling (FDM):** Este ya mencionado proceso es la base de las conocidas "impresoras 3D", en el que un material termoplástico en forma de hilo pasa por una boquilla caliente de la que recibe el calor necesario para fundirlo. A medida que la boquilla recorre la trayectoria predefinida capa por capa, el material es depositado adhiriéndose a la capa anterior y solidificándose formando la nueva capa.
- **Fusión selectiva de lecho de polvo:** Las variantes más comunes que se basan en este proceso son Selective Laser Melting (**SLM**) y Selective Laser Sintering

(**SLS**). Consiste en la previa deposición de finas capas de polvo sobre la base en la que un láser realiza la fusión selectiva del polvo en función de la superficie requerida de la capa correspondiente. La iteración de dicho proceso capa por capa completa la creación de la pieza 3D. La variedad de los posibles materiales empleados incluye aleaciones metálicas (SLM) y polímeros industriales (SLS). Muchos de los materiales metálicos empleados en este proceso son susceptibles a la oxidación por lo que, normalmente el proceso se suele llevar a cabo en cámaras cerradas con atmosferas controladas. Las excelentes características de los materiales junto a la posibilidad de prescindir de estructuras de soporte hacen que sea uno de los procesos más habituales en la industria de la Fabricación Aditiva. (Alvarez, Garciandia, & Gurmendi, 2014)

- **Inyección directa de material:** El principio de funcionamiento es la fusión y aporte directo de un material sobre la superficie de un sustrato también fusionado que posibilite la unión siguiendo unas trayectorias predefinidas. Existen varios nombres aplicados a este proceso a la hora de trabajar con metales, sin embargo, aunque se les denomine de diferente manera, todos comparten el mismo principio de funcionamiento. Los más comunes son: **Laser Cladding** (DLMD), Laser Metal Deposition (**LMD**), **LENS**, **DMD**... Debido a que este proceso va a ser el empleado en la realización de este Trabajo de Fin de Máster, se va a profundizar más en la técnica y explicación del proceso a continuación. (Ukar & Lamikiz, 2015)

En cuanto a los principales métodos utilizados en el aporte de energía existen diversos métodos utilizados en los diferentes tipos de tecnologías y para diferentes materiales: haz de electrones, láser, calor y luz ultravioleta.

3.3.3. Laser Cladding/LMD

La generación de trayectorias que permitan la fabricación de una pieza mediante los métodos aditivos, que es la principal tarea de este TFM, se va a llevar de las pantallas de ordenador a una pieza sólida metálica a través del proceso de aporte directo de metal o LMD.

Este proceso se basa en el aporte directo de una aleación metálica en forma de hilo o de polvo que se funde sobre la superficie de un sustrato mediante un haz de láser. Al mismo tiempo, el láser también fusiona una fina capa del material sustrato, denominada baño fundido, que posibilita la unión entre capas. El movimiento del cabezal a lo largo de la trayectoria definida a la vez que deposita el material genera unos cordones de soldadura que se van solapando entre sí, creando una nueva capa que cubre la superficie deseada.

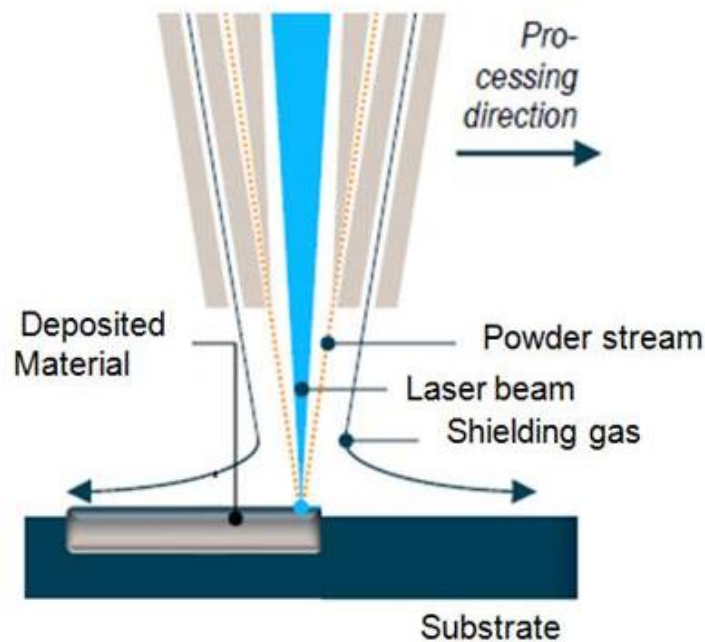


Ilustración 7: Esquema proceso LMD. Fuente: Lasertoday.

Como se ha comentado, el material aportado puede ser en forma de hilo o polvo. En este aspecto, confrontan las mejores características del hilo frente a la facilidad y los logros de la fabricación con polvo. El reto actual reside en la optimización de la fabricación con materiales en forma de hilo debido a su mayor productividad relacionada con las mayores tasas de aporte, la reducción del desperdicio de material y el menor coste de los materiales en este formato. (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004)

El Laser Cladding supone una gran variedad de ventajas frente a los procesos tradicionales de fabricación en los que el material es sustraído, pero también aporta mejoras en comparación con otros procesos de fabricación aditiva. Entre sus ventajas o propiedades destacan las siguientes:

- La dilución del sustrato es mínima, lo que conlleva que las propiedades del material portado se conserven sin ser alteradas por la mezcla con el sustrato.
- Baja y controlada entrada de calor en el sustrato, permitiendo una mínima distorsión térmica en él.
- Produce un relleno óptimo de la superficie debido a la baja porosidad del material aportado.
- La alta velocidad de enfriamiento permite una rápida solidificación formando microestructuras finas.
- Posibilita aportes selectivos de material en áreas pequeñas, lo que hace que sea un proceso de alta precisión que permite fabricar piezas de alto valor añadido con detalles y elementos geométricos muy complejos.

Debido a las ventajas ofrecidas, las aplicaciones industriales más comunes se pueden englobar en tres grandes áreas: (IK4-TEKNIKER, s.f.)

- **Refuerzo de componentes** mediante la aplicación de recubrimientos con aleaciones metálicas con las propiedades deseadas que actúen frente al desgaste y la corrosión, e incluso que actúen de barrera térmica en moldes, matrices, herramientas, alojamiento interior de componentes y conductos.
- **Recuperación y reparación** de herramientas, moldes, matrices, troqueles, engranajes y componentes, además de cambios rápidos de diseño, errores de mecanizado o fabricación y desperfectos ocasionados a lo largo de la vida útil de la pieza.
- **Fabricación aditiva de piezas y estructuras metálicas 3D:** componentes funcionales, estructuras, etc.

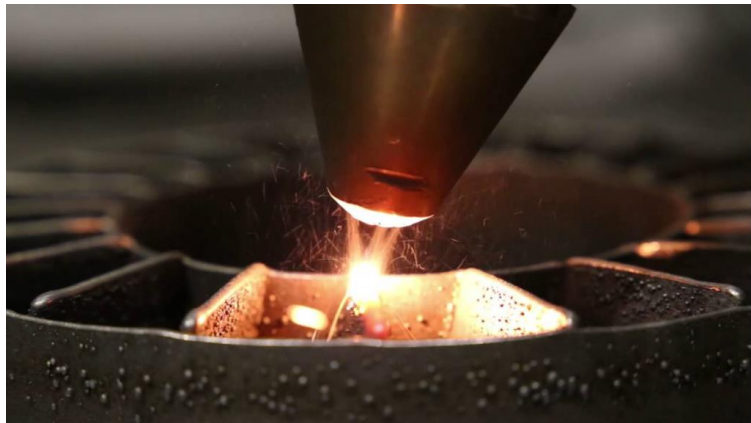


Ilustración 8: Fabricación mediante LMD. Fuente: IK4-TEKNIKER.

Según Toyserkani (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2004), el desarrollo de la tecnología Laser Cladding depende completamente del avance de las tecnologías involucradas. Llegar a comprender las interconexiones de dichas tecnologías y la calidad del proceso y tener la capacidad de controlarlas, es un paso importantísimo en su evolución. Sin embargo, un mayor número de las tecnologías involucradas en el Laser Cladding, no sólo incrementan la complejidad del proceso, sino que también supone un mayor número de parámetros requeridos.

Varios retos que actualmente presenta la tecnología Laser Cladding son, el alto coste de inversión, baja eficiencia de las fuentes de energía y la falta de control sobre el proceso. Debido a estas imperfecciones que todavía presentan este tipo de procesos, no está ampliamente extendido en el sector de la fabricación metalúrgica. No obstante, se podría decir que se encuentra en las primeras etapas de comercialización donde la investigación y optimización de los parámetros y procesos es clave para su desarrollo. La investigación deberá comprender las relaciones entre la energía del

láser, la velocidad del proceso, la tasa de aporte de material, la inclinación del cabezal respecto a la superficie base y las propiedades mecánicas y metalúrgicas.

La flexibilidad del Laser Cladding está empezando a ser reconocida por numerosas industrias y centros de investigación poniendo el foco en desarrollarla y exprimir el potencial industrial que promete ofrecer.

3.4. Objetivos y alcance

El desarrollo de los actuales softwares de fabricación asistida por ordenador (CAM) ha evolucionado a lo largo de los años junto con los avances en programación y automatización, pero han requerido de años de experiencia en los procesos tradicionales de fabricación. Del mismo modo, la realización de softwares CAM dirigidos a una tecnología tan novedosa y aún por explorar como es la fabricación aditiva afronta complejidades que ralentizan su desarrollo.

Por este motivo, es importante definir cuáles son los objetivos y el alcance del trabajo, separándolos de aquellos aspectos que se han dejado al margen y complicarían excesivamente la realización de este trabajo, agrupándolos en los posibles retos futuros.

Por lo tanto, dentro de IK4-TEKNIKER y a demanda de este centro tecnológico, el trabajo aquí presente tiene como objetivo principal diseñar una herramienta para la generación de trayectorias en fabricación aditiva para componentes metálicos. La aplicación se ha desarrollado en el entorno Matlab, sirviendo de conexión entre el software CAD con el que se genera el archivo STL, y el brazo robot y cabezal de aporte al que se introduce el código proporcionado por la herramienta creada.

Se ha comentado cómo las tecnologías aditivas ofrecen principalmente tres aplicaciones: el refuerzo de piezas, la reparación y la fabricación. Aunque se ha llegado a desarrollar una herramienta dedicada a la generación de trayectorias para la reparación de piezas, este trabajo ha sido dirigido a la fabricación de piezas, partiendo de la división por planos del modelo. También se han establecido los principios fundamentales para la generación de trayectorias en refuerzo de piezas que requieren bases no planas.

De esta manera, la consecución de este programa ofrece al centro tecnológico la posibilidad de calcular las trayectorias para la fabricación de piezas simples mediante tecnologías aditivas sin la necesidad de depender de los costosos softwares comerciales. Formando parte del proceso de fabricación, se desea agilizar y facilitar la obtención de las trayectorias introduciendo varios parámetros relacionados con la fabricación de la pieza. Quedan fuera del alcance de este trabajo la simulación del proceso de fabricación, por ejemplo, la simulación de tensiones o la termográfica, y la consiguiente capacidad de control.

A continuación, se describen los objetivos parciales que se han perseguido a lo largo

del trabajo con la intención de alcanzar el objetivo principal:

- Comprender las capacidades de los softwares del mercado actual y las investigaciones en el sector e identificar las carencias de dichas herramientas.
- Obtener una herramienta que genere la trayectoria que deberá seguir el cabezal de aporte en 3 ejes (o 2,5 ejes).
- Alcanzar una actualización de esta herramienta que ajuste la inclinación del cabezal a las condiciones del modelo, generando una trayectoria en 5 ejes simultáneos.
- Poseer la capacidad de fabricación de piezas relativamente simples, tanto huecas como rellenas.
- Obtener un diseño modular del programa, permitiendo introducir funciones y mejoras.

3.5. Beneficios

La labor de los centros tecnológicos de investigación se basa en el desarrollo de conocimientos en función de la demanda del entorno. Cada proyecto planificado promete ofrecer contribuciones a las tecnologías y las empresas a las que se destina, catalogando los beneficios en científico-técnicos y económicos, que generalmente van de la mano.

En el siguiente apartado se describen los principales beneficios que se esperan conseguir con la realización de este trabajo. Para ello, se dividen por una parte los científico-técnicos en los que se engloban el aumento del conocimiento y la mejora de la técnica, y por la otra los económicos, tanto del centro como de empresas exteriores del sector.

3.5.1. Contribuciones científico-técnicas. Plan de difusión

La naturaleza del ámbito en que se envuelve este trabajo hace que resulte relativamente fácil encontrar carencias en el estado actual de esta tecnología. Se le debe dar una gran importancia al estudio del estado del arte para analizar la demanda tecnológica e identificar qué aspectos se deben fortalecer.

En concreto, se han analizado los métodos de generación de trayectorias y las alternativas para generar el código que manipule el brazo robot.

A petición de IK4-TEKNIKER, se ha realizado una herramienta para generar las trayectorias para fabricación aditiva de componentes metálicos basándose en los métodos utilizados hasta el momento, tanto en el centro como en el sector, y con la intención de obtener varios beneficios respecto a estos.

- ✓ El programa es capaz de calcular automáticamente (tras la introducción de varios parámetros) las trayectorias que debe seguir el cabezal a partir del archivo STL de la pieza, actuando como una conexión rápida y sencilla entre el CAD y el manipulador del robot.
- ✓ Permite trabajar con una gran variedad de piezas tanto cóncavas como convexas. Va dirigido a piezas de relativa sencillez, de una sola superficie por cada capa (aunque puede llegar a funcionar con varias superficies), sin ángulos agudos y una gran variedad de tamaños (limitada por la distancia entre cordones y la capacidad de cálculo de Matlab). La generación de las trayectorias se adecua al tipo de pieza y obtiene un resultado óptimo sin necesidad de realizar cambios en el algoritmo.
- ✓ Ofrece funcionalidades que cubren las carencias de las alternativas:
 - Por un lado, la optimización de la trayectoria, que describe con gran exactitud el perímetro de cada modelo a la vez que crea un patrón de relleno en el interior ajustado a dicho perímetro. Esto asegura el

- completo relleno de la pieza de forma uniforme sin la creación de huecos entre perímetro y pasadas del interior.
- Por otro lado, la capacidad de trabajar en 5 ejes, apropiada para la producción de piezas con paredes inclinadas. La inclinación del cabezal se determina en función de la inclinación de la pared que puede variar a lo largo de cada capa, de forma que el material se vaya depositando adecuándose a las condiciones de cada punto. Además, las capas en las que ha sido dividido el modelo se ajustan a las variaciones del crecimiento del material depositado debido a la inclinación.
 - ✓ Actualmente es una herramienta funcional para fabricación aditiva, pero puede servir como base a la que, mediante ensayos y experiencia, añadir optimizaciones y nuevas funciones.
 - ✓ Se ha planteado la redacción de un artículo de investigación analizando el estado del arte de la generación de trayectorias para fabricación aditiva de componentes metálicos e identificando las carencias de los actuales métodos, a la vez que plantear soluciones.

3.5.2. Contribuciones económicas. Plan de explotación.

Actualmente, aunque las tecnologías de fabricación aditiva supongan varias ventajas tanto técnicas como económicas a la hora de producir piezas más complejas y con mayor grado de personalización, implementarlas en una empresa requieren de una gran inversión económica. Por este motivo, en este sector, cada avance científico-técnico suele ir enfocado a una contribución económica.

La realización de este trabajo no obtiene un beneficio económico de forma directa, ya que el programa se ha planteado únicamente para un uso interno y no con el fin de dar servicio a las empresas del sector. Sin embargo, es posible cuantificar la contribución económica que ofrece al centro tecnológico al posibilitar el cálculo de las trayectorias para la fabricación de piezas simples mediante tecnologías aditivas sin la necesidad de depender de los costosos softwares comerciales. Como se muestra más adelante en el presupuesto, la licencia de NX-CAM con el módulo de fabricación aditiva cuesta alrededor de 10.000 € anualmente. El uso de esta herramienta para pruebas o fabricación de piezas sencillas reemplaza el uso de softwares como el de NX, reduciendo la cantidad de licencias necesitadas por la empresa y contribuyendo así económicamente.

Por otra parte, el tiempo total del proceso de fabricación está relacionado directamente con el coste del producto final. El programa creado obtiene automáticamente el código con las trayectorias a partir del archivo STL por lo que se eliminan los tiempos de creación, simulación y adaptación de las trayectorias. Este ahorro es beneficioso solamente cuando este proceso supone un porcentaje relevante

del tiempo total de fabricación. Es decir, pasa a ser insignificante en la producción de piezas de gran tamaño en los que las limitaciones en la tasa de aporte implican largas duraciones en el proceso de deposición.

3.6. Estado del arte

Es ampliamente reconocida la evolución de la digitalización en todos los sectores de nuestras vidas que, lejos de su obsolescencia, es la herramienta principal que permite el desarrollo de ciencias y tecnologías. Evidentemente, los sectores del diseño y la fabricación de productos no son ajenos a este fenómeno: Los sistemas de Diseño Asistido por Computador (CAD), que facilitan la proyección del producto, y de Fabricación Asistida por Computador (CAM), que apoyan a las operaciones de fabricación ofreciendo los códigos que se introducen en las máquinas. La interacción de dichos sistemas ha sido clave en el desarrollo de las ingenierías relacionadas con la fabricación.

La combinación de estos sistemas CAD/CAM ha facilitado los procesos de fabricación, permitiendo la transferencia de información desde la etapa de diseño a la etapa de fabricación del producto. De esta manera, el sistema CAM sirve de puente entre el diseño creado en el CAD y el lenguaje de programación de las máquinas herramienta, a las que ofrece los datos y las instrucciones para operar y controlarlas. Una de sus mayores virtudes se haya en las operaciones de mecanizado, para las que obtiene las trayectorias de la herramienta en el proceso de fabricación. Este factor es de gran interés en las tecnologías de fabricación aditiva, donde la trayectoria de la herramienta posee una gran importancia en la estrategia de aporte y en la calidad de la construcción.

Tanto el tiempo como la experiencia en los procesos de mecanizado han posibilitado el desarrollo y la optimización de los actuales softwares CAM para los procesos tradicionales de fabricación como el torneado, el fresado o el taladrado entre otros. Sin embargo, la inmadurez tecnológica que presenta la fabricación aditiva también se ve reflejada en las capacidades de los softwares del ámbito. El cambio en el modo de fabricación de un proceso sustractivo al aporte directo de material obliga a los programas a adaptarse a los nuevos requisitos (Campos, Ochoa, Arrien, & Marcaide, 2012). Los grandes creadores de softwares como NX o Autodesk han llegado a sacar al mercado herramientas propias dirigidas a varias tecnologías de la fabricación aditiva, pero todavía cuentan con limitaciones en sus cualidades y aplicaciones. Esta es la razón por la que el desarrollo de generadores de trayectorias sea uno de los puntos de mira de los investigadores del sector, siendo este un factor crítico en la calidad de los productos fabricados.

En general, el primer paso para llevar a cabo la fabricación de una pieza mediante fabricación aditiva es el diseño mediante un software CAD 3D. La proyección de la pieza deseada es creada con exactitud, definiendo las dimensiones y los detalles

requeridos. Este modelo define la estructura virtual en la que se deberá ir depositando material capa por capa. El uso de los sistemas CAD puede ser innecesario cuando se trata de ensayos o pruebas en las que la geometría que se va a fabricar es muy simple, como pueden ser líneas, columnas o paredes.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la fabricación aditiva se basa en la deposición de material de forma semicontinua siguiendo una trayectoria previamente definida hasta completar la pieza. Por lo tanto, a partir del modelo creado en el CAD, el siguiente paso consiste en la separación de la pieza en un número finito de capas con la misma orientación axial en las que se define la trayectoria.

Actualmente existen varias alternativas que permiten la generación de la trayectoria, cada cual con sus ventajas y limitaciones. A continuación, se exponen los principales métodos, que conforman el entorno más cercano en el que se envuelve este TFM.

3.6.1. Softwares especializados

El software CAM es una herramienta esencial para la gestión de la fabricación, la elaboración de planos de mecanizado, la definición de la herramienta y de su trayectoria y la programación de control numérico. En cuanto a los procesos de mecanizado, estos sistemas generan manual o automáticamente las trayectorias de las herramientas en las superficies a mecanizar que indique el usuario. Esta cualidad resulta interesante para las tecnologías de fabricación aditiva debido a las similitudes entre el movimiento de la herramienta de mecanizado y el movimiento del cabezal láser.

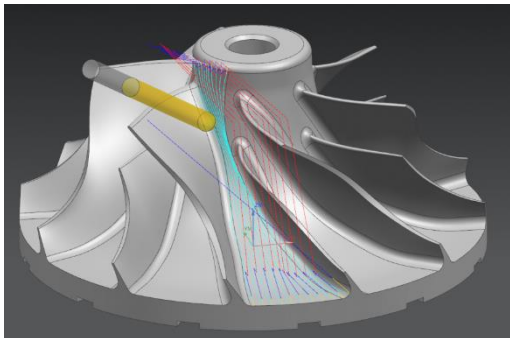


Ilustración 10: Trayectorias de la herramienta en mecanizado. Fuente: grupo plm.

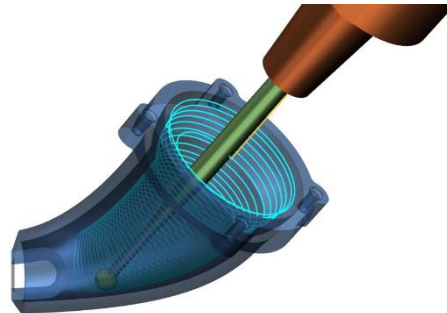


Ilustración 9: Trayectorias de la herramienta en mecanizado. Fuente: 3dcadportal.

Sin embargo, el planteamiento de la estrategia del movimiento es totalmente opuesta dado que en el mecanizado la herramienta debe extraer el material de la pieza inicial, y en la fabricación aditiva el cabezal debe ir depositando material a lo largo de la trayectoria. Por este motivo, las características y las condiciones de ambos movimientos son distintas. A la hora de mecanizar superficies, se debe tener en cuenta que no existan colisiones con el resto de la pieza, tanto a lo largo del mecanizado como en la entrada y salida de la herramienta. Por este motivo, la simulación del proceso es muy útil para verificar las trayectorias y garantizar la ausencia de cualquier tipo de interferencia. Al contrario, la fabricación aditiva mediante la división de la pieza en capas planas asegura que ningún elemento de la maquina colisione con la pieza en proceso de fabricación. En cualquier momento del proceso, la altura del extremo del cabezal siempre es mayor que el punto más alto de la pieza fabricada hasta el momento.

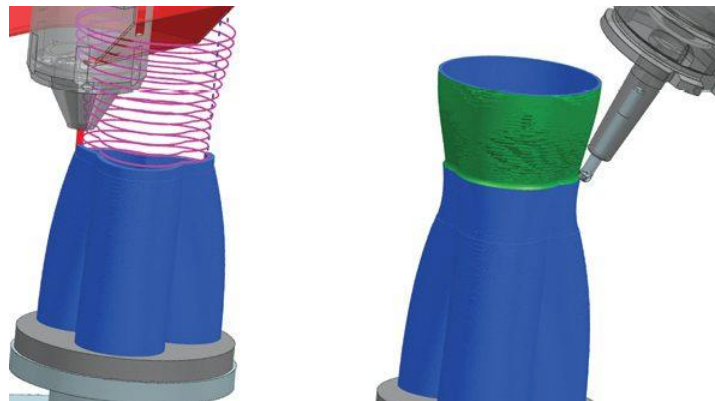


Ilustración 11: Trayectorias para FA y para mecanizado. Fuente: Siemens PLM

En la fabricación aditiva, la trayectoria del cabezal establece exactamente dónde se va a depositar el material por lo que la optimización de la trayectoria afecta directamente a la calidad del producto final. Es fundamental que cada una de las capas depositadas crezca una altura igual a la preestablecida y de forma uniforme. Por esta razón, mantener la distancia entre movimientos y evitar intersecciones son principios clave en la generación de las trayectorias.

Esta condición es mucho más restrictiva cuando se trabaja con componentes metálicos, causando una destacable diferencia en el nivel de complejidad entre las trayectorias para materiales plásticos y metálicos. Actualmente, existe una gran variedad de softwares dedicados a las pequeñas impresoras 3D que trabajan con materiales termoplásticos y son libres para cualquier usuario. Al contrario, la cantidad de softwares para procesos de fabricación aditiva de componentes metálicos, y a diferencia con los existentes softwares CAM para mecanizado, es mucho menor y se encuentran en constante desarrollo.

A lo largo de la realización de este trabajo, se han analizado varios programas para conocer mejor el estado de la técnica y a continuación se presentan los principales:

Siemens NX CAM AM

La multinacional Siemens posee una gran experiencia en cuanto a softwares CAM se refiere, ofreciendo mediante varios módulos de NX una amplia variedad de funcionalidades como, por ejemplo, la simulación integrada de la máquina-herramienta, el mecanizado de eje múltiple mediante cortes automatizados o la creación y modificación manuales de trayectorias de herramientas. NX se enfoca en el que ellos llaman *fabricación aditiva híbrida*, que se basa en la incorporación de la deposición de material en el entorno de la manufactura tradicional, a la vez que interrelacionan ambas técnicas.

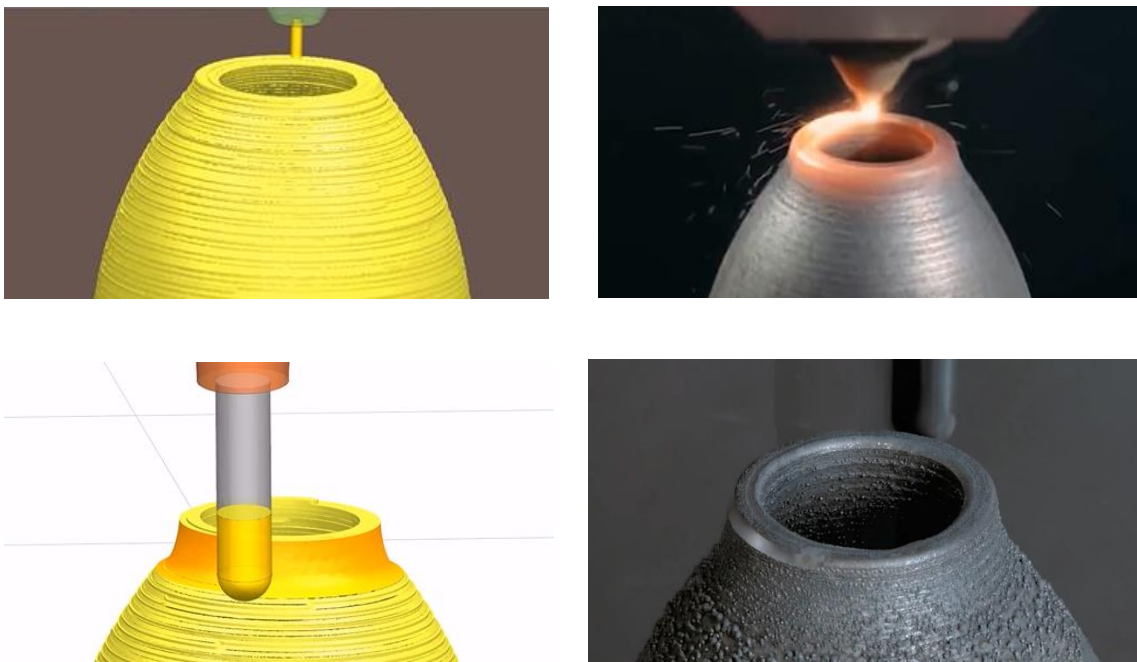


Ilustración 12: Capacidad de simulación tanto de las operaciones láser como de las de mecanizado.

NX CAM ofrece al usuario la capacidad de definir trayectorias de herramientas de varios ejes controladas con precisión sobre superficies complejas, con una eficaz comprobación de colisiones y calibres (Avantek, 2014). Esta habilidad es clave en el más reciente módulo de fabricación aditiva de NX.

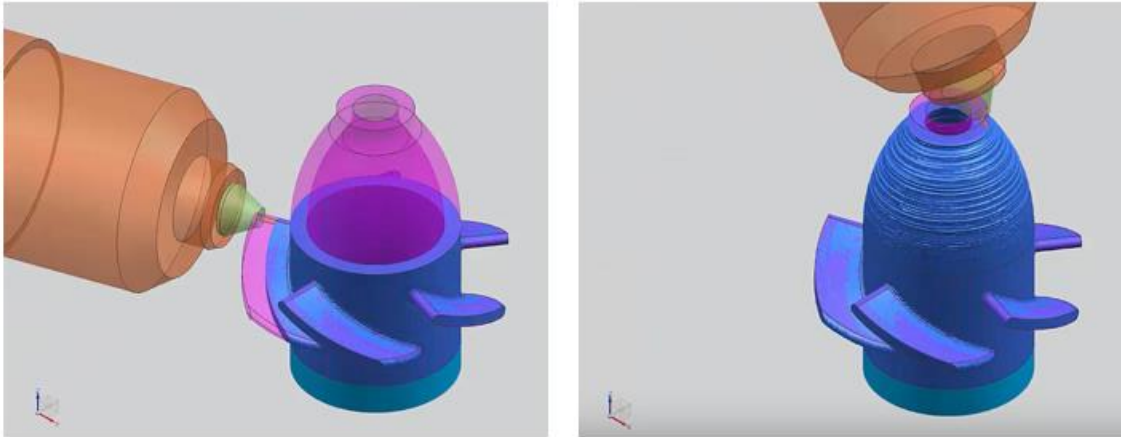


Ilustración 13: Simulación del proceso de fabricación aditiva de diferentes partes mediante NX CAM AM. Fuente: Siemens PLM (Youtube).

La generación de trayectorias de la herramienta en el módulo de fabricación aditiva de NX es similar a la de los procesos de mecanizado, donde es posible realizar el proceso mediante varios métodos. Durante la realización de este trabajo, se han conocido las estrategias de aporte que ofrece el programa, pero no se han podido analizar experimentalmente ni comprobar sus capacidades y calidad del resultado.

Por el momento, NX permite al usuario depositar material con varias estrategias entre las que se encuentran el zigzag, contornos cerrados y espiral, y tiene la capacidad de trabajar tanto con capas planas (ilustración 12) como con capas que se ajustan a la forma de la superficie (alabe de la ilustración 13). Asimismo, dispone de varios modos de definir la inclinación del cabezal: En el caso de capas planas, el eje de la herramienta puede mantenerse perpendicular al plano de dichas capas, o se puede definir una inclinación automática, donde en las trayectorias perimetrales el eje toma una orientación tangencial a la superficie de la pared en función del punto en el que se encuentra. Para el caso de las superficies no uniformes, incorpora la posibilidad de inclinar la herramienta respecto a un eje de rotación. (Siemens PLM, 2017)

Autodesk Netfabb

La empresa estadounidense Autodesk se incorpora al mercado de la fabricación aditiva con el lanzamiento de su software Netfabb, que optimiza y valida los diseños, prepara la fabricación y ofrece herramientas de simulación en un solo entorno. Es capaz de importar modelos de los principales sistemas CAD, convirtiéndolos a archivos STL editables para poder analizar, reparar y optimizar los modelos.

Una de sus principales ventajas es la capacidad de simulación de la deposición capa a capa, prediciendo las tensiones estructurales y deformaciones de las partes metálicas. Además, optimiza el diseño en función del post-procesado CNC que normalmente

requieren las piezas fabricadas mediante esta tecnología, añadiendo material en puntos críticos que más tarde son corregidos en los procesos sustractivos. (Autodesk Netfabb, 2017)

Sin embargo, el software está limitado a tecnologías aditivas en las que el material es depositado previamente como Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) o Stereolithography (SLA), cuya trayectoria de la herramienta no es válida para la tecnología de aporte directo de metal (LMD).

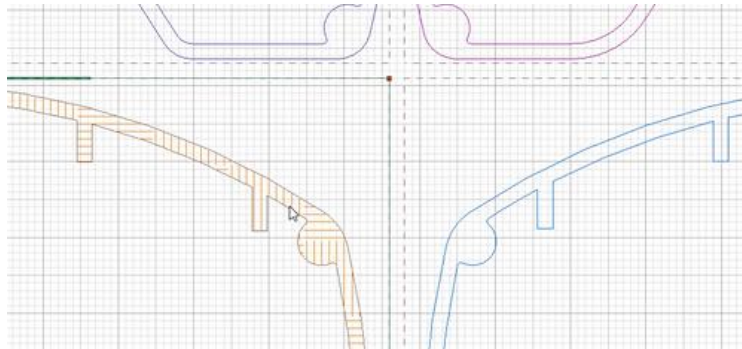


Ilustración 14: Trayectorias en Netfabb. Fuente: Autodesk Netfabb (Youtube)

En la ilustración aquí mostrada se puede comprobar el tipo de trayectorias de relleno con las que trabaja el software Netfabb, que son características de la tecnología SLM.

Renishaw

Renishaw es una de las empresas líder en el mundo de la fabricación aditiva que tiene como intención llevar esta tecnología a los procesos de producción. Ofrecen una solución completa para fabricación aditiva de metales, desde máquinas propias, hasta materiales y softwares.

Han desarrollado varios softwares para sistemas de fusión de capas de polvo metálico orientados a diferentes aspectos del proceso de fabricación. Por un lado, los encargados de la planificación y el control: InfiniAM Central, con el que se puede realizar un seguimiento de la construcción a tiempo real presentando los datos que obtiene de varios sensores y InfiniAM Spectral que controla la intensidad del láser y el baño fundido para asegurar la fiabilidad de la construcción. Por otro lado, el sistema QuantAM es una herramienta de preparación de archivos en formato STL para los sistemas de fabricación aditiva de Renishaw. Este software es el que se encarga de la generación de la trayectoria de la herramienta láser que, a su vez, permite su visualización y verificación. (tct magazine, 2017)

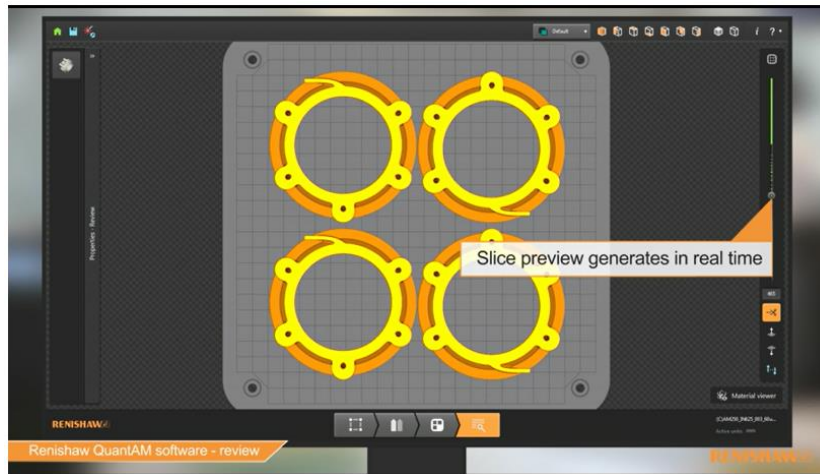


Ilustración 15: Visualización de las diferentes capas. Fuente: Renishaw.

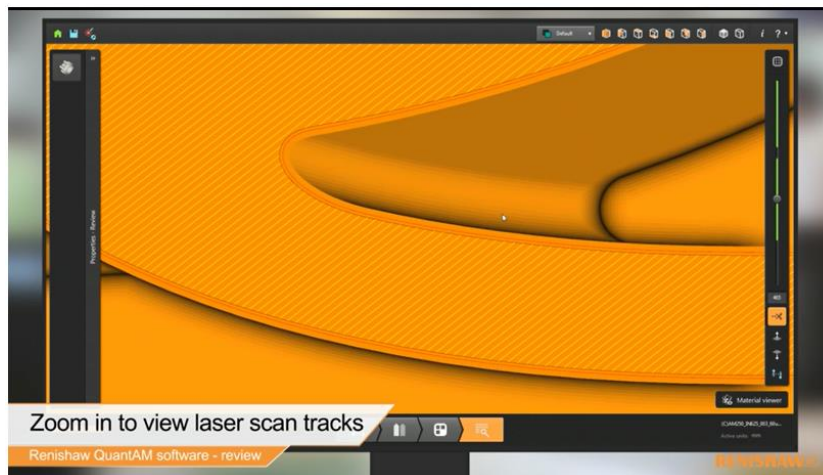


Ilustración 16: Visualización de la trayectoria. Fuente: Renishaw.

Este software está específicamente diseñado para ser usado en los sistemas de fabricación aditiva de metales que Renishaw ofrece. Además, va enfocado a la tecnología de cama de polvo, y no a la deposición directa de material tanto de hilo como de polvo, por lo que la estrategia de deposición es completamente diferente.

Programas para plásticos

Por otro lado, cabe destacar la gran variedad de softwares existentes dedicados a los materiales termoplásticos y las conocidas impresoras 3D. Son conocidos como programas laminadores, ya que su principal función es dividir el modelo 3D en capas y generar el fichero G-code que contiene las instrucciones para la impresora. De la misma forma que en las tecnologías para componentes metálicos, se requiere predefinir el movimiento del cabezal para ir depositando el material sucesivamente capa por capa.

Existe una gran diferencia en cuanto a las solicitudes técnicas requeridas por los procesos de plásticos y los procesos de materiales metálicos. Varios investigadores han empleado estos softwares para generar las trayectorias y ser utilizadas en procesos de fabricación aditiva de componentes metálicos. Sin embargo, son requeridos varios cambios en los resultados obtenidos, como la adición de parámetros para controlar los complejos sistemas tecnológicos y la adaptación de los valores de varios parámetros técnicos del proceso de fabricación, ancho del cordón, solape, altura entre capas, velocidad de movimiento o tasa de aporte entre otros.

3.6.2. Softwares adaptados

El rápido avance que se le está solicitando a las tecnologías de fabricación aditiva está causando una constante investigación en todos sus aspectos. Teniendo en cuenta la inmadurez tecnológica que presenta debido a que el gran interés que posee actualmente por parte de la industria se limita a los últimos años, es entendible la insuficiencia en el desarrollo de los softwares especializados.

Por este motivo, son varios los investigadores enfocados en el estudio y desarrollo de dichos softwares con la intención de, entre otros aspectos, optimizar la generación de trayectorias de la herramienta. Aunque el estudio de los movimientos de la herramienta para el mecanizado multi-axial se encuentre plenamente avanzado, los procesos aditivos requieren un mayor nivel de optimización que depende de diversos parámetros. Ciertamente, y al contrario que en los procesos de mecanizado, la calidad estructural y geométrica de la pieza producida con deposición directa de material es completamente dependiente de la trayectoria y de la estabilidad de la deposición. Una de las tendencias actuales para obtener estrategias de movimiento, consiste en el uso de software comerciales no específicos para la deposición directa de material, sin embargo, se requieren consideraciones adicionales necesarias para generar estrategias de deposición.

En este apartado se presenta el estado del arte de las trayectorias para fabricación aditiva mediante varios estudios e investigaciones del ámbito, tanto para optimizar el patrón de movimiento en 2D como la mejora del movimiento multi-axial.

En cuanto al diseño de trayectorias en 2D, existen varias estrategias básicas como el zigzag, el contorno o la espiral, cada una con sus ventajas e inconvenientes, pero la calidad del diseño influye directamente en la construcción de cada capa pudiendo crearse irregularidades debido al exceso o la insuficiencia de material depositado. (J. Choi, J. Mazumder, & A. Schifferer, 1999)

Autores como Swathi Routhu se centran en la eficiencia de la deposición del patrón de zigzag, desarrollando un método en el que la dirección del zigzag se basa en la

geometría de la pieza, que es dividida en subáreas conectadas de forma que la suma de los movimientos sin deposición es reducida (Routhu, 2010).

En el trabajo realizado por Yu-an Jin y Yong He, se estudia la posibilidad de optimizar la dirección del zigzag con el propósito de minimizar los excesos e insuficiencias de material que se crean en las uniones entre los tramos paralelos debido al ángulo de giro. Al mismo tiempo, también realizan una división de la pieza y una posterior unión estratégica de las subáreas para reducir los saltos (Jin, He, Xue, & Fu, 2014).

Con el fin de mejorar la calidad de la pieza construida, nace la denominada trayectoria híbrida que se trata de la combinación del patrón de zigzag y de contorno. En (Jin, Li, Gao, & Popplewell, 2012) se presenta un método capaz de mejorar la precisión geométrica y el tiempo de construcción. Utiliza el patrón de contorno basado en las curvas NURBS (Non Uniform Rational B Spline) para generar el perímetro de la sección para preservar la calidad geométrica, y lo combina con la mejor orientación del zigzag para realizar el relleno del interior y reducir el tiempo de producción.

En el estudio de (Jin, He, Fu, Gan, & Lin, 2014) se presentan varias optimizaciones a la estrategia de deposición híbrida: Se analiza la orientación óptima del zigzag para reducir los ángulos del giro en los bordes, y con ello las zonas de exceso y escasez de material. Se estudia la conexión entre las subáreas para minimizar la cantidad de movimientos sin deposición y se utilizan curvas paramétricas para conectar estos saltos y poder salir y entrar a los tramos de deposición de forma tangente para reducir el efecto de la aceleración del cabezal.

Otro modo de optimizar la trayectoria híbrida se presenta en (Ding D. , Pan, Cuiuri, & L, 2014). Se toma como referencia la división de la superficie en varias subáreas convexas en las que se realiza un relleno del interior mediante zigzag unido a una trayectoria de contorno por cada zona dividida. La orientación del zigzag se adecua para reducir el número de cambios de dirección, y todas las subáreas son conectadas creando una trayectoria continua única por cada capa.

Por otro lado, para beneficiarse de las ventajas del patrón de contorno, se plantea un método en el que se analiza el esqueleto de la geometría mediante *Medial Axis Transformation* y se crea la trayectoria de contorno de dentro hacia afuera manteniendo la distancia entre cordones de deposición asegurando el completo relleno de la capa (Ding D. , Pan, Cuiuri, & Li, 2015).

En la investigación de (Liu, Wang, Zhang, Sparks, & Liou, 2016) se presenta una trayectoria fluida con el fin de mejorar la precisión dimensional y la calidad superficial. El método utilizado se basa en la sustitución de los bordes de giro de las estrategias de zigzag y contorno por curvas paramétricas basadas en funciones trigonométricas para

evitar variaciones en la velocidad del movimiento.

En (Rui, Haiou, Guilan, Shangyong, & Runsheng, 2017) se desarrolla una trayectoria de contorno a partir del esqueleto de la geometría obtenida mediante los diagramas de Voronoi (Polígonos de Thiessen, 2018), que a continuación es discretizada para generar un mallado cuadrilátero para estudiar la distribución de deformaciones y tensiones de la pieza.

Del mismo modo, investigaciones como (Nickel, Barnett, & Prinz, 2001) han analizado la relación entre las diferentes estrategias de deposición y las tensiones debidas a los gradientes de temperatura y las desviaciones en la construcción de la pieza, llegando a observar los movimientos y las orientaciones óptimas según el tipo de geometría.

Desarrollos como (Nilsiam, Sanders, & Pearce, 2017) han logrado la manipulación y adaptación a fabricación aditiva de componentes metálicos de softwares libres para impresión 3D de plásticos. En este caso, se han basado en *CuraEngine*, añadiendo funcionalidades necesarias para la deposición de metales: la habilidad de cambiar la anchura del cordón del perímetro, evitar movimientos de solape sobre el trayecto anterior, la conexión adecuada entre el patrón del perímetro y el de relleno del interior, añadir una pausa ajustable entre capas para posibilitar el enfriamiento del sustrato, la posibilidad de configurar el apagado y encendido de la fuente de energía y su potencia y la manipulación de la tasa de aporte.

En cuanto a impresión de plásticos o siliconas, existen varias impresoras que debido a las propiedades del material deben permitir una extrusión continua del mismo. Por este motivo, (Fleming, y otros, 2000) han analizado la generación de trayectorias que cumple con este requerimiento. La estrategia utilizada se basa en el problema del viajero ambulante (TSP en inglés) (Problema del viajante, 2018) para generar una trayectoria que recorra toda la superficie sin intersecar movimientos y con el menor recorrido posible, y al igual que en el caso anterior, el algoritmo creado se implementa en el programa de plásticos *Slic3r*.

Del mismo modo, en el estudio de (Ganganath, Cheng, Fok, & Tse, 2016), se plantean varios algoritmos heurísticos para optimizar las soluciones al problema del viajero ambulante adaptándolo a la fabricación aditiva en general. Principalmente, se centra en la obtención de la eficiencia en el tiempo de construcción, a partir de la adecuada unión de los diferentes tramos de cada capa.

Por otro lado, hay quienes centran sus investigaciones en maximizar las posibilidades que ofrece la fabricación aditiva mediante el movimiento en 5 ejes. El principal objetivo es obtener la capacidad de fabricación de piezas con mayor complejidad y mejor calidad geométrica. Varios autores basan sus estudios en las actuales

posibilidades del mecanizado en 5 ejes, planteando procesos productivos que combinan la deposición directa de material con los procesos de extracción.

El estudio realizado por varios autores especializados en el sector (Wulle, y otros, 2017) identifica las limitaciones actuales y las capacidades de la tecnología FDM multi-axial, a la vez que comenta el actual avance tecnológico mencionando el necesario desarrollo de los actuales softwares CAD-CAM, para generar, por ejemplo, estrategias de relleno en 3 dimensiones.

En el trabajo de Ruan, Eiamsa-ard y Liou, se presenta un método que integra ambos procesos de forma automática para fabricar piezas de forma más eficiente. Al mismo tiempo, se plantea un algoritmo de rebanado adaptable para 5 ejes capaz de generar capas uniformes y no uniformes. El estudio se centra en las ventajas que presenta la fabricación mediante capas no uniformes, pudiendo variar la dirección de construcción y adaptar la altura de cada capa basado en la geometría local. Sin embargo, la capa no uniforme es producida a partir de una capa uniforme que posteriormente es mecanizada. (Ruan, Eiamsa-ard, & Liou, 2005)

En el caso de (Kapil, Legesse, Kumar, & Karunakaran, 2017), también se centran en la utilización de capas no uniformes que ajustan la altura de la capa en función del gradiente de cada región de la pieza. Sin embargo, la capa no uniforme es creada a partir del continuo ajuste de los parámetros de deposición como la velocidad de movimiento, la potencia de la fuente de energía y la inclinación de la herramienta. Por otro lado, en el caso de geometrías con salientes y rebanado mediante capas planas, se presenta un método en el que la utilización de 5 ejes es requerida para la fabricación del perímetro, mientras que se mantiene la orientación vertical para el relleno interior.

Lee y Jee han elaborado un algoritmo para facilitar la construcción de piezas con geometrías colgantes mediante la orientación del cabezal laser, y así evitar la utilización de estructuras de soporte. El método se basa en la identificación de las partes del modelo que requieren la reorientación del cabezal, y tras identificar la dirección de construcción de cada tramo, se realiza el rebanado en función de dicha dirección. De esta forma, la orientación de la deposición es determinada por cada zona de la trayectoria que compone la pieza. (Jee & Lee, 2015)

En la investigación llevada a cabo por la UPV/EHU (Calleja, y otros, 2014), parten de la necesidad de implementar los 5 ejes continuos, en vez de los actualmente comunes 3 ejes o 3+2 ejes, que posibiliten un mayor grado de complejidad de las piezas a producir. Durante el estudio, se ha realizado un proceso de recubrimiento mediante diferentes estrategias de aporte en capas no uniformes que requieren el movimiento

en 5 ejes continuos a la vez que se han analizado los parámetros del proceso y seleccionado los valores óptimos.

Boisselier, Sankaré y Engel han elaborado un método basado en la optimización de los cambios de velocidad de la herramienta con el fin de obtener un movimiento fluido y asegurar la estabilidad de la deposición. Parte del problema generado por los puntos singulares del movimiento del brazo robot, en los que puede ocurrir un elevado gradiente en la velocidad de la herramienta y errores geométricos que pueden acarrear un excesivo cambio en la orientación entre dos puntos sucesivos de la trayectoria. La solución planteada se basa en la continua sincronización entre la velocidad del cabezal y la potencia del láser para evitar el exceso o la insuficiencia de material depositado, y la definición de una tolerable máxima variación de la orientación del eje de la herramienta. (Boisselier, Sankaré, & Engel, 2014)

Por último, otros estudios se centran en la optimización a la hora de leer el archivo STL: un método para realizar el rebanado del modelo a partir de los vértices de los triángulos que lo componen (Topcu, Tascioglu, & Unver, 2011) o un estudio que mejora la eficiencia de la memoria del algoritmo que crea la división en capas almacenando únicamente las caras que intersecan con el plano de corte (Choi & Kwok, 1999).

3.6.3. Generación manual

La generación manual de las trayectorias puede parecer remontarse a los inicios de la fabricación aditiva, sin embargo, resulta ser un recurso muy utilizado para la fabricación de piezas sencillas y ensayos.

El G-code es un lenguaje de programación que recoge las instrucciones que debe ejecutar la máquina de control numérico por ordenador, en este caso la impresora 3D. Durante los últimos años de desarrollo, se han logrado deposiciones exitosas mediante G-code manualmente escritos, pero este método resulta inadecuado para todo aquel que no esté especializado en este lenguaje.

En el caso de utilizar un brazo robot para desplazar el cabezal láser y el aporte de material, es posible generar la trayectoria a partir del lenguaje de programación propio para cada fabricante. En el caso del fabricante ABB, el lenguaje RAPID sirve para determinar la secuencia de movimientos mediante una estructura modular y varias estructuras predefinidas para especificar la configuración del robot y las características de la herramienta.

Una trayectoria está compuesta por una secuencia de puntos definidos por sus coordenadas en el espacio, por lo tanto, es posible la generación manual en el caso de

piezas sencillas cuya trayectoria está compuesta por un pequeño conjunto de puntos. Un movimiento lineal en el plano XY y paralelo al eje Y puede estar compuesto por una pareja de puntos cuyas coordenadas Z y X coinciden y la diferencia entre los valores de la coordenada Y se corresponde con la distancia del recorrido. Desplazando ambos puntos una determinada distancia en dirección paralela al eje X y permutando su posición de forma que la primera y la segunda pareja de puntos estén en sentido contrario, se consigue generar el comienzo de un zigzag. Iterando el proceso se consigue un mayor zigzag, que puede ser repetido alterando la coordenada Z para generar un número concreto de capas. De esta manera, es posible generar modelos y estrategias sencillas para ser reproducidas por el brazo robot.

No obstante, la generación manual se limita a paredes o columnas de secciones transversales constantes destinadas a la producción de pruebas para llevar a cabo comprobaciones en el aporte de material y verificar la calidad en la composición de los productos.

4. METODOLOGÍA

4.1. Alternativas metodológicas

La generación de trayectorias para fabricación aditiva, debido a la inmadurez tecnológica que presenta, no dispone de una metodología común y establecida entre sus usuarios e investigadores. Asimismo, la aplicación a la que puede estar dirigida o el tipo de tecnología empleado requieren diferentes técnicas y recursos.

En el siguiente apartado se presenta un planteamiento sobre las diferentes opciones a la hora de generar las trayectorias para componentes metálicos. Anteriormente se ha elaborado un estudio acerca de las clases de softwares más comunes empleadas hoy en día, pero se ha optado por la utilización de Matlab como entorno de programación con el fin de generar una herramienta capaz de resolver las solicitudes del centro en cuanto a la fabricación de piezas sencillas, y en sustitución de los costosos softwares comerciales. El planteamiento presentado se enfoca en las técnicas utilizadas para llevar a cabo el movimiento del cabezal, que se pueden relacionar con las características que definen el tipo de movimiento.

Asimismo, se realiza un análisis sobre las alternativas presentadas mediante varios criterios que se han sido seleccionados en función de los requerimientos de la fabricación aditiva. De esta manera, las cualidades de las alternativas son valoradas mediante la utilización de unos coeficientes de ponderación.

4.1.1. División por capas (slicing)

Una etapa fundamental en el proceso de fabricación aditiva es la división en capas del modelo CAD, o rebanado. El modelo, que normalmente es almacenado como archivo STL, está constituido por un conjunto de triángulos que representan su superficie. El rebanado consiste en la intersección entre el modelo y un grupo de superficies perpendiculares a la dirección de crecimiento y paralelas entre sí. Los puntos de corte entre dichas superficies y los triángulos, generan un conjunto de curvas cerradas que representan la sección transversal de la pieza a diferentes alturas. La separación entre estas curvas coincide con la altura de capa o la altura de crecimiento de la capa

depositada.

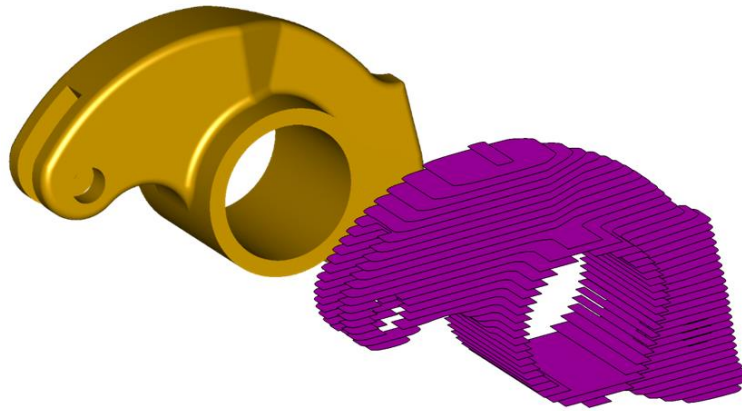


Ilustración 17: Rebanado de modelo CAD (slicing). Fuente: iti-global.

Las características del rebanado deben ser seleccionadas adecuadamente puesto que afectan directamente a la calidad del resultado final y al tiempo de construcción. La dirección de crecimiento influye en la complejidad geométrica de las capas, pudiendo perjudicar a la calidad de las trayectorias y aumentar el tiempo de producción. Las diferentes aplicaciones de esta tecnología pueden requerir diversos modelos de rebanado para adecuarse a las solicitudes de cada caso. De esta forma, se pueden distinguir principalmente dos tipos de capas: uniformes y no uniformes.

Uniformes

Las capas uniformes se definen a partir de planos horizontales a lo largo del eje Z, creando curvas cerradas de 2 dimensiones en las que se desarrolla el cálculo de la trayectoria. La distancia entre estas capas se establece en función de los parámetros permitidos por la tecnología de deposición y la calidad geométrica requerida. Un menor grosor de las capas implica la optimización de la calidad superficial, pero aumenta el tiempo de construcción.

Durante este proceso ocurren dos aproximaciones geométricas principales: la primera se debe a la transformación de un modelo CAD a un modelo compuesto por triángulos (STL) y la segunda corresponde al efecto escalera producido por la separación en capas. El primer caso es despreciable mientras el diseño haya sido transformado con un número suficiente de triángulos, lo que conlleva aumentar el tamaño del archivo y la cantidad de puntos que deberá manipular el programa desarrollado. El efecto escalera se reduce aumentando la cantidad de capas (y reduciendo la distancia entre ellas), pero mientras no cause un desvío geométrico excesivo, se corrige mediante el posterior mecanizado. Los vértices de los escalones pueden encontrarse fuera o dentro del modelo CAD, pero dado que el posterior mecanizado conlleva remover el material

extra, es conveniente situar los vértices en el exterior.

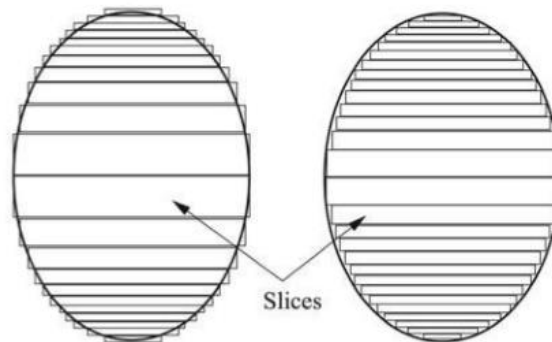


Ilustración 18: Distorsión de la geometría según la colocación de los vértices de las capas adaptables. Fuente: (Pandey, Reddy, & Dhande, 2003).

Otro método para asegurar una buena calidad superficial sin penalizar el tiempo de producción es la utilización de capas adaptables. La altura de capa depositada varía para cada una de ellas y es definida en la etapa de rebanado en función de la geometría de la pieza a esa altura. Sin embargo, la mayoría de las máquinas desarrolladas no ofrecen la posibilidad de variar los parámetros de deposición durante el proceso de fabricación.

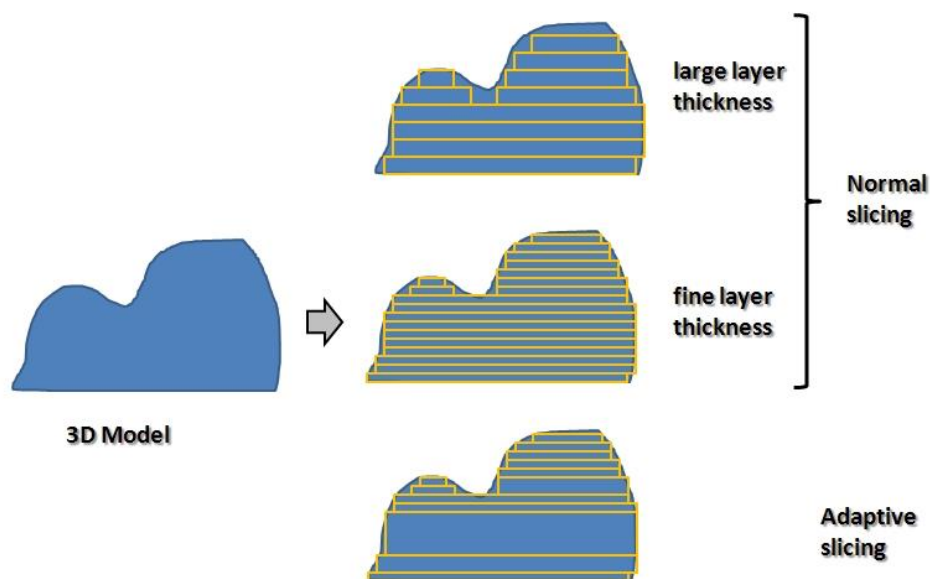


Ilustración 19: Diferentes formas de dividir la pieza mediante capas uniformes. Fuente: thomasengineering.

La utilización de capas planas es actualmente la más recurrida para la producción de piezas con esta tecnología debido a la menor complejidad a la hora de generar las trayectorias y la capacidad de usar 2.5 ejes. Por el contrario, posee limitaciones en aplicaciones como el recubrimiento sobre bases irregulares.

No uniformes

Un rebanado no uniforme del modelo requiere una mayor complejidad de las trayectorias y normalmente va de la mano del movimiento multi-axial de la herramienta.

El origen de esta necesidad puede deberse a la deposición sobre una base irregular o como respuesta a la variación en el crecimiento debido a la inclinación del cabezal. Una capa no uniforme consiste en una superficie curva en la que la coordenada Z de los puntos que la componen es variante y que se adapta a las solicitudes de la geometría.

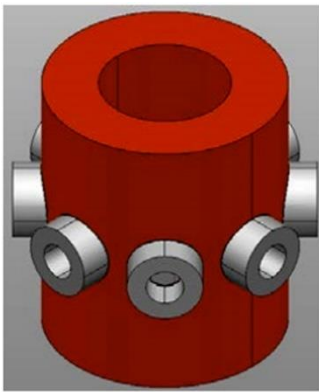


Ilustración 21: Modelo CAD y trayectorias en capa no uniforme. Fuente: (Kapil, y otros, 2017).

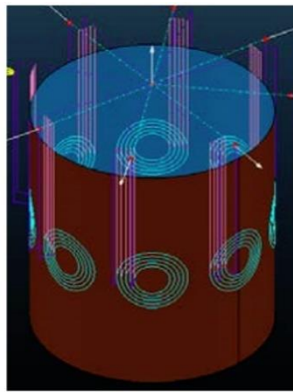


Ilustración 20: Fabricación aditiva mediante capas no uniformes. Fuente: Siemens.

Es común la necesidad de generar trayectorias sobre bases irregulares en procesos de recubrimientos o en la fabricación de elementos sobre un componente principal, como la fabricación de los alabes en torno al eje. Por otro lado, aunque se disponga de una base plana en la que empezar a depositar, a medida que avanza la construcción de la pieza, la siguiente capa se debe ir adaptando al crecimiento irregular de la deposición. Este fenómeno es la consecuencia de dos principales factores:

- Varios estudios han demostrado cómo en la deposición directa de polvo es menor la cantidad depositada cuando el cabezal se encuentra inclinado, y por lo tanto, ocurre una disminución en la altura que crece el cordón. (Arregui, Garmendia, Leunda, & Pujana, 2018)
- Una pieza en la que se tengan diferentes inclinaciones a lo largo de su contorno requiere un número diferente de capas en cada zona. Es decir, si la cara vertical de la pieza tiene una altura de 10 cm, la cara con un ángulo de 45 grados tendrá una distancia de 14,14 cm entre la base y el plano superior por lo que necesitará más material, o lo que es lo mismo, un mayor número de cordones.

Aunque por el momento los mayores éxitos de esta tecnología se hayan logrado mediante capas planas, el uso de capas no uniformes y adaptables a la geometría y solicitudes es clave en el desarrollo de piezas con mayor complejidad, movimientos

multi-axiales y el control continuo de la fabricación.

4.1.2. Ejes de movimiento

La mayoría de los procesos de fabricación aditiva actuales se basan en la división de la pieza en capas planares y se limitan a 3 movimientos lineales en los ejes X, Y y Z. La deposición del material se lleva a cabo siguiendo una trayectoria dibujada sobre estos planos, cuyo vector normal coincide con el eje Z, que también se corresponde con la dirección del crecimiento. Por lo tanto, se da un continuo movimiento únicamente sobre los ejes X e Y, produciendo un salto en la coordenada Z una vez se haya creado cada una de las capas.

Sin embargo, generalmente, el sistema móvil de los brazos robot o las máquinas CNC empleadas disponen de 6 ejes de movimiento: los mencionados 3 ejes lineales, y otros 3 ejes de rotación. Es muy frecuente el uso combinado de todos estos movimientos en el mecanizado, debido a la posibilidad de mejorar la forma geométrica y reducir el tiempo de producción. Aunque hoy en día la fabricación aditiva mediante la reorientación del cabezal no disfrute de un pleno desarrollo, existe un gran interés por parte de los investigadores y usuarios, que ven necesaria esta posibilidad para aumentar la capacidad productiva.

Uno de los puntos débiles de esta nueva tecnología son los sistemas softwares que, aunque permitan generar trayectorias en 2 capas planares, presentan inconvenientes o son incapaces de generar trayectorias en 3 dimensiones continuas debido a la mayor complejidad computacional que requieren.

De todas formas, existen formas alternativas o algunos softwares capaces de producir las trayectorias con diferentes configuraciones de movimientos que, por lo general, han sido adoptados de las técnicas de mecanizado.

2,5 ejes

Sin duda alguna, la fabricación aditiva mediante 2,5 ejes es la más común y la más sencilla. Su modelo encaja perfectamente con el modo de fabricar depositando material sucesivamente sobre la capa previamente construida.

La utilización del llamado 2,5 ejes consiste en escoger un conjunto de planos paralelos que se extienden a lo largo de una tercera dimensión. En la fabricación aditiva, estos planos intersecan con la geometría de la pieza, creando curvas cerradas que imitan su sección transversal a diferentes alturas. La trayectoria que debe seguir la herramienta es creada en cada una de las superficies, por lo que solo necesita movimientos en 2 direcciones (X e Y) para completar cada una de las capas. Es necesario un tercer movimiento en dirección normal a dichos planos (Z) para poder depositar el material

sobre la siguiente capa.

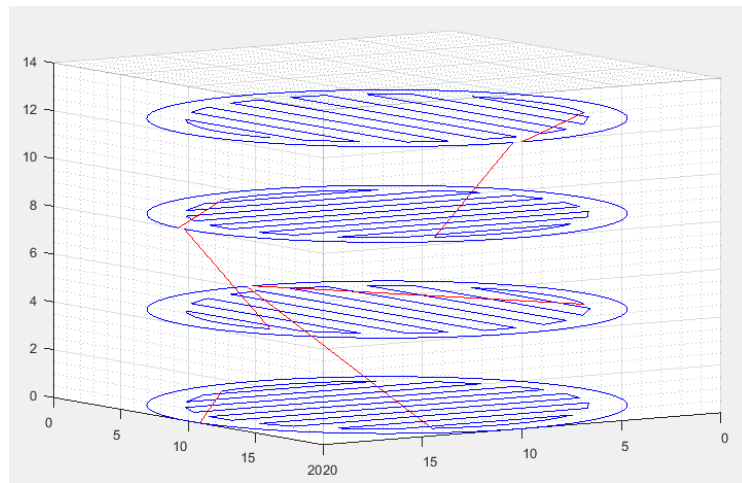


Ilustración 22: Trayectorias en 2,5 ejes.

La mayor ventaja es la posibilidad de desarrollar la trayectoria en 2D por la sencillez que conlleva manipular únicamente 2 direcciones y mantener constante la coordenada correspondiente a la altura. Asimismo, ofrece un modo eficaz de dividir modelos 3D de relativa sencillez con una buena exactitud geométrica.

Por el contrario, esta división supone considerar un crecimiento uniforme de la pieza, por lo que solo será válida en los casos en los que se cumpla. Geometrías con secciones que presentan zonas de diferente ancho o desperfectos en la deposición del material pueden generar irregularidades en el crecimiento, por lo que la distancia entre el extremo del cabezal y la capa en la que se deposita el material se ve alterada. El resultado es un desenfoque de la fuente de energía que disminuye la calidad de la deposición y se convierte en un error acumulativo, afectando directamente a la constitución del producto.

3 ejes continuos

Los 3 ejes continuos es la forma más simple de representar la fabricación de capas no uniformes. A diferencia de los dos ejes y medio, el movimiento a lo largo de la capa supone una variación en las 3 coordenadas X, Y y Z.

Sin embargo, la ausencia de ejes de rotación implica una inclinación permanente durante todo el proceso de fabricación. Por lo tanto, al tratarse de una capa no plana, existirá continuamente una variación en el ángulo creado entre el eje de la herramienta y la normal de la superficie en el punto en el que se encuentra el extremo de la herramienta.

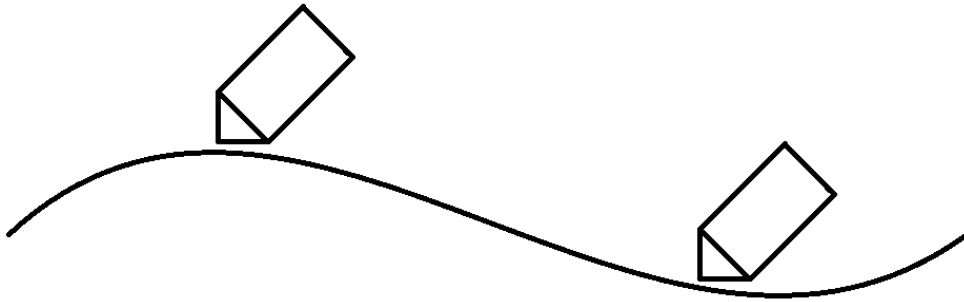


Ilustración 23: Esquema deposición en una superficie no plana con la inclinación constante de la herramienta.

Este fenómeno implica un crecimiento irregular de la deposición y la continua aparición de defectos en la construcción, por lo que el movimiento en 3 ejes continuos es un método inapropiado para la fabricación aditiva.

3+1 y 3+2 ejes

Los llamados 3+1 o 3+2 ejes nacen como una variante de los movimientos básicos X, Y y Z. Consisten en la determinación de la orientación entre pieza y herramienta previa al proceso de fabricación o mecanizado en la que dicha inclinación se mantiene constante. De esta forma, es posible definir una inclinación óptima de la herramienta para cada superficie o parte de la pieza.

El caso más común y sencillo de representar es el de un brazo robot que permite los desplazamientos de translación en 3 ejes y una mesa capaz de ser rotada en la que se ubica la pieza. La diferencia entre estas dos estrategias reside en el número de ejes de rotación de la mesa, 1 o 2.

Desde el punto de vista de la fabricación aditiva, el empleo de estos ejes de rotación adicionales solamente parece interesante en el caso de que se desee depositar material en diferentes caras de una misma pieza, por ejemplo, en aplicaciones de recubrimiento o reparación y fabricación por partes.

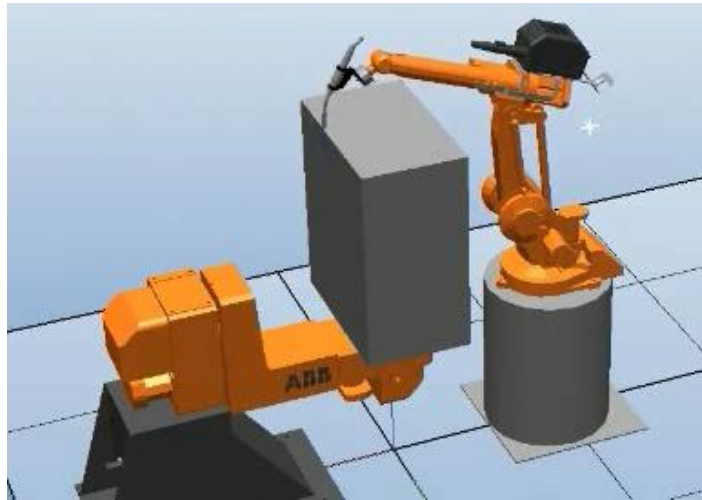


Ilustración 24: Mecanizado de 3+1 ejes. Fuente: (Robotmer, 2012).

5 ejes continuos

Las tecnologías más avanzadas de mecanizado o fabricación aditiva permiten el movimiento simultáneo de los 5 ejes, de los cuales 3 pertenecen a la translación y 2 a la rotación. De esta forma, la herramienta puede acercarse a la pieza en cualquier dirección.

Al igual que en los 3 ejes continuos, es posible el movimiento a lo largo de capas no uniformes, pero se soluciona el problema de la inclinación constante. La sincronización entre la translación y la rotación permite adaptar la inclinación del cabezal a la curva de la superficie donde se procede a depositar el material.

De esta forma, se permite una completa adaptación de las trayectorias a la geometría de la base, pudiendo fabricar superficies no uniformes con una altura de capa constante en una dirección de crecimiento paralela a la normal.



Ilustración 25: Fabricación aditiva con 5 ejes simultáneos. Fuente: Polygonica.

La principal ventaja de esta estrategia de deposición es la capacidad de producir piezas de mayor complejidad, como paredes con inclinación variable, o sobre bases irregulares en un solo proceso continuo y con una buena calidad de construcción. Sin embargo, un funcionamiento adecuado del movimiento simultáneo de 5 ejes requiere un nivel alto de programación para evitar singularidades del movimiento y grandes variaciones de la velocidad.

4.1.3. Estrategias de deposición

Una tarea crucial en la fabricación aditiva es la generación de trayectorias que definen el movimiento de la boquilla de deposición, de forma que rellene el contorno y las áreas interiores de las capas que representan las secciones transversales de un objeto.

Por lo tanto, la trayectoria de la herramienta (también conocida como *tool-path*) es creada a partir de la superficie obtenida en la partición por capas de la pieza. Define las coordenadas en el espacio de los tramos en los que se desea depositar material por lo que está directamente relacionada con el resultado final de la fabricación: desde la calidad de la geometría de la pieza obtenida, hasta la porosidad y uniformidad del cuerpo que influye en las características mecánicas.

Han sido desarrolladas diferentes estrategias para llevar a cabo la deposición del material: líneas paralelas, zigzag, contorno, espiral, curvas de aproximación, trayectorias híbridas o técnicas de división entre otras. Cada una de ellas ofrece

características diferentes relacionadas con la duración, coste, calidad geométrica, deformación, contracción, dureza y rigidez del modelo.

En este apartado se definen las estrategias más comunes empleadas en este tipo de procesos de fabricación.

Líneas paralelas (ráster)

Esta técnica consiste en un conjunto de líneas rectas y paralelas que cubren la superficie en una sola dirección. Se mantiene la separación entre las líneas consecutivas y los puntos de inicio y fin de cada una de las líneas se sitúan en los límites de la pieza.

Su simplicidad la convierte en una de las técnicas más recurridas cuando se realizan piezas sencillas. Sin embargo, su mayor inconveniente es la alta frecuencia de apagado del láser que requiere al tener que detener la deposición del material entre línea y línea.

Zigzag

Derivado del método anterior y creado como optimización, la estrategia de zigzag es la más habitual en la fabricación aditiva de aporte directo de material. La semejanza yace en el aporte de material siguiendo líneas paralelas, pero une el punto final de cada una de ellas al extremo próximo de la siguiente, creando así una trayectoria continua que va alternando su sentido. El reducir considerablemente el número de movimientos de transición del cabezal influyen directamente en un aumento de la productividad y la eficiencia del proceso.

Al igual que el método anterior, posee las ventajas de ser fácil de implementar y el completo relleno de la superficie interior. A pesar de ello, presenta algunos inconvenientes:

- Si el modelo es cóncavo o tiene huecos en el interior de la superficie, el sistema deberá repositionar la boquilla frecuentemente.
- Si la dirección del zigzag es la misma en todas las capas, el modelo dará problemas relacionados con la contracción. El problema se evita fácilmente alternando la dirección de deposición por cada capa.
- Presenta zonas de exceso e insuficiencia de material en los bordes de giro entre líneas paralelas. Este efecto se acentúa cuando la diferencia entre los ángulos de las dos esquinas que componen el giro aumenta, y se reduce cuando ambos ángulos tienen el valor $\pi/2$.

Contorno

En cuanto a la estrategia de contorno, el cual también es muy utilizado, consiste en un

conjunto de trayectorias cerradas y desconectadas que son calculadas en función del perímetro de la pieza. Ofrece mayor calidad geométrica debido a la efectividad al seguir la geometría del límite del contorno. También corrige el problema de contracción al cambiar de dirección constantemente a lo largo de las curvas de contorno de cada capa.

En cambio, con esta estrategia de relleno surgen varias desventajas:

- El algoritmo se complica cuando la superficie tiene huecos que requieren trayectorias difíciles de ajustar y que pueden llegar a producir irregularidades en la capa depositada.
- Cada curva cerrada es generada a partir de la curva que la rodea, manteniendo la distancia de separación entre ellas. Cabe la posibilidad de que en las curvas centrales exista una superficie en la que no sea posible adecuar la trayectoria con dicha separación, y se obtengas zonas con exceso o insuficiencia de material.
- Al tratarse de trayectorias desconectadas, se exige el frecuente apagado del láser y la reposición del cabezal.

Espiral

La técnica de deposición mediante trayectoria en espiral nace como alternativa al método de contorno. La principal mejora que ofrece es la continuidad de la trayectoria que permite sin necesidad de interrupciones en la deposición.

Sin embargo, resulta difícil de implementar, siendo únicamente apropiada para ciertas geometrías especiales. Al mismo tiempo, requiere algoritmos más complicados que conllevan la dificultad de lograr una buena eficiencia.

Otros

Se pueden encontrar distintas técnicas de deposición, pero en general, se trata de variaciones o combinaciones de las ya mencionadas.

El plan de trayectoria continuo consiste en la división de la superficie de cada capa en varios polígonos en los que se genera una trayectoria cerrada, normalmente en zigzag. El conjunto de zigzags se conecta combinando todas las áreas divididas creando una trayectoria continua. La calidad del resultado depende de la capacidad del algoritmo utilizado y de la eficiencia del zigzag.

Los llamados planes de trayectorias híbridas consisten en la combinación de dos o más estrategias de deposición, beneficiándose de las ventajas de cada uno de ellos. Uno de los más comunes estriba en la utilización de la estrategia de contorno para fabricar el perímetro de la pieza y en el zigzag para llevar a cabo el relleno interior. Mediante este

método se consigue una buena calidad geométrica a la vez que una eficiente y uniforme deposición de material en el interior.

4.1.4. Valoración de las alternativas

A continuación, se realiza el análisis de las alternativas mencionadas mediante la elección de varios criterios. La combinación con unos coeficientes de ponderación permite un análisis adaptado a los requerimientos de la tecnología y el entorno de programación utilizado. Se procede con la representación por tablas de las valoraciones de las características mediante unos factores del 1 al 5, donde 1 significa que no cumple con dicha característica o posee una mala calificación y 5 que aporta un resultado excelente en cuanto a dicha cualidad.

En la siguiente tabla se presenta la valoración de los diferentes métodos para realizar la división por capas de la pieza.

TIPOS DE REBANADO	Capas uniformes	Capas no uniformes
Simplicidad en su utilización	5	1
Fabricación de piezas sencillas	5	4
Recubrimiento de superficies	2	5
Adaptación a la geometría	3	4
Implementación en una fabricación controlada	2	5
Simplicidad de los movimientos	5	2

Tabla 1: Calificación de las características de los tipos de rebanado.

Se procede con la asignación de coeficientes de ponderación a las diferentes características con el fin de adaptar la importancia de estas a las solicitudes del trabajo realizado y sus objetivos.

Características	Coefficientes de ponderación
Simplicidad en su utilización	0.8
Fabricación de piezas sencillas	1.0
Recubrimiento de superficies	0.1
Adaptación a la geometría	0.7
Implementación en una fabricación controlada	0.2
Simplicidad de los movimientos	0.5

Tabla 2: Coeficientes de ponderación de las características de los tipos de rebanado.

Implementando los coeficientes, se obtiene el siguiente resultado:

Resultado de la ponderación

Capas uniformes	14.2
Capas no uniformes	10.1

Tabla 3: Resultado de la valoración de los tipos de rebanado.

El resultado general muestra la conveniencia del empleo de las capas uniformes en la realización de este trabajo, ya que, principalmente está dirigido a la fabricación de piezas sencillas. Sin embargo, se ha desarrollado un algoritmo para fabricación en 5 ejes con el que, mediante la adaptación de la superficie de las capas, mejorar la construcción de la pieza.

En la siguiente valoración se tratan los posibles ejes de movimiento.

EJES DE MOVIMIENTO	2,5 ejes	3 ejes continuos	3+1 y 3+2 ejes	5 ejes continuos
Simplicidad en su utilización	5	2	2	1
Fabricación de piezas sencillas	4	2	3	3
Fabricación de paredes inclinadas	2	2	3	5
Recubrimiento de superficies	2	3	4	5
Adaptación a la geometría	4	4	5	5
Simplicidad de los movimientos	5	3	2	2
Implementación en la máquina	5	4	2	2

Tabla 4: Calificación de las características de los ejes de movimiento.

Asignando los coeficientes de ponderación correspondientes a las diferentes características seleccionadas para la evaluación:

Características	Coeficientes de ponderación
Simplicidad en su utilización	0.8
Fabricación de piezas sencillas	1.0
Fabricación de paredes inclinadas	0.5
Recubrimiento de superficies	0.1

Adaptación a la geometría	0.7
Simplicidad de los movimientos	0.5
Implementación en la máquina	0.8

Tabla 5: Coeficientes de ponderación de las características de los ejes de movimiento.

El resultado es el siguiente:

Resultado de la ponderación

2,5 ejes	18.5
3 ejes continuos	12.4
3+1 y 3+2 ejes	12.6
5 ejes continuos	12.9

Tabla 6: Resultado de la valoración de los ejes de movimiento.

Para producir piezas relativamente sencillas a partir de un modelo 3D, la utilización de 2,5 ejes resulta ser la alternativa más apropiada que, de hecho, es el método común en las tecnologías de la fabricación aditiva. Por otro lado, el aumento de la complejidad del modelo y los requerimientos de la construcción requieren de la movilidad continua en 5 ejes de la herramienta, aumento al mismo tiempo y significativamente, la complejidad del desarrollo de las trayectorias.

Por último, se evalúan las estrategias de deposición más habituales en la fabricación aditiva.

ESTRATEGIAS DE RELLENO Líneas paralelas Zigzag Contorno Espiral Híbrida

Simplicidad en su utilización	5	4	2	1	3
Adaptación a la geometría	1	2	4	4	4
Simplicidad de los movimientos	5	4	3	2	3
Rapidez de deposición	1	4	2	3	4
Efectividad del relleno	1	4	2	2	5
Trayectoria continua	1	3	2	3	4

Tabla 7: Calificación de las características de las estrategias de relleno.

Se aplican los coeficientes de ponderación.

Características	Coefficientes de ponderación
Simplicidad en su utilización	0.5
Adaptación a la geometría	0.8
Simplicidad de los movimientos	0.5
Rapidez de deposición	0.8
Efectividad del relleno	1.0
Trayectoria continua	0.5

Tabla 8: Coeficientes de ponderación de las características de las estrategias de relleno.

Tras la asignación de los coeficientes de ponderación, las estrategias de relleno obtienen unos resultados en función de las características evaluadas expuestas a continuación.

Resultado de la ponderación

Líneas paralelas	8.1
Zigzag	14.3
Contorno	10.3
Espiral	10.6
Híbrida	16.4

Tabla 9: Resultado de la valoración de los estrategias de relleno.

Queda visible la aptitud de la trayectoria híbrida para los procesos de fabricación aditiva, donde se beneficia de la capacidad del movimiento de contorno para adaptarse a la geometría de la pieza, y de la estrategia de zigzag para efectuar el relleno de la pieza de forma eficaz.

En la realización de este trabajo se ha planteado la posibilidad de producir dos tipos de piezas: macizas y huecas. Para las piezas macizas, donde es necesario el relleno interior, se va a emplear la trayectoria híbrida. Sin embargo, las piezas huecas carecen de material en el interior y, por lo tanto, de movimientos dirigidos al relleno interior. En este caso, la trayectoria seleccionada es la estrategia de contorno debido a su capacidad de producir una construcción perimetral adaptada a la geometría.

4.2. Equipo y material empleado

4.2.1. SolidWorks

SolidWorks ha sido el software empleado para realizar los diseños 3D de las piezas que posteriormente son utilizados para realizar la generación de trayectorias. Se trata de un Software CAD para modelado mecánico 2D y 3D que permite modelar piezas y conjuntos a la vez que extraer información necesaria para la producción.

En la realización de este trabajo, este software ha permitido generar el modelo 3D de diferentes piezas y exportarlas en formato de archivo STL.

La fabricación aditiva supone un reto para los diseñadores de productos, que requiere un cambio en el modo de plantear las soluciones a los problemas adaptándolas a las capacidades que proporciona esta tecnología.

Aunque no se haya utilizado en la realización de este trabajo, cabe señalar el esfuerzo por parte de SolidWorks por incorporar una herramienta dirigida al diseño aditivo mediante 3DXpert, que permite preparar y optimizar los diseños para fabricación aditiva.

4.2.2. Matlab

Matlab es un lenguaje de alto nivel utilizado normalmente para el cálculo numérico y la programación. Mediante el lenguaje, las funciones y las herramientas incorporadas, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear aplicaciones.

Aunque en sus orígenes estaba destinado al cálculo matemático, y en concreto matricial, ha ido creciendo hasta abarcar prácticamente todos los ámbitos de la ingeniería. Entre las operaciones básicas que ofrece se encuentran: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

El software Matlab ha sido la herramienta principal para la realización de este TFM, puesto que prácticamente todo el proceso de generación de trayectorias se lleva a cabo mediante los algoritmos creados en este lenguaje. Desde un punto de vista general, el programa creado se basa en la manipulación de los datos de entrada que recibe externamente y realiza las funciones necesarias para obtener los datos de salida que constituyen la trayectoria del cabezal en el proceso de fabricación.

4.2.3. Fuente de energía

La tecnología LMD o deposición directa de láser, es un proceso que utiliza un haz láser

para formar una masa fundida a partir del material alimentado sobre el substrato base. En este caso, tanto el cabezal láser como la boquilla de extracción de material se incorporan al extremo de un brazo robótico.

En la celda de fabricación aditiva mediante polvo metálico, la fuente de energía es un láser producido por onda continua mediante diodo de 2,2 kW Rofin DY022 Nd:YAG.

La segunda celda, que emplea hilo metálico también emplea un láser como fuente de energía: IPG YLS 4000 S2T 4kW.

4.2.4. Robot

El movimiento de la herramienta es producido en ambas celdas mediante las rotaciones de las articulaciones de dos robots fabricados por ABB. En el caso del proceso mediante polvo, se utiliza el IRB4400 y el del hilo, IRB4600.



Ilustración 26: Robot ABB modelo IRB4400 (izquierda) y IRB4600 (derecha).

Hoy en día, los brazos robóticos se han convertido en una tecnología común en el ámbito de la manufactura, donde han formado un aspecto importante en el desarrollo de la fabricación aditiva, permitiendo el control del cabezal de deposición.

Las máquinas empleadas en este centro disponen de 6 grados de libertad que, mediante su programación, proporcionan a la herramienta incorporada al extremo movimientos tanto de translación como de rotación sobre la mesa que sostiene el material depositado.

4.2.5. Material

La gama de materiales disponibles para la fabricación aditiva, tanto metálicos como no metálicos, es muy inferior a la que se puede encontrar en los métodos sustractivos o

conformativos. Esto se debe a la temprana edad que presenta esta tecnología y a la baja demanda actual, que no justifican el interés ni las inversiones necesarias en la producción de nuevos materiales.

Como se ha comentado, el propósito de este trabajo es facilitar la construcción de componentes metálicos. En este caso, para realizar las primeras pruebas mediante la utilización de las trayectorias generadas, se utiliza el acero 316L tanto en forma de hilo producido por DINSE como de polvo producido por Sulzer Metco.

Uno de los grandes retos de la fabricación aditiva es dar respuesta a las solicitudes del sector aeronáutico, que demanda preformas de titanio de geometrías simples para fabricar componentes estructurales. Los procesos actuales como la forja o el mecanizado suponen largos plazos y el desecho de una gran cantidad de este material. La deposición directa de material es una alternativa viable para superar estos inconvenientes y fabricar piezas con una geometría cercana a la final.

4.2.6. Cabezal

Este proceso de fabricación aditiva requiere la incorporación de un cabezal en el extremo del brazo robot por el que alimentar el material de construcción y circular el haz láser. En el caso del proceso mediante polvo, se utiliza un cabezal óptico de Procitect que permite una circulación coaxial de láser. Al contrario, el cabezal del proceso de hilo producido por Fraunhofer IWS divide el haz láser en tres haces que son enfocados en el punto de trabajo, a la vez que introduce el hilo de forma coaxial.

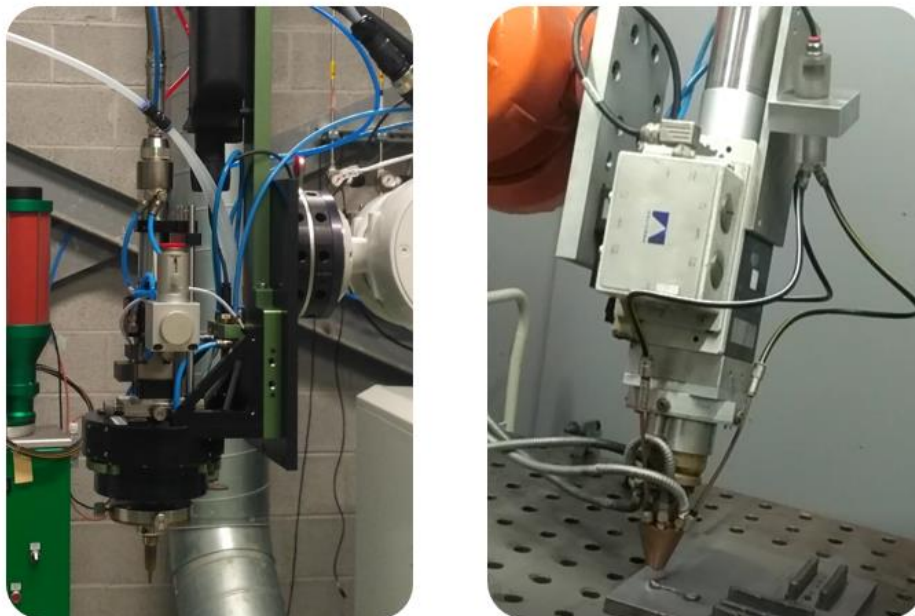


Imagen 1: Cabezal de hilo de Fraunhofer (izquierda) y de polvo de Procitect (derecha).

4.3. Descripción de la metodología adoptada

En este apartado se describe el proceso de creación de la herramienta para generar las trayectorias para fabricación aditiva de componentes metálicos, de forma que se cumplan los objetivos del trabajo establecidos.

4.3.1. Entorno de programación

Se ha optado por la utilización de Matlab para desarrollar el programa que permita manipular los datos introducidos a través de un STL y calcular las trayectorias requeridas.

En este caso, el software Matlab se convierte en el sustituto de un sistema CAM, extrayendo directamente el archivo texto que posteriormente es interpretado por el software del brazo robot. Por lo tanto, el programa desarrollado sirve de conexión entre el archivo STL de un sistema CAD y el proceso de fabricación aditiva para el que ha generado las trayectorias de deposición.

4.3.2. Estructura general de la herramienta

El programa se ha llevado a cabo mediante la estructuración por módulos que corresponden a etapas o funciones diferentes dentro del proceso. Esta separación por módulos permite la optimización de los mismos y la introducción de nuevas herramientas sin variar el modo de trabajo. El programa ha sido diseñado específicamente para un caso de uso principal:

- Se selecciona el programa para la estrategia de deposición deseada (número de ejes de movimiento, estrategia de deposición...).
- Se introduce el modelo 3D de la pieza en formato STL.
- Se configuran los parámetros referentes a las características de la deposición (altura de capa, distancia entre cordones...).
- Se realiza el cálculo.
- Se realiza la visualización y la verificación de las trayectorias
- Se extrae el archivo de texto que es leído por el manipulador del robot.

En la siguiente ilustración se muestra esquemáticamente el diagrama de ejecución del programa principal y más completo de los desarrollados.

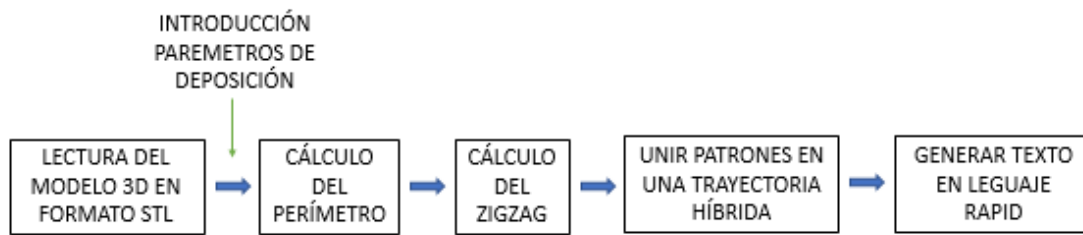


Ilustración 27: Esquema de los diagramas de ejecución del programa que genera una trayectoria híbrida.

4.3.3. Metodología

Como se ha mencionado, la realización del trabajo se ha llevado a cabo en el entorno de programación Matlab, donde se ha partido de los datos iniciales que posteriormente han sido manipulados hasta alcanzar el objetivo planteado. Tras el estudio de las alternativas que posibilitan la generación de trayectorias, se ha optado por este método principalmente por la capacidad de manipulación que permite sobre los resultados, con el fin de habilitar al usuario de un total control sobre las características de las trayectorias.

El proceso ha sido dividido en una serie de herramientas distintas, cuyas cualidades permiten la fabricación de piezas de tipologías diferentes. En primer lugar, se ha planteado la elaboración de un programa funcional, a la vez que cubra las solicitudes primarias de posteriores operaciones más complejas. Por lo tanto, el primer programa dispone de algoritmos base que posteriormente son el punto inicial de las más avanzadas herramientas.

Se ha considerado fundamental la capacidad de producir piezas macizas sencillas en dirección vertical, como cilindros o rectángulos. Se ha optado por incorporar las técnicas esenciales que definen la fabricación aditiva, que son el rebanado del modelo en secciones transversales, denominado internacionalmente *slicer*, y la posterior fabricación capa a capa mediante estrategias dibujadas sobre éstas. De esta forma, el programa principal se basa en la generación de trayectorias sobre las superficies transversales que componen el modelo.

Tras analizar las estrategias de deposición más comunes en la fabricación aditiva, se ha optado por emplear la trayectoria híbrida con el fin de mejorar la calidad constructiva de los productos, a la vez que disponer de un proceso de fabricación eficiente. Debido a las particularidades que presenta la tecnología LMD, en la que el material es depositado directamente sobre el sustrato o sobre la pieza en proceso de fabricación, se requiere un movimiento continuo y sin producir intersecciones entre los movimientos de deposición.

La trayectoria híbrida se presenta como una estrategia eficaz debido a la garantía constructiva que presenta el continuo solape entre los tramos paralelos de la estrategia del zigzag y que permiten el rellenado de la zona central de la sección. Al mismo tiempo, la deposición continua del contorno de cada capa asegura un crecimiento uniforme a lo largo del proceso y mejora la precisión geométrica.

Por lo tanto, una vez dividido el modelo en capas que describen sus secciones transversales, la trayectoria híbrida debe ser creada sobre cada una de estas. Todo movimiento puede ser descrito mediante una secuencia de puntos que, definido dentro de un sistema de coordenadas de referencia, puede representarse como una consecución de coordenadas espaciales. Una adecuada selección de puntos en un orden específico posibilita la definición de un movimiento a lo largo del contorno y otro, que alternando el sentido de sus rectas a lo largo de la sección genera un zigzag.

Estas trayectorias son sometidas a un proceso de optimizado, donde el zigzag es adaptado a la geometría del contorno con el fin de conseguir una completa deposición de la superficie. Teniendo en cuenta la dirección constante de los tramos paralelos de cada capa, el zigzag debe ser optimizado tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, resultando en una separación constante entre ambas trayectorias.

Para completar el cumplimiento de las propiedades que caracterizan la estrategia de 2,5 ejes, se determina el eje de la herramienta coincidente con la dirección de crecimiento durante todo el proceso de fabricación. De este modo, en cada capa realiza movimientos a lo largo de los ejes x e y , y se desplaza una determinada distancia en sentido positivo del eje z tras completar la creación de cada superficie.

El sector aeronáutico es clave en el desarrollo de la fabricación aditiva, que demanda un continuo avance de la tecnología para poder implementarla en sus procesos y aumentar la eficiencia productiva y económica. La capacidad de fabricación de los programas generados ha partido de modelos elementales y sencillos hasta alcanzar la posibilidad de producir una pieza con la tipología básica de un alabe empleado en las turbomáquinas.

En primer lugar, se han considerado modelos similares a paredes verticales y curvas para validar la estrategia en 2,5 ejes. Posteriormente, se ha planteado la revolución gradual de estas paredes, imitando la estructura de un alabe, y surgiendo una inclinación hacia el exterior de la superficie vertical. La complejidad de producción que conlleva debe resolverse mediante el empleo de la orientación adaptada de la herramienta que se contempla en la optimizada trayectoria del perímetro.



Ilustración 28: Alabes del rotor del compresor de una turbomáquina. Fuente: Piziadas.

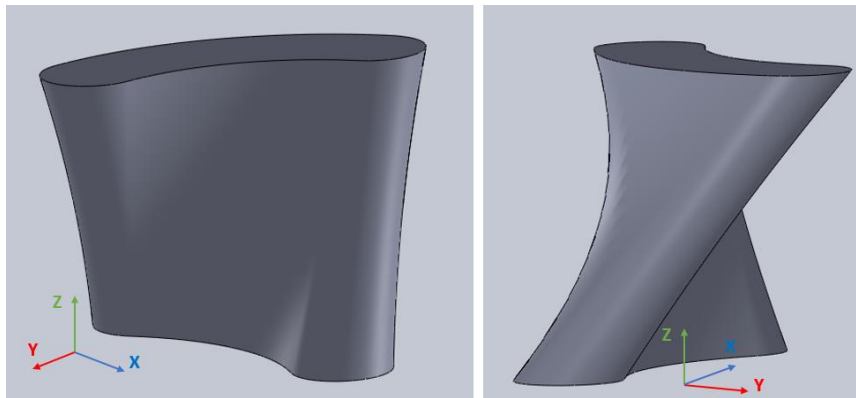


Ilustración 29: Diseño CAD de una pieza con la tipología de un alabe.

En primer lugar, se ha planteado como solución a la deposición sobre paredes inclinadas, la orientación adaptada de la herramienta. Una inclinación hacia el exterior, y la representación de la estrategia de rebanado, implican una deposición en el aire cuando el eje del cabezal se mantiene vertical. Por lo tanto, la primera optimización sobre el programa base consiste en orientar la herramienta en función de las características de la pared de forma que el eje de la herramienta este dirigido hacia los límites de la última superficie construida.

Se ha considerado una inclinación máxima y una distancia entre cordones aproximada para que, en el peor de los casos, solamente un cordón quede en el exterior respecto a la anterior capa. El cordón del extremo corresponde a la trayectoria del perímetro, y por este motivo se ha considerado necesaria la orientación adaptada de la deposición del contorno a la vez que mantener el cabezal vertical durante la estrategia del zigzag.

La segunda variante del programa base tiene en cuenta, por una parte, la muy solicitada reducción del peso de los elementos en el ámbito aeronáutico, y por otra parte la refrigeración necesaria de los alabes. Las altas temperaturas del aire circulante

a lo largo de la turbomáquina que posibilitan la combustión y el resultante empuje, conlleva a los elementos a poseer la capacidad de soportar estas temperaturas. Uno de los métodos más comunes es la producción de pasos interiores por las que se hace circular aire de refrigeración.

Con el fin de emular las características necesarias en la aeronáutica, se plantea la fabricación de piezas huecas. Se decide prescindir de la estrategia de zigzag, y se modifica la estrategia del contorno para posibilitar la construcción de diferentes anchos de la pared. En este caso, el movimiento del cabezal se limita al de translación, pero se plantea la incorporación de la adaptación de la orientación a partir de los algoritmos generados en la anterior herramienta.

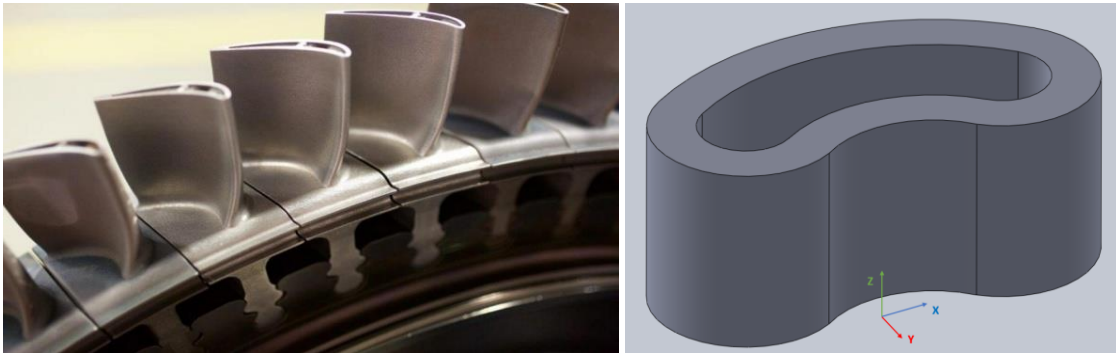


Ilustración 30: Alabes con pasos de refrigeración (izquierda). Fuente: interempresas. Diseño CAD de la tipología de un alabe hueco (derecha).

La última herramienta se basa en los algoritmos generados hasta el momento, pero se enfoca en la fabricación mediante el empleo de 5 ejes continuos. La complejidad geométrica que pueden llegar a presentar estas tipologías implica un avance en las estrategias de deposición que permitan un proceso eficaz y una buena calidad en el resultado. En este caso, la fabricación de piezas huecas mediante un único cordón a lo largo del perímetro de cada capa, junto a la inclinación de la herramienta dirigida a la fabricación de paredes inclinadas, tanto hacia el interior como al exterior, implica un crecimiento uniforme del material depositado. Por este motivo, la utilización de la orientación del cabezal sin la deposición de una zona central que facilite un crecimiento uniforme requiere de la adaptación de las capas, prescindiendo de las secciones transversales originales. La adaptación de las capas se desarrolla a lo largo de esta herramienta en función de la inclinación presentada en cada tramo de la pared, y conduce a la necesidad de emplear un movimiento que combina la translación y la orientación simultáneamente.

Las trayectorias calculadas se componen de una secuencia de coordenadas y orientaciones, que deben ser transformadas a un formato interpretable por la máquina en su conjunto. El robot de ABB empleado dispone de un software que

emplea lenguaje Rapid, a partir del que se introducirán los datos obtenidos.

Una vez desarrolladas las herramientas, las trayectorias generadas deben ser validadas mediante la representación de estas y los procesos de la fabricación aditiva. Se dispone de la tecnología LMD en dos técnicas distintas, la deposición de hilo y la de polvo metálico. La situación del desarrollo del hilo no ofrece garantías en la calidad constructiva mediante la inclinación del cabezal, por lo que se limita a la estrategia de 2,5 ejes. La tecnología que emplea polvo permite la producción de paredes inclinadas mediante la reorientación de la herramienta, permitiendo la fabricación de la trayectoria híbrida combinada con la orientación variable. Sin embargo, la complejidad que presenta la última herramienta la hace requerir de una mayor optimización resultante de las primeras pruebas que se realicen, y formarán parte de las futuras líneas de trabajo.

Por un lado, se realiza una comprobación de las trayectorias generadas mediante la ilustración de estas, con las que se verifica la distancia entre cordones y la altura de capa determinada, a la vez que la aptitud de la adaptación entre el zigzag y el perímetro.

Por otro lado, se procede a realizar la validación de las trayectorias mediante la producción de columnas sencillas y paredes curvas, tanto con superficies verticales, como con inclinaciones variables a lo largo del contorno.

La validación de la construcción se realiza mediante la valoración de las piezas producidas. Cabe destacar que no se va a realizar una inspección en profundidad de las piezas, limitando la validación a la inspección visual de los resultados. Por lo tanto, un análisis de la microestructura o la validación del interior pueden formar parte de unos trabajos futuros.

5. DIAGRAMA DE GANTT

En este apartado se expone una división del trabajo por actividades dispuestas a lo largo del periodo de tiempo en el que se ha elaborado este proyecto. En él se pueden distinguir las tareas principales que se han seguido en este trabajo, a la vez que las principales subtareas desarrolladas por cada una de ellas y los tiempos dedicados a cada una.

Planteamiento del problema

El proyecto comienza con la búsqueda de la información de la que se obtiene el conocimiento necesario para formar las bases de las líneas de desarrollo a seguir.

Es necesario un análisis sobre el estado de la tecnología y las tendencias de los investigadores del ámbito, con el fin de comprender las alternativas disponibles y escoger las herramientas a emplear.

Una vez se haya seleccionado el método de generación de trayectorias, el entorno de programación Matlab, se analiza el modo de trabajo y se escoge la manera de crear los datos de entrada.

Transformación de datos de entrada

Tanto las piezas finales, como los modelos 3D experimentales, deben ser creados en un software CAD del que se obtiene el archivo en el formato adecuado.

El comienzo de la creación de los programas se basa en la definición de la relación entre el software de diseño SolidWorks y el entorno de programación Matlab, estableciendo los datos que se deben obtener para ser manipulados posteriormente.

A continuación, se expone la parte central del trabajo, donde se crean los diferentes programas.

Creación herramienta 1

La herramienta 1 está dirigida a la fabricación mediante capas planas, un movimiento vertical de la herramienta (2,5 ejes) y una trayectoria híbrida. Por lo tanto, el proceso comienza con la elaboración de estrategias de deposición sobre planos uniformes y sin

incorporar orientaciones variables al cabezal.

Tras haber manipulado los datos de entrada a partir del archivo CAD, se separan los puntos correspondientes al interior y al contorno de la pieza. Por un lado, se crea una secuencia de puntos en un orden específico que forme un movimiento a lo largo del perímetro de la pieza capa por capa

Por otro lado, se desarrolla la estrategia de zigzag que posibilita el rellenado del interior a partir de una consecución de movimientos lineales paralelos. El zigzag es generado alternando la dirección de sus rectas en cada una de las capas que componen la pieza.

Debe determinarse la relación entre el sistema de programación y el software manipulador del robot para poder exportar las trayectorias. En el entorno Matlab, y tras haber generado los movimientos, se crea un algoritmo que obtiene un archivo texto donde se especifican las órdenes y comandos interpretables por el robot en el lenguaje Rapid.

Creación herramienta 2

La segunda herramienta incorpora un movimiento diferente que permite la fabricación de piezas huecas mediante la deposición de varios contornos. Se mantiene la técnica del cabezal vertical y la división de la pieza por capas uniformes, pero se prescinde del movimiento de zigzag y del rellenado interior. Esta herramienta debe permitir la fabricación de piezas perimetrales con ancho de pared especificado por el usuario en función del número de contornos.

Creación herramienta 3

La herramienta 3 incluye optimizaciones sobre la primera, que capacitan un movimiento mediante la reorientación adaptada del cabezal. La principal función de esta herramienta es la fabricación de paredes inclinadas, por lo que es necesario el diseño de nuevos modelos 3D con inclinaciones hacia dentro y hacia afuera.

Al tomar como base la primera herramienta, se mantiene la estrategia híbrida y el rebanado transversal. La principal diferencia reside en la deposición del perímetro, donde el movimiento se lleva a cabo con una determinada inclinación en función de los requerimientos. En este punto, deben tenerse en cuenta las inclinaciones de las paredes a partir de los vectores normales del STL, que posteriormente son comparados con el sistema de coordenadas de la herramienta y la mesa.

Creación herramienta 4

La cuarta herramienta va dirigida al movimiento de 5 ejes continuos con el fin de lograr una mayor capacidad de fabricación en cuanto a piezas complejas. Toma como base

los algoritmos empleados en la anterior herramienta, donde se inclina el cabezal a partir de la manipulación de los vectores.

Sin embargo, al fabricar solamente el perímetro, es necesario un ajuste en la altura de las curvas que representan el contorno. De esta forma, y mediante el uso de los vectores de orientación, las capas son adaptadas a la geometría del modelo, originando un movimiento que combina la translación y la orientación.

Implementación de las herramientas en fabricación aditiva

Una vez creadas las herramientas, varias piezas son fabricadas empleando las trayectorias generadas en este trabajo, empleando el proceso de fabricación aditiva de hilo y de polvo.

En primer lugar, se valida la trayectoria híbrida mediante el cabezal vertical en el proceso que emplea hilo. En segundo lugar, se comprueba la trayectoria que genera piezas huecas y, por último, se utiliza la tercera herramienta para producir una orientación variable en el proceso de polvo.

Redacción

Finalmente, se indican los tiempos dedicados a la redacción del proyecto que se ha desarrollado a lo largo de aproximadamente todo el período y puede dividirse en dos principales apartados.

La introducción se desarrolla en los primeros meses, a partir del planteamiento del trabajo y la obtención de la información acerca del estado del arte. Al mismo tiempo, se definen los objetivos y se describe la tecnología.

En segundo lugar, se desarrolla el trabajo realizado mediante la exposición de las herramientas generadas, y se realiza un análisis de las piezas fabricadas.

Hitos

A lo largo del trabajo se establecen varias fechas específicas que indican el cumplimiento general del trabajo desarrollado. El primero corresponde a la realización de la primera herramienta y sirve para indicar el tiempo requerido para elaborar dicha tarea, a la vez que conocer la posibilidad de continuar con la generación de las demás. La segunda tarea marca el comienzo de las fechas habilitadas para la producción de las piezas mediante fabricación aditiva. Por lo tanto, los textos interpretables por el robot con la información de las trayectorias admisibles deben ser creados para este punto. Por último, se especifica la fecha límite de realización del trabajo en la que éste debe ser entregado.

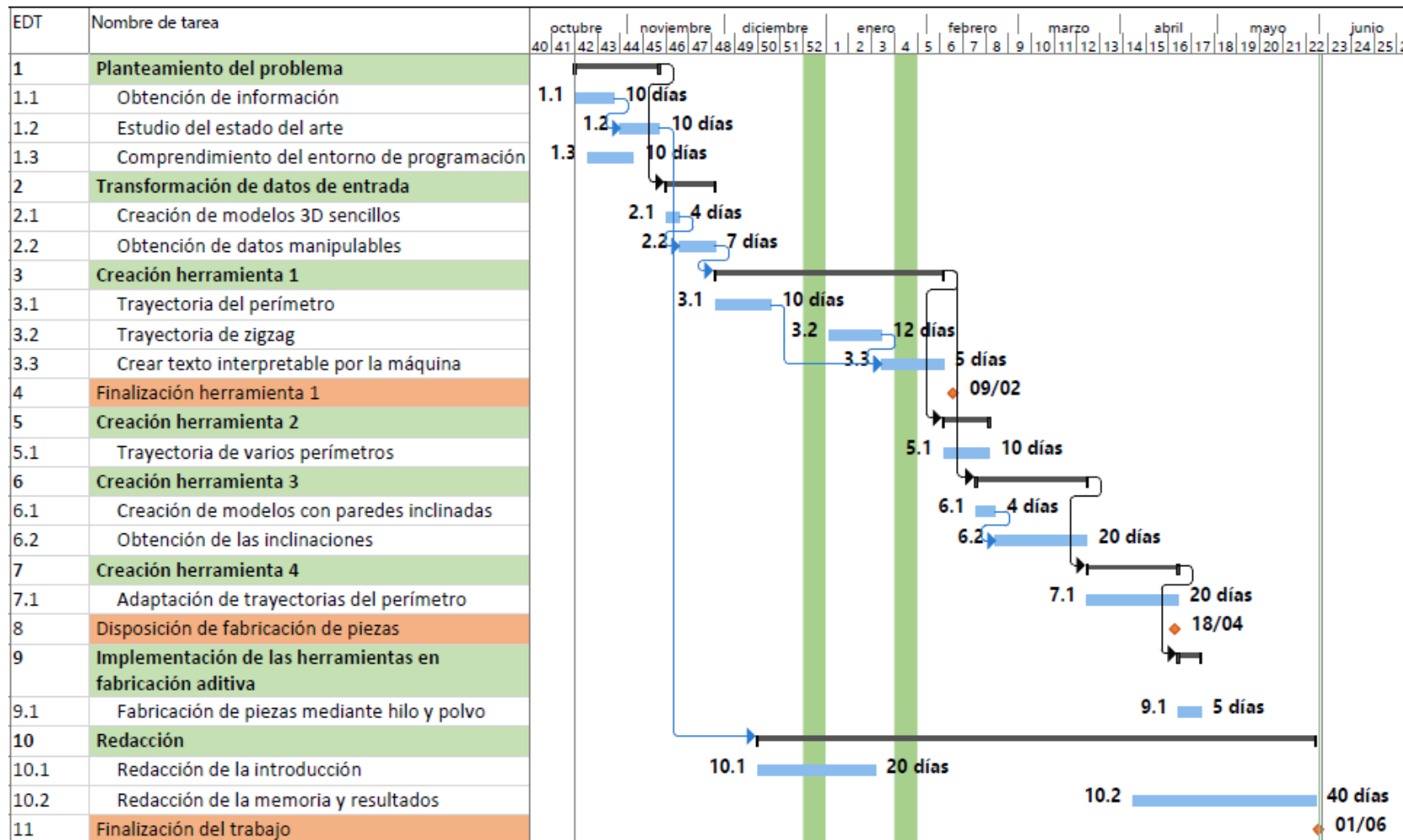


Tabla 10: Diagrama de Gantt.

6. DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se presenta el desarrollo de los módulos que componen cada uno de los programas, a la vez que se justifican las decisiones tomadas y se exponen gráficamente las operaciones.

Durante la realización de este trabajo han sido elaborados diferentes programas de Matlab destinados a diferentes estrategias de la fabricación aditiva, por lo que habrá funciones comunes para todos ellos y otras especialmente creadas para cada estrategia.

6.1. Fabricación de piezas macizas

El primer programa presentado está dirigido a la fabricación de piezas macizas mediante la producción de un cordón perimetral y un posterior relleno del interior. Se basa en la estrategia de 2 ejes y medio, por lo que el modelo es dividido en un conjunto de capas planares y paralelas entre sí. La trayectoria es generada sobre dichas capas empleando una estrategia de zigzag de dirección alternada y un movimiento sobre el contorno de la pieza que sirva de contención y mejora de la superficie.

Cabe destacar que esta herramienta dispone de dos estrategias para producir el contorno: 3 ejes y 5 ejes. La posibilidad de deposición inclinando el cabezal va destinada a la producción de paredes inclinadas hacia el exterior, donde hay riesgo de desprendimiento del material depositado.

El proceso es el siguiente:

6.1.1. Obtención de datos

Como se ha comentado anteriormente, el dato de entrada principal consiste en un archivo STL. En este caso, se ha utilizado el software CAD SolidWorks en el que se han realizado varios modelos 3D de piezas con características geométricas diferentes para

poder comprobar la funcionalidad del algoritmo en diversas condiciones. Este software tiene la opción de guardar el archivo del modelo en formato STL con una densidad de triángulos establecida por el usuario (dentro de un rango), que a continuación es exportado a Matlab.

Se requiere incorporar a Matlab varias funciones necesarias para realizar la lectura y manipulación de un archivo en formato STL. Dichas funciones obtienen los datos iniciales con los que se comienza a trabajar y que son características de este formato, como son los vértices, las caras y las normales de cada una de las caras trianguladas en las que se ha simplificado el modelo 3D.

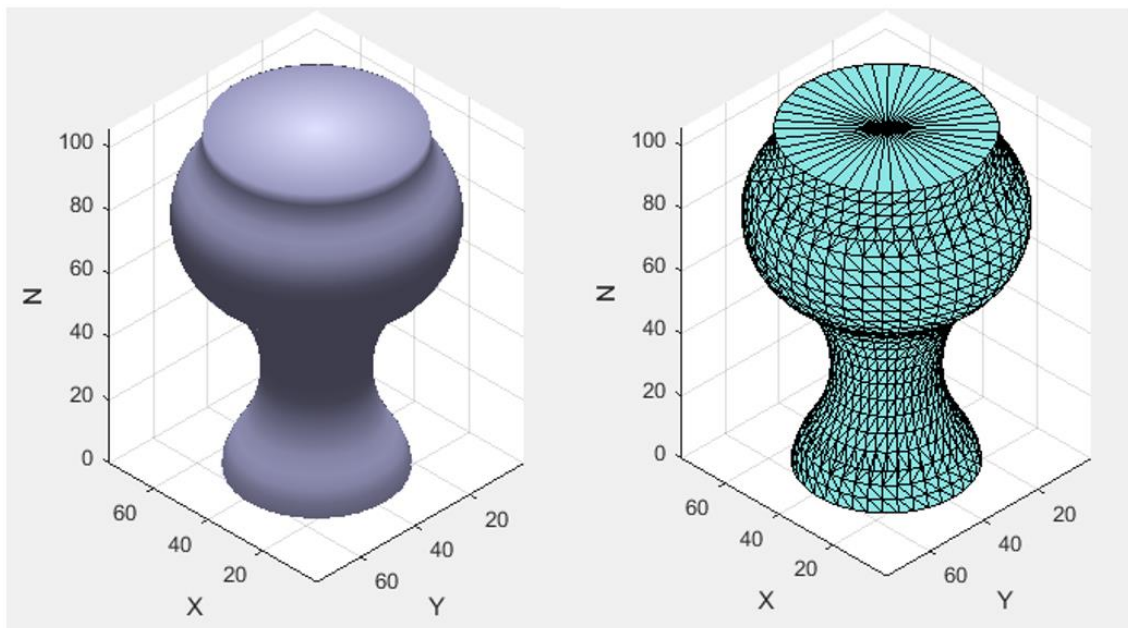


Ilustración 31: Representación del modelo CAD simple y triangulado.

El usuario debe definir varios parámetros relacionados directamente con las condiciones de deposición que se desean: la distancia entre cordones y la altura de capa. Estos parámetros deben ser debidamente seleccionados puesto que existe una relación entre ellos, y la altura de capa debe coincidir exactamente con el crecimiento que se obtenga por cada capa en el proceso de fabricación. La distancia entre cordones debe proporcionar una construcción uniforme de la capa con el fin de evitar defectos debidos a la creación de huecos o relieves por la falta o el exceso de material respectivamente.

La relación existente entre estos dos parámetros implica la necesidad de disponer de unos conocimientos básicos sobre la tecnología y experiencia mediante pruebas para poder establecer los valores adecuados. De un modo sencillo, reduciendo la distancia entre cordones y manteniendo el resto de los parámetros del proceso invariables, se

obtiene un solape mayor, por lo tanto, un mayor crecimiento y viceversa.

En función de dichos parámetros, se crea una nube de puntos con una separación entre ellos en la dirección Z igual a la altura de capa y una separación en las direcciones X e Y igual a la distancia entre cordones.

Una vez se tiene el modelo 3D triangulado y una nube de puntos que contenga el modelo, se desea representar dicho modelo a través de los puntos ubicados en su interior. Para ello, se incorpora una función llamada *inpolyhedron* que, a partir de una superficie 3D triangulada, identifica los puntos internos a través de una matriz lógica de 3 dimensiones que concuerda con la nube de puntos. Esta nueva representación de la pieza supone una nueva simplificación que afecta principalmente a la geometría perimetral introduciendo un error de discretización.

En la ilustración 32 se muestra el resultado genérico de esta última función para una nube de puntos cualquiera.

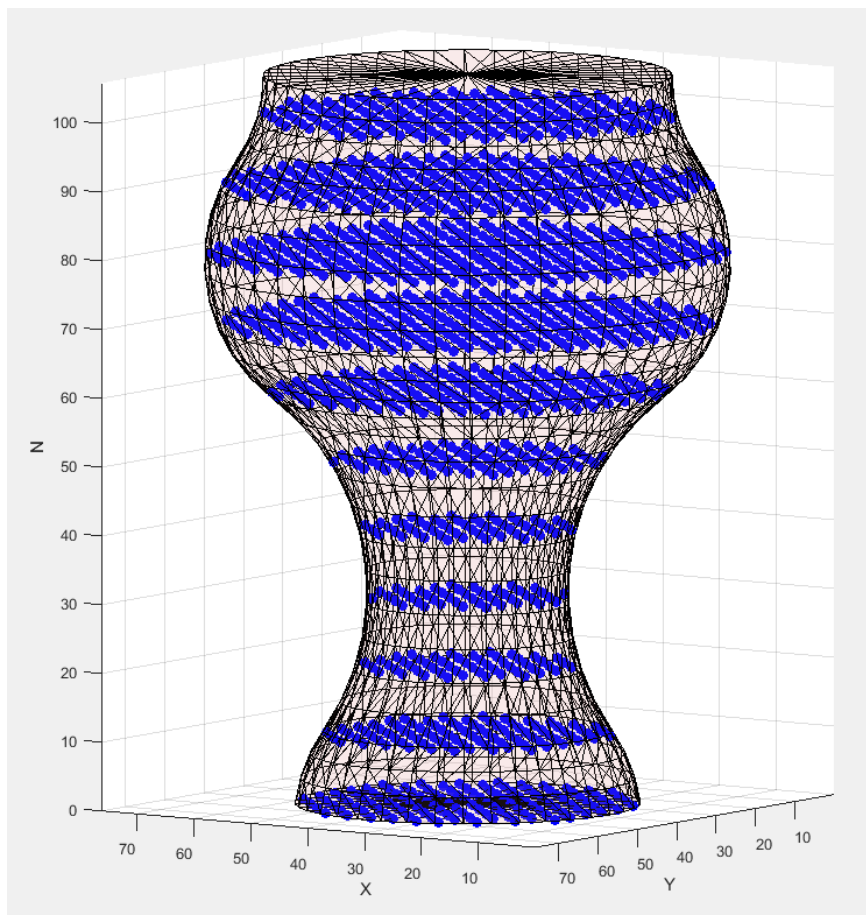


Ilustración 32: Rebanado de la pieza mediante nube de puntos.

Esta etapa es equivalente al proceso llamado *slicer* que es una tarea fundamental de

los softwares CAM para fabricación aditiva, en la que el modelo es cortado en un número concreto de capas perpendiculares al eje Z. En este caso, se obtienen varias capas compuestas por un conjunto de puntos que recrean la sección transversal de la pieza a diferentes alturas y distanciadas por la altura de capa establecida. Es el punto de partida para comenzar a elaborar la generación de las trayectorias y que se explica a continuación.

6.1.2. Trayectoria híbrida

Como se ha comentado, la estrategia de deposición empleada en esta herramienta es la combinación entre una deposición a lo largo del perímetro y una estrategia de zigzag para realizar el relleno de la pieza. Para varios de los investigadores del ámbito, esta estrategia ofrece un grado alto de eficiencia en la construcción.

Mediante esta estrategia combinado se desea principalmente aprovechar la rapidez y calidad de relleno del zigzag y conseguir mejorar el acabado superficial a la vez que contener el material del interior mediante la deposición del contorno.

A continuación, se elabora el proceso necesario para obtener ambas estrategias.

Trayectoria del perímetro

Tomando como punto de partida la nube de puntos que imita la geometría de la pieza mediante capas, se comienza con la identificación de puntos que componen el perímetro. El dato de entrada consiste en 3 matrices de tres dimensiones cuyos valores constituyen las 3 coordenadas necesarias para conocer la ubicación en el espacio de cada punto. La tercera dimensión en la que se extienden estas matrices puede entenderse como las diferentes capas que componen el modelo.

Cabe destacar que las funciones generadas a lo largo del trabajo han ido recibiendo modificaciones y optimizaciones, y por supuesto cabe la posibilidad de seguir mejorándolas. En este caso, se elaboró un primer método para la obtención del movimiento del contorno derivado de la selección de puntos destinados al zigzag, pero las carencias de éste llevaron a desarrollar un segundo método con propiedades adicionales.

El primer método se basa en el desacople de puntos del perímetro y del interior, obteniendo dos datos independientes para poder trabajarlos por separado. En un modelo cilíndrico el resultado es el siguiente:

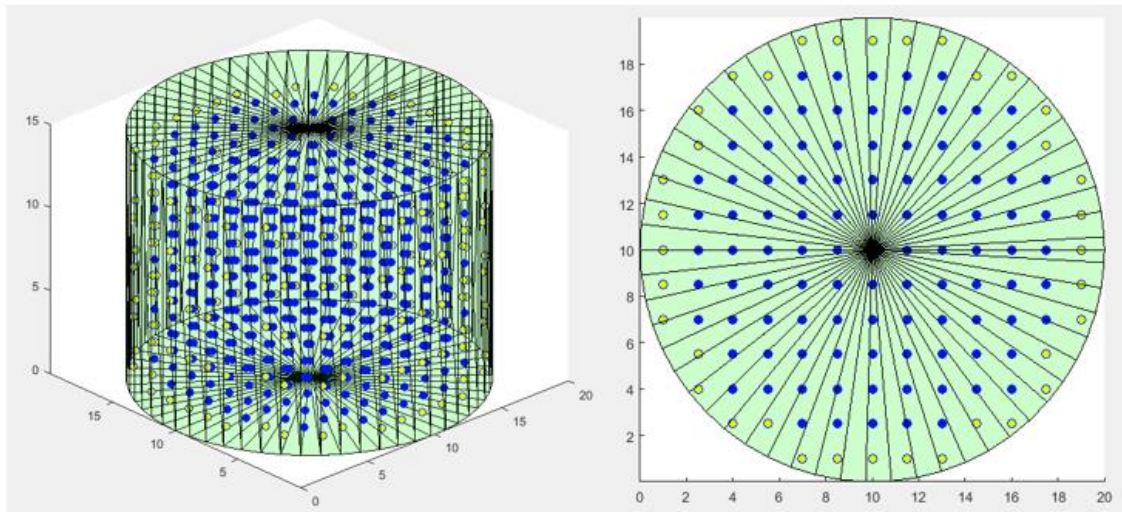


Ilustración 33: Desacople de puntos en una pieza cilíndrica.

En la ilustración 33 se pueden observar los puntos que forman el perímetro de color amarillo, y los puntos de su interior de color azul.

Es notable el efecto de distorsión causado por el proceso de discretización que ha sufrido la pieza al ser representada mediante una nube de puntos dependiente de la distancia entre cordones. De esta forma, no se consigue aprovechar la capacidad de la estrategia de contorno de producir el perímetro con exactitud, por lo que se plantea la generación de otra nube con mayor número de puntos.

Realizando la identificación de puntos del perímetro en la nube de puntos destinada a ello, y conservando de forma separada los puntos interiores al perímetro de la segunda nube, el resultado es el siguiente.

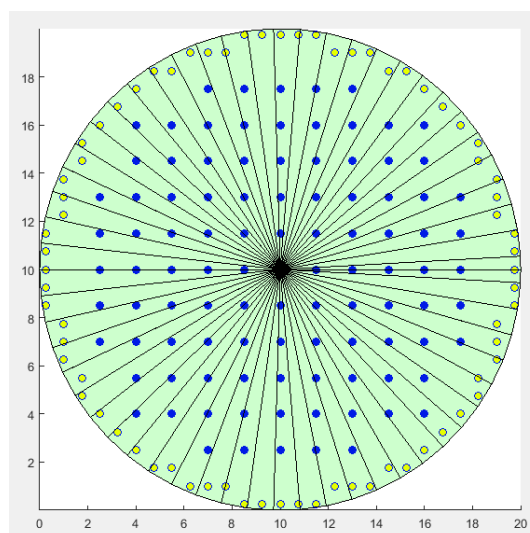


Ilustración 34: Desacople de puntos empleando una segunda nube con mayor número de puntos para definir el perímetro.

Aunque se consigue mejorar la calidad superficial, el resultado sigue siendo insatisfactorio, puesto que sigue dependiendo de la geometría simplificada por la nube de puntos.

En la fabricación aditiva, al igual que en el resto de los métodos tradicionales de fabricación, existen varias deficiencias y restricciones relacionadas con la calidad geométrica del producto. Por este motivo, se ha dedicado y se sigue dedicando un gran esfuerzo en la mejora de la eficiencia de la fabricación, mejorando tanto la precisión dimensional como la rugosidad superficial. Por esta razón, se ha requerido la creación de un segundo método que corrija los errores visibles en este método y que se expone a continuación.

Para la generación de la trayectoria del perímetro se han establecido varias propiedades que se deben cumplir:

- La capacidad de producir la geometría de la sección transversal con exactitud, reduciendo el efecto de la discretización y permitiendo realizar un menor mecanizado.
- Una adaptación adecuada al contorno de la pieza, obteniendo una trayectoria continua y sin cambios de dirección repentinos que causen variaciones en la velocidad y, por lo tanto, irregularidades en la deposición.
- Un número adecuado de puntos para definir el contorno y una distancia apropiada entre ellos para permitir al zigzag adaptarse al perímetro y no excederse en el tamaño del dato.

Tras las limitaciones que se presentan al depender de la nube de puntos, se ha decidido prescindir de ella para elaborar el contorno. Por lo tanto, el nuevo punto de partida son los datos obtenidos de la lectura del archivo STL, es decir, las caras y sus vértices y vectores normales de todos los triángulos que componen el modelo 3D.

El proceso comienza con la elección de los planos transversales que realizan el rebanado de la pieza mediante la selección de una secuencia de coordenadas Z, lógicamente, separadas por la misma distancia. Se desarrolla un algoritmo con el que se identifican todos los puntos de intersección entre dichos planos y los vértices de cada triángulo.

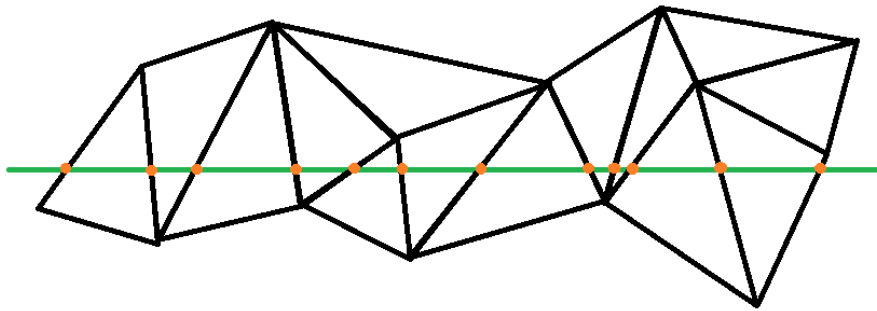


Ilustración 35: Representación esquemática de la identificación de los puntos de intersección entre vértices y plano.

Mediante este método se asegura una representación del perímetro mediante puntos situados exactamente sobre él. Por consiguiente, permite a la trayectoria adaptarse a la geometría transversal con un grado de exactitud dependiente de la cantidad de triángulos empleados, que salvo en casos extremos, se obtienen muy buenos resultados. Un caso crítico sería la representación de la pieza con un número muy reducido de triángulos, pero incluso el STL de menor resolución posible generado por SolidWorks produce un modelo admisible. Para un caso general, es notable la mejoría frente al método anteriormente mencionado.

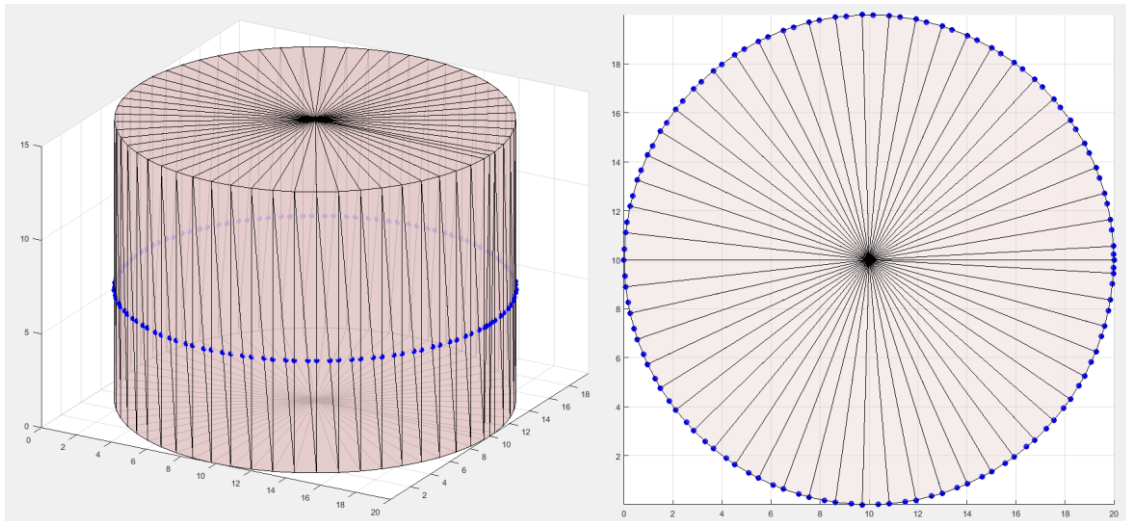


Ilustración 36: Identificación de puntos del perímetro. Izquierda: Vista 3D. Derecha: Vista de planta.

Como cada vértice pertenece a dos triángulos, se registran dos puntos por cada intersección. Una trayectoria se compone por una secuencia de coordenadas de puntos, por lo que solamente es necesario un punto de cada pareja, además de conseguir reducir el tamaño del archivo.

Por otro lado, a cada punto registrado se le asigna un vector que se corresponde con el vector normal del triángulo al que pertenece el vértice en el que se encuentra dicho

punto. Por lo tanto, aunque cada pareja de puntos tenga unas coordenadas espaciales idénticas, se les atribuye unos vectores distintos. Al tener que eliminar uno de los puntos, también se debe eliminar uno de los vectores tras seleccionar el más adecuado. Surgen 3 alternativas:

- Según la dirección y el sentido de la trayectoria, escoger el vector del primer triángulo. (1)
- Según la dirección y el sentido de la trayectoria, escoger el vector del segundo triángulo. (2)
- Calcular una media entre los dos vectores. (3)

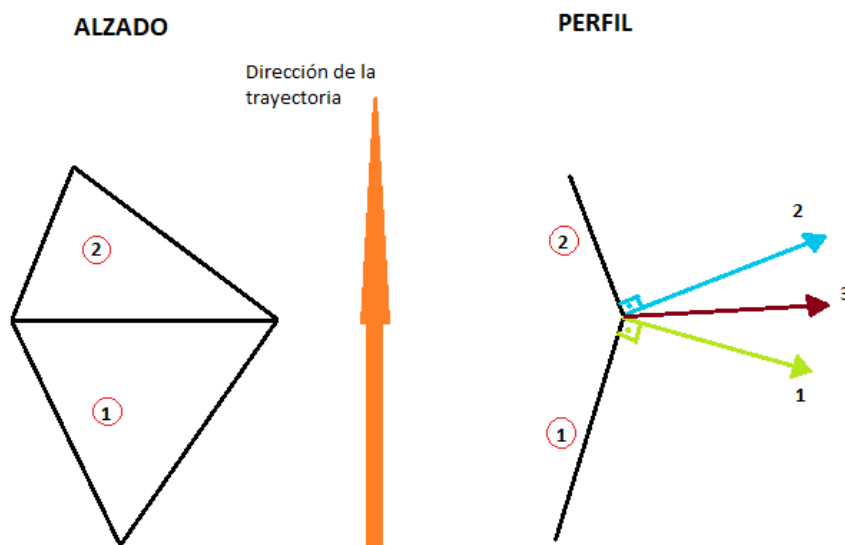


Ilustración 37: Vista de alzado y de perfil de 2 triángulos consecutivos y los 3 posibles vectores del punto de intersección.

Una reproducción aceptable del diseño requiere un mínimo número de triángulos, y más aún en los tramos curvos, donde se halla una mayor densidad de caras. Esta condición provoca que los ángulos entre los triángulos adyacentes sean aproximadamente de 90 grados y, por lo tanto, los vectores (1), (2) y (3) son prácticamente equivalentes.

Como se verá más adelante, el archivo de texto con las trayectorias se compone de coordenadas y orientaciones por cada punto. El cabezal no mantiene una inclinación constante a lo largo de una de las caras, si no que realiza una reorientación progresiva entre los dos puntos y sus indicaciones. En la realización de este trabajo se ha realizado el cálculo del vector medio, con el fin de asignar a cada punto el vector normal que considere las condiciones correspondientes a ambos triángulos (ilustración 37).

De todas formas, el vector normal que se seleccione es posteriormente modificado debido a las exigencias de la máquina, y el único vector relevante en la inclinación del

cabezal es el vector semi-vertical derivado de la normal y el horizontal, como más adelante se muestra.

El resultado se puede ver en la siguiente ilustración:

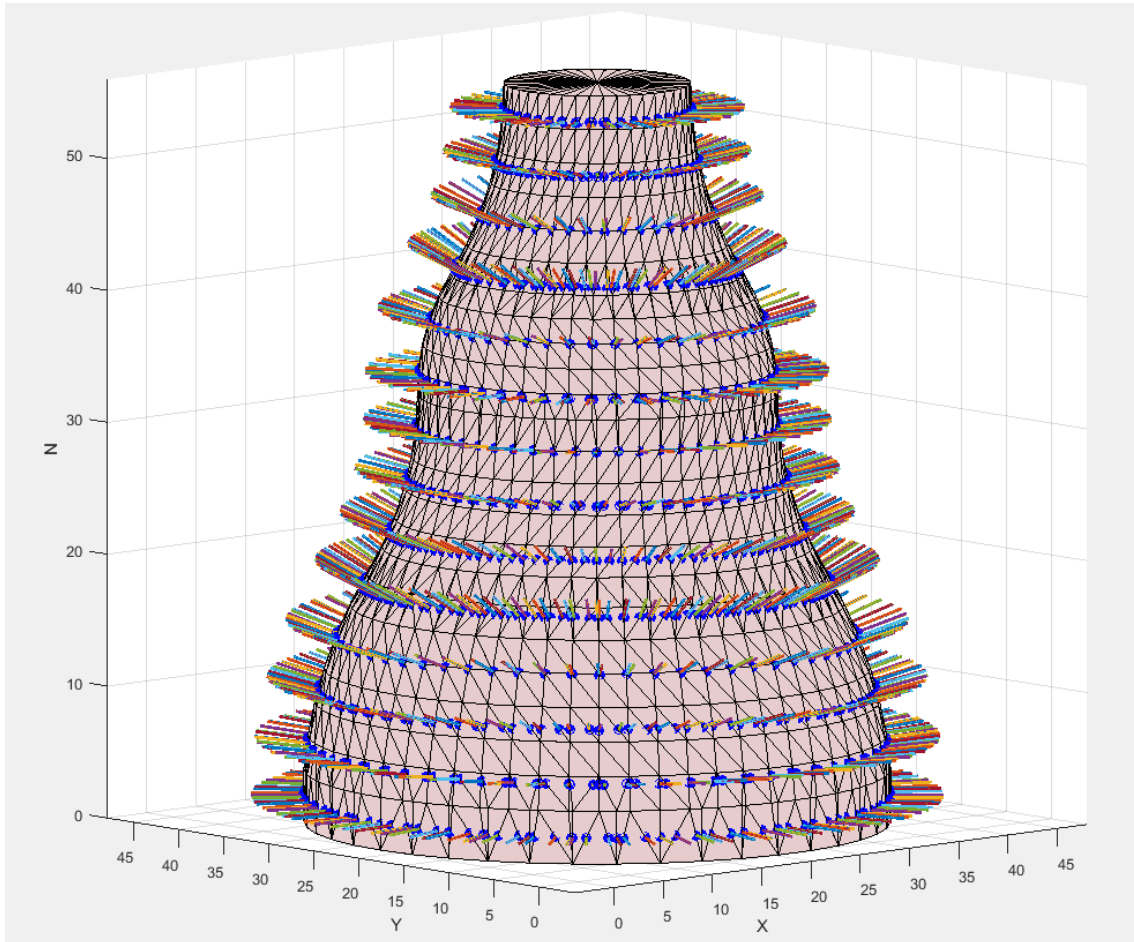


Ilustración 38: Identificación de los puntos de intersección entre capas horizontales y vértices e ilustración de los vectores normales correspondientes a cada punto.

Una vez se hayan obtenido los puntos que completan el contorno del modelo para diferentes alturas, es necesario ordenarlos para generar la trayectoria. Por cada capa, se genera una curva cerrada que recorre todos los puntos de cada superficie y que comienza y acaba en dos puntos colindantes.

Es posible la aparición de defectos en la deposición entre el último y primer puntos de cada capa debido a la interrupción en la trayectoria, pudiendo originar huecos o abultamientos en la superficie. Para evitar que se convierta en un error acumulativo, el punto de inicio se traslada progresivamente a lo largo de la curva por cada capa. Además, estableciendo una distancia adecuada entre el primer y último puntos, el defecto generado es tan despreciable que se corrige con la deposición continua de la

siguiente capa.

Un modelo 3D con una forma irregular implica una distribución no uniforme de la densidad de caras con las que se representa en formato STL. Un tramo curvo es reproducido con un mayor número de triángulos cuanto menor sea su radio de curvatura. Del mismo modo, una superficie plana constituida por un número pequeño de vértices, como un triángulo, un rectángulo... etc., es reproducida por una corta cantidad de triángulos.

Este fenómeno supone el aumento del tamaño de los triángulos del STL, y por lo tanto una menor cantidad de vértices. A la hora de generar los puntos del perímetro, se originan espacios vacíos en los tramos rectos como se puede ver en la ilustración 39.

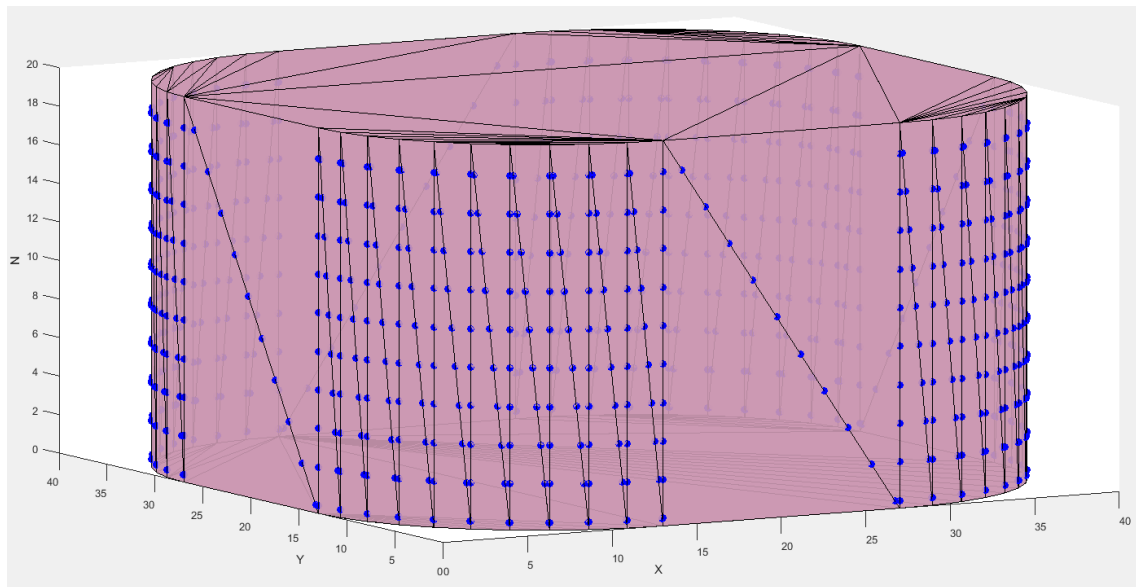


Ilustración 39: Puntos identificados del perímetro para una pieza con superficies planas y curvas.

Estos distanciamientos entre puntos no influyen en la calidad superficial de la aproximación, ya que basta con dos puntos para representar un movimiento lineal. Sin embargo, debido al posterior ajuste de la trayectoria interior en función del perímetro y que se expone más adelante, es necesaria la reproducción del contorno completo.

Se ha considerado necesario un distanciamiento máximo entre los puntos del perímetro igual a la distancia entre cordones establecida, de modo que en los tramos donde exista una mayor separación, se procede con la inserción de una cantidad mínima de puntos que cumpla esta condición. En cuanto a los vectores normales, suponiendo el caso en el que se deben introducir datos entre dos puntos con normales distintas, se realiza una reorientación progresiva proporcional a la posición de cada punto adicional.

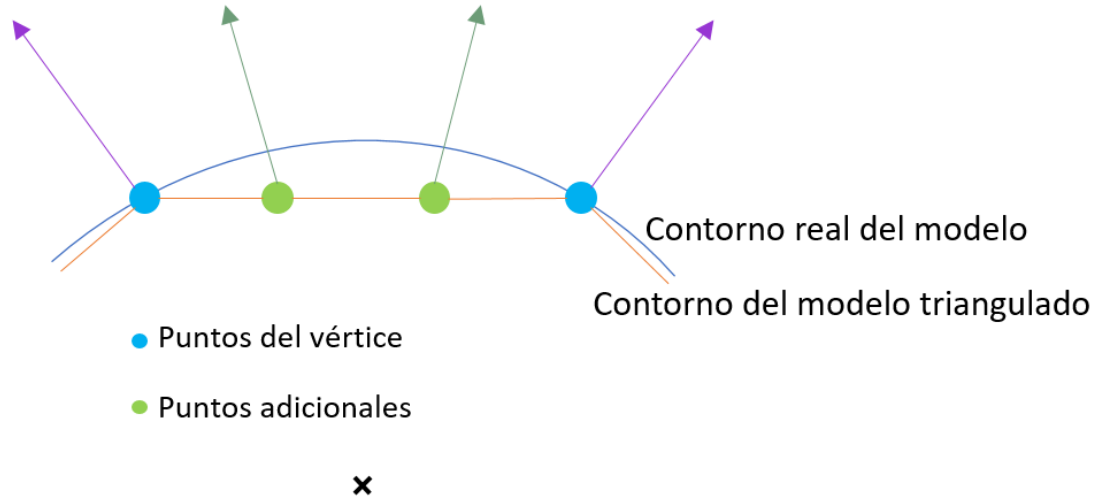


Ilustración 40: Representación esquemática de la inserción de puntos en los distanciamientos.

De todas formas, que exista una separación en el contorno significa que se trata de una superficie con un gran radio de curvatura y, por lo tanto, una diferencia pequeña entre sus normales. Realmente, la progresión proporcional del vector tiene como objetivo ayudar a la maquina a realizar un movimiento más suave.

Para el ejemplo utilizado, el resultado es el siguiente:

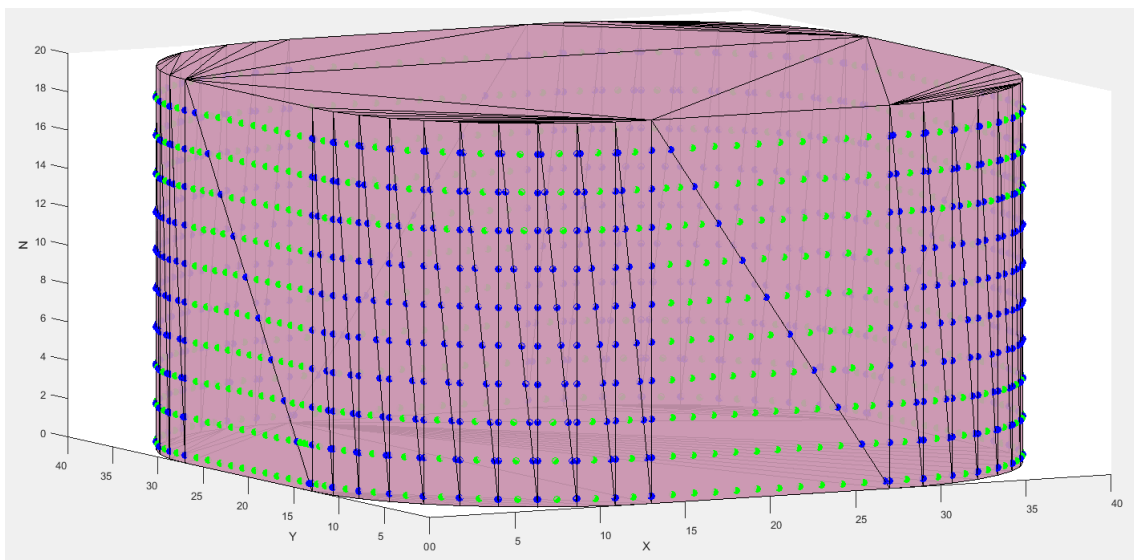
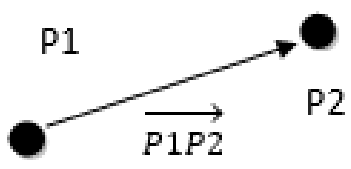


Ilustración 41: Puntos del perímetro: intersección con los vértices (azules) y puntos insertados (verdes).

Por último y solamente para el caso en el que se desea inclinar el cabezal en el proceso de deposición del perímetro, se genera un sistema de coordenadas por cada punto para conocer la orientación solicitada. El sistema de coordenadas es constituido por 3 vectores X , Y y Z , que se componen de la siguiente manera:

- El proceso comienza denominando vector Y a los actuales vectores normales hacia el exterior de la superficie.
- Los vectores X se generan de forma que estén contenidos en el plano transversal de cada capa y sean tangentes a la superficie de la pieza. La forma más sencilla es crear cada vector a partir de la recta entre un punto y el siguiente punto de la trayectoria.

Teniendo $P1 = \{x1, y1, z1\}$ y $P2 = \{x2, y2, z2\}$:



$$\overrightarrow{P1P2} = \frac{\{x2-x1, y2-y1, z2-z1\}}{|\overrightarrow{P1P2}|}$$

Teniendo en cuenta que estos vectores están contenidos en planos perpendiculares al vector Z global, la componente z debe ser siempre nula.

- El cálculo de los vectores Z se lleva a cabo mediante la regla o ley de la mano derecha (Wikipedia, 2018). Cabe destacar que la inclinación del cabezal se va a establecer de forma que coincida con la orientación de este vector, por lo tanto, debe apuntar hacia abajo y debe estar contenido en la superficie de la pared, lo más vertical posible. De este modo, el cabezal se adapta a la inclinación de la geometría y se evita la deposición sobre aire, como se puede ver en la siguiente ilustración.

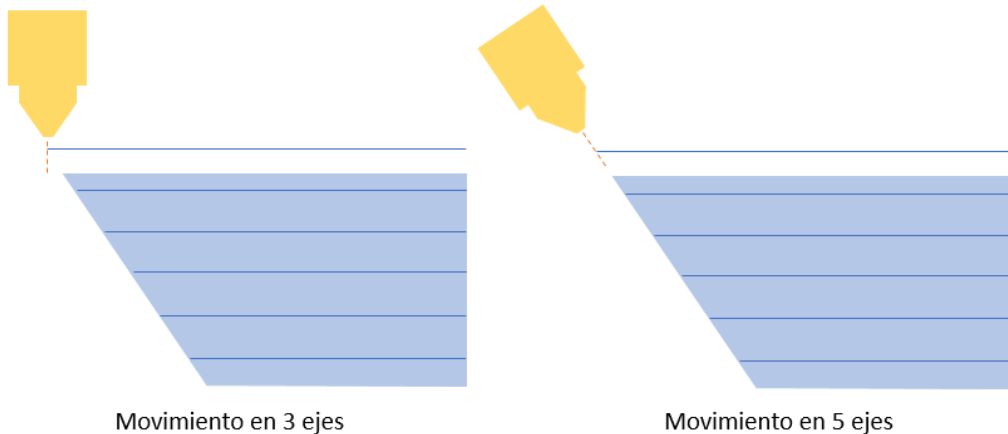


Ilustración 42: Deposición sin inclinación (izquierda) y con inclinación (derecha) en función de la pared.

En un sistema de coordenadas, con 3 vectores perpendiculares entre sí, el cálculo del vector Z se lleva a cabo efectuando el producto vectorial de los vectores X e Y en este mismo orden según la ley de la mano derecha. El sentido de la trayectoria influye en la dirección de los vectores X y, por lo tanto, en la orientación del vector Z . Visualizando el modelo en la vista de planta, cuando el

sentido de la trayectoria es el contrario que el de las agujas del reloj, el vector Z queda definido hacia abajo. Sin embargo, el sentido es independiente y aleatorio en cada capa, lo que conllevaría la aparición de vectores con orientación no deseada. Se han planteado dos formas de solucionar este problema: Establecer el sentido de la trayectoria contrario al de las agujas del reloj para todas las capas, o solamente invertir el sentido de los vectores X que tengan una previa orientación inadecuada. La elección de la solución depende de si se desea mantener el mismo sentido o se prefiere alternar aleatoriamente.

- El último paso consiste en definir correctamente el sistema de coordenadas, ya que cabe la posibilidad de que los vectores X e Y no sean ortogonales. Estas dos irregularidades se solucionan recalculando el vector Y mediante el producto vectorial entre Z y X .

La siguiente ilustración muestra la situación tras los cálculos mencionados.

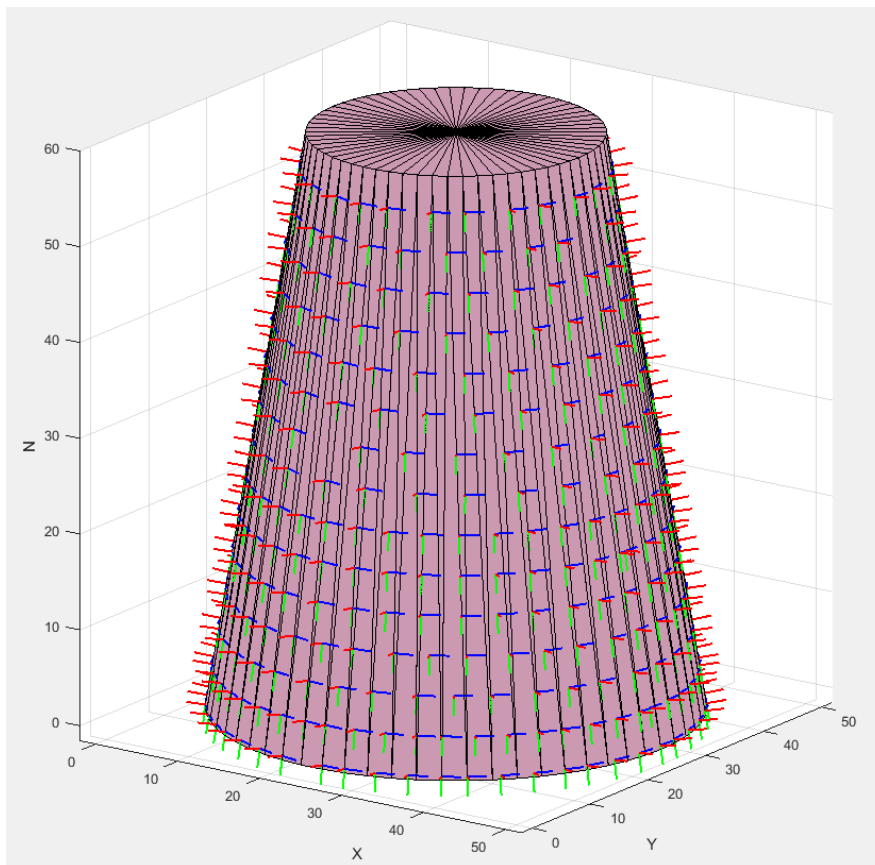


Ilustración 43: Representación de los sistemas de coordenadas de cada punto en varios puntos de la trayectoria del perímetro.

En la ilustración 43 se representan los sistemas de coordenadas creados solamente en algunos de los puntos de la trayectoria del perímetro. Es posible apreciar los vectores Z

de verde orientados hacia abajo, los vectores X de azul y contenidos en el plano de la capa, y los vectores Y de rojo y prácticamente normales a la superficie del triángulo al que pertenecen.

Para entender la orientación del sistema de coordenadas que se ha establecido en cada punto, debe ser explicado el conjunto de ejes de referencia que forman parte del campo de trabajo en el proceso de fabricación.

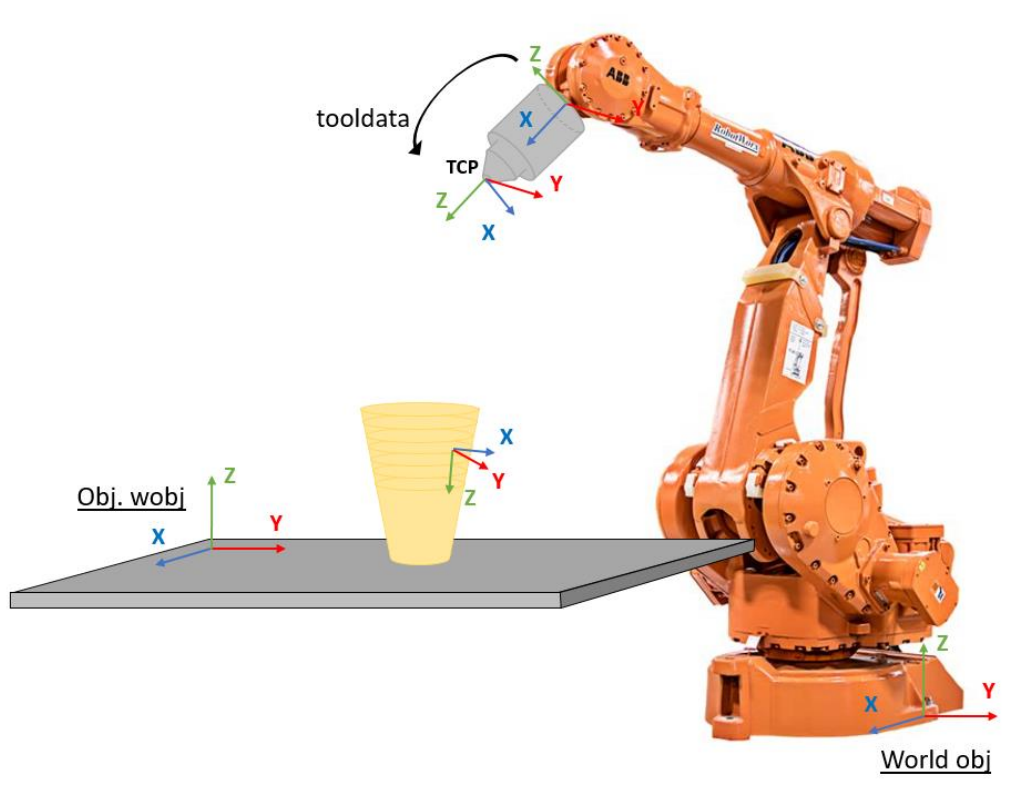


Ilustración 44: Sistemas de referencia del campo de trabajo.

Los sistemas de coordenadas utilizados en el brazo robot que se ha empleado en este trabajo, están relacionados de forma jerárquica, donde el principal es el denominado sistema de coordenadas mundo (World obj) del que dependen los demás sistemas (ABB Robotics, 2010). El robot dispone de un sistema de coordenadas predefinido en su extremo, del que depende la herramienta mediante el sistema de coordenadas del punto central de la herramienta (TCP). Al ejecutar el programa, el robot mueve el TCP hasta la posición programada. Es posible definir varios TCPs diferentes para un mismo robot en función de la herramienta empleada, y debe ser adecuadamente definida mediante la relación entre los sistemas de coordenadas del TCP y del extremo del robot. Esta relación es denominada tooldata.

Por otro lado, se define el sistema de coordenadas del objeto de trabajo (Obj. wobj) en función del sistema mundo y normalmente sobre la mesa de trabajo. A la hora de

programar el robot, las posiciones que componen la pieza dependen de la base de coordenadas del objeto de trabajo proporcionando la posibilidad de ajustar fácilmente la posición mediante varios offset.

Por último, los sistemas de coordenadas de cada punto de la pieza, también llamados objetivos, son la posición que debe tomar el TCP progresivamente, es decir, hacer coincidir ambos sistemas de coordenadas. El tener el sistema del TCP predefinido como se ve en la ilustración 37, es la razón por la cual se han creado los sistemas de coordenadas de la pieza de forma que el vector Z sea semi-vertical y apuntando hacia abajo.

Sin embargo, teniendo en cuenta el resultado mostrado en la ilustración... se puede deducir una rotación completa del cabezal sobre su eje Z. Este movimiento está totalmente imposibilitado debido a la configuración que presenta el cabezal, en el que todas las conexiones necesarias en el aporte de material y de la fuente de energía impiden grandes ángulos de rotación sobre su eje.

Por esta razón, se ha considerado necesaria la rotación de cada sistema sobre el vector Z de cada punto, de forma que los ejes X e Y queden orientados en la misma dirección y coincidan con el sistema de coordenadas del TCP. El cabezal se ha establecido de forma que trabaje en una orientación óptima que se desea conservar durante el proceso de fabricación. Para eso, la orientación del sistema de coordenadas del objeto de trabajo se define siempre exactamente igual existiendo entre ambos sistemas una permanente relación en el caso en el que el cabezal se mantiene vertical.

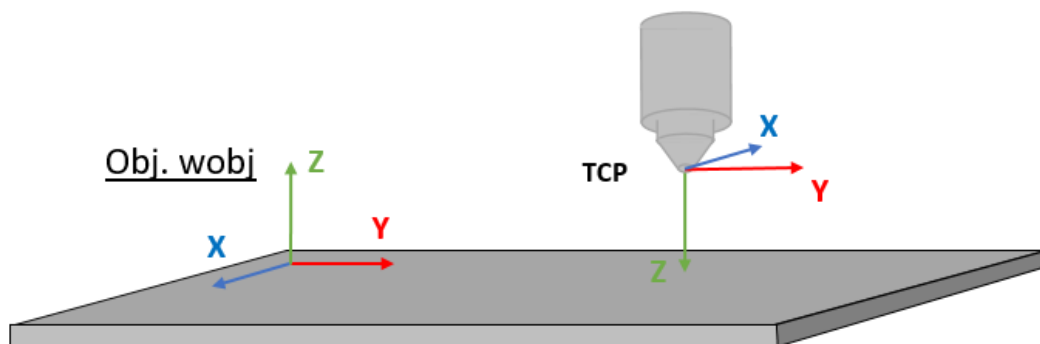


Ilustración 45: Relación entre el sistema del objeto de trabajo y el sistema de la herramienta.

Como se puede ver en la ilustración 45, la relación entre ambos sistemas es una rotación de 90 grados sobre el eje Y. Para que el cabezal no rote sobre su eje Z durante el proceso de fabricación, es necesario que los sistemas de todos los puntos que componen el modelo 3D tengan una configuración semejante a la del TCP. En concreto, se debe cumplir que la componente x del vector Y, y la componente y del

vector X de cada punto tengan valor nulo. De esta forma se logra impedir la rotación sobre el eje Z de la herramienta, y se posibilita únicamente una reorientación mediante la rotación sobre el eje X y/o eje Y .

Por lo tanto, realizando una reorientación de los sistemas de coordenadas generados manteniendo el vector Z inalterado y en función de dichas condiciones, el resultado pasa a ser el siguiente.

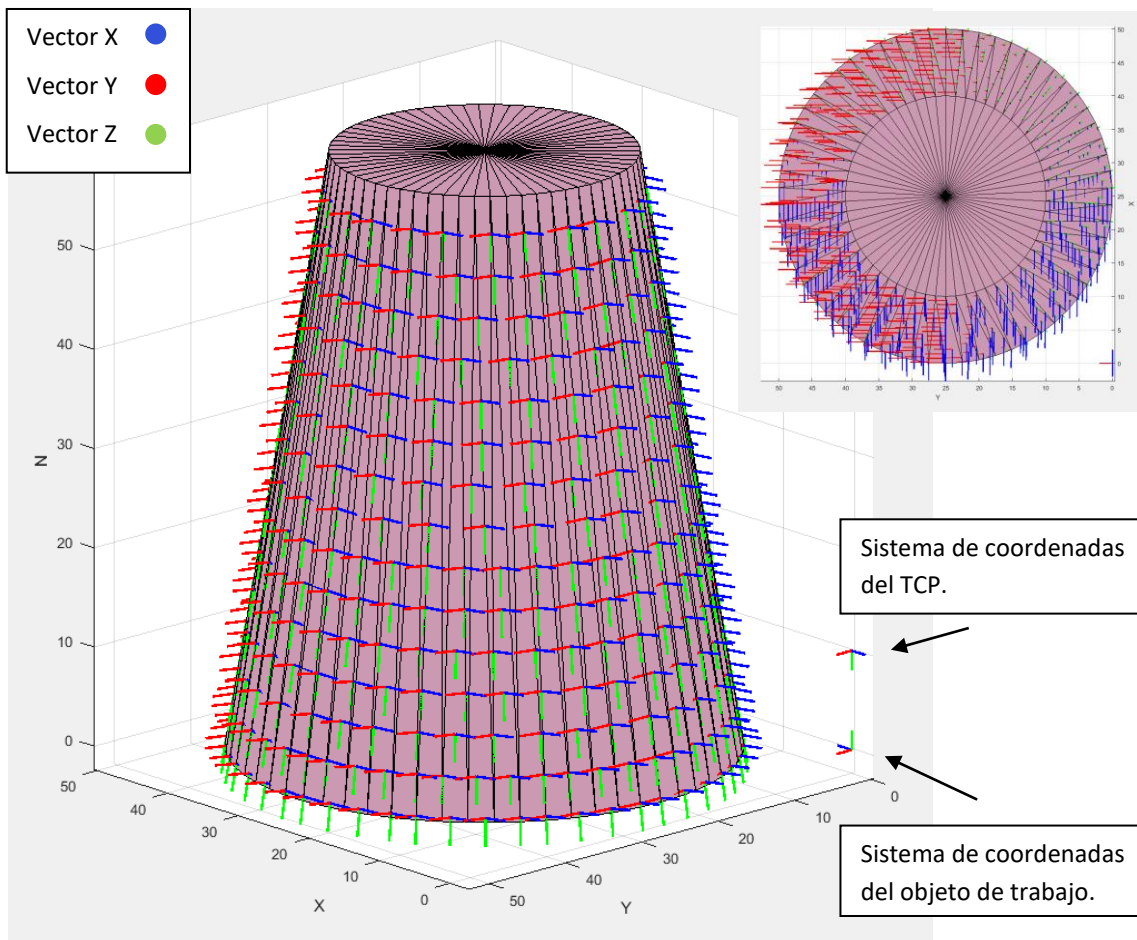


Ilustración 46: Representación de los sistemas de coordenadas reorientados de los puntos de la pieza según el sistema del TCP. Vista 3D (izquierda) y vista de planta (derecha).

En este punto del programa ya se ha definido la trayectoria que debe seguir la herramienta mediante una secuencia de coordenadas y orientaciones. Para un caso general, la cantidad de puntos reproduce con una exactitud suficiente el contorno de la pieza y permite un movimiento de translación continuo del cabezal a lo largo de la trayectoria sin someterse a variaciones en la velocidad. Sin embargo, en el caso de la deposición del cabezal con inclinación variable, la discretización realizada mediante la reproducción por puntos y sus sistemas de coordenadas provoca un movimiento de orientación escalonado y discontinuo. Este efecto es inadmisibles en la fabricación

aditiva debido a las discontinuidades generadas en el material depositado, que causa una construcción defectuosa de la pieza.

Se ha optado por solucionar este inconveniente reduciendo la diferencia entre las orientaciones de los sistemas de coordenadas de los puntos próximos. Realizando el cálculo de la media aritmética del valor de los vectores X , Y y Z respectivamente de un número concreto de puntos anteriores y posteriores de cada punto de la trayectoria, se logra una semejanza mayor entre los puntos adyacentes. Es decir, en una trayectoria del perímetro de una de las capas compuesta por x puntos que crea una curva cerrada, se realiza el cálculo de la media aritmética por cada punto. El usuario debe definir el número apropiado de datos (siempre impar) con el que realizar el cálculo, quedando de la siguiente manera para el punto k .

$$Vm_k = \frac{\sum_{i=k-npuntos/2}^{i=k+npuntos/2} V_i}{npuntos}$$

En un caso general, el ajuste realizado es casi inapreciable gráficamente, por lo que se considera que la ligera variación en la inclinación no llega a afectar a las propiedades de la deposición. Sin embargo, se ha podido comprobar la eficacia de esta operación en el movimiento real de la maquina obteniendo un desplazamiento y orientación del cabezal continuo y sin gradientes inadecuados de la velocidad.

Para finalizar la definición de la trayectoria del perímetro se obtiene la matriz de rotación ortogonal de cada punto del modelo, referenciada al sistema de coordenadas del objeto de trabajo. Esta rotación es interpretada por el software del brazo robot y su configuración es la encargada de situar el cabezal en la posición indicada. Como se verá más adelante, la rotación debe estar representada mediante cuaterniones, por lo que se realiza una conversión mediante la función predefinida *SpinCalc*.

Trayectoria del zigzag

La trayectoria del zigzag constituye el movimiento empleado para depositar material en el área interior al perímetro, siendo el principal actor en la calidad y las propiedades de la construcción.

El proceso comienza con los datos obtenidos en el desacople de puntos entre el perímetro y el interior mencionado en el primer método para obtener la trayectoria del perímetro. Por lo tanto, el dato de entrada son 3 matrices de 3 dimensiones con las coordenadas de los puntos que componen el interior de la pieza. Cabe recalcar que las propiedades de la nube de puntos son dependientes de las características requeridas en la estrategia de zigzag, y que debido al desacople realizado, existe una separación mínima entre el contorno de la pieza y cualquier punto del interior igual al producto

entre la distancia entre cordones y la raíz cuadrado de dos.

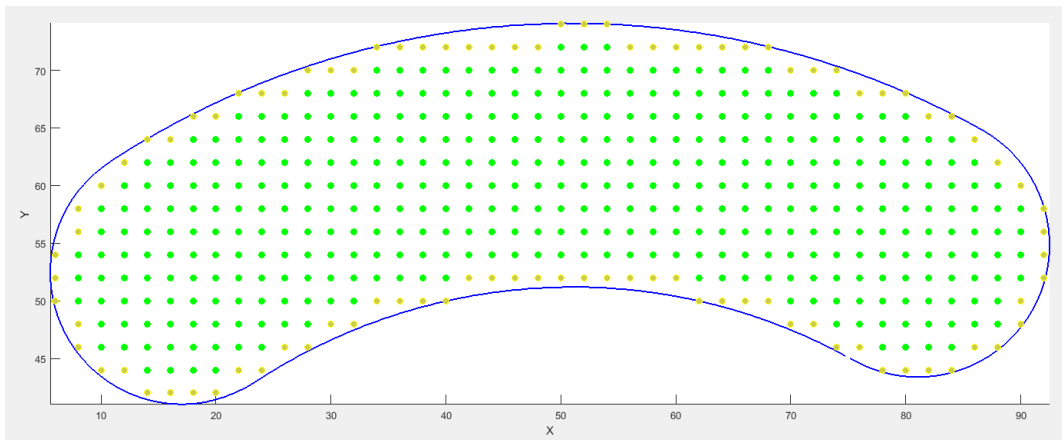


Ilustración 47: Desacople de puntos del interior (verdes) contenidos en el área generada por la trayectoria del perímetro (azul).

La estrategia de zigzag recorre cada capa mediante rectas paralelas contiguas alternando el sentido y unidas entre sí por sus extremos. El modo más eficaz es extendiendo cada una de las rectas hasta los límites de la superficie, creando una trayectoria continua a lo largo de la capa siempre y cuando sea posible. Para crear las rectas que componen el zigzag, se deben identificar los puntos de los extremos de cada una de las rectas, que son los puntos situados en los límites de la superficie en una dirección específica.

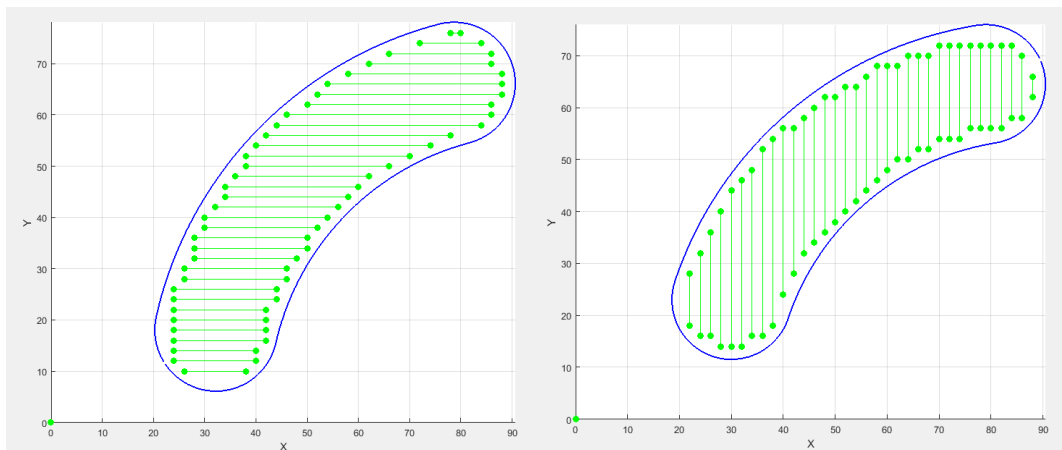


Ilustración 48: Creación de las rectas que componen el zigzag para diferentes direcciones.

Esta estrategia supone la construcción de cada capa mediante rectas en la misma dirección, implicando la posibilidad de obtener como resultado una pieza anisótropa y con deformaciones debidas a la contracción sufrida en una dirección al enfriarse el material. Para impedir que ocurran estos efectos, las diferentes capas que componen el modelo son clasificadas en pares e impares permitiendo manipularlas de forma separada y alternando la dirección del zigzag a medida que se deposita cada una de las

capas. Es decir, las rectas del zigzag de las capas pares son perpendiculares a las de las capas impares. El software actual genera únicamente dos direcciones que coinciden con el eje X y el eje Y , por lo que cada pareja de puntos que componen las rectas posee idénticas coordenadas y o x respectivamente.

Se emplean unas secuencias numéricas para ordenar todas las rectas y unirlas por sus extremos especificando de forma alterna el sentido de la trayectoria, formando así un preliminar movimiento de zigzag.

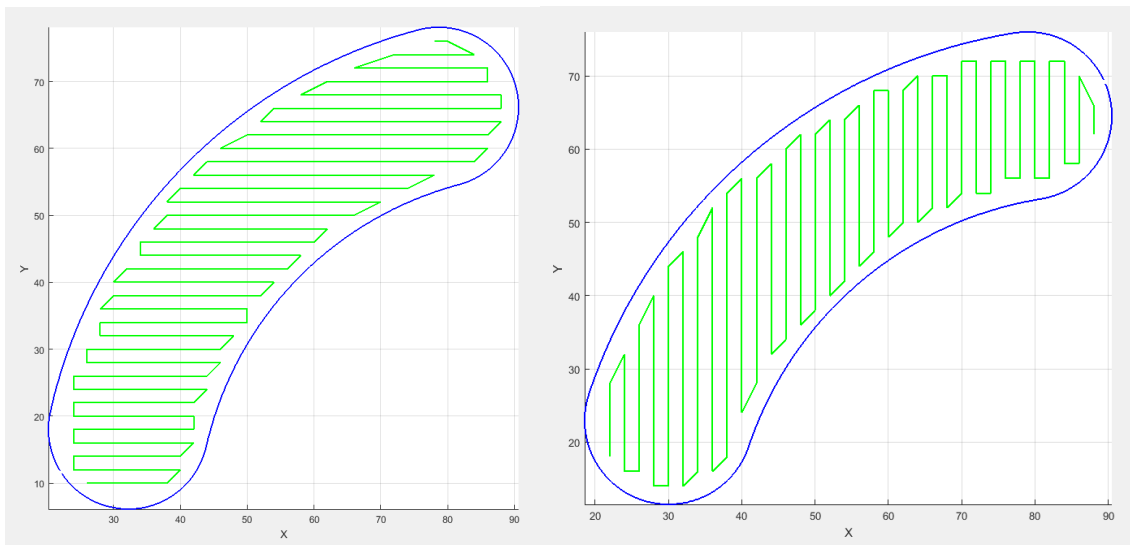


Ilustración 49: Estrategia de zigzag preliminar en dos capas consecutivas y con direcciones diferentes.

En este último caso, la geometría transversal de la pieza es cóncava, es decir, es posible escoger dos puntos de la sección y dibujar una recta entre ellos no contenida en la pieza. Sin embargo, la dirección en la que ha sido generado el zigzag le proporciona unas características convexas que posibilitan una trayectoria a lo largo de la sección completamente continua. Sin embargo, en secciones con huecos o con un mayor grado de concavidad, en las que no se de esta particularidad, es necesario un mínimo de reposicionamientos del cabezal donde la fuente de energía debe ser apagada y se detiene la deposición del material.

Una trayectoria continua presenta dos principales ventajas: la reducción del tiempo y el aumento de la eficiencia de la construcción. Por un lado, los movimientos de reposicionamiento suponen tiempos no productivos, por lo que se desea reducir el número de saltos, o en caso de no lograrlo, minimizar la suma de las distancias recorridas sin depositar material. Por el otro lado, cada interrupción en la deposición conlleva una mayor probabilidad de producir defectos en la construcción, debido a los desperfectos encontrados en los puntos de inicio y fin de cada tramo. Todo reposicionamiento debe producirse con el láser apagado para evitar el

sobrecalentamiento o incluso el fundido de la base. En la tecnología de deposición mediante hilo, la extracción del material también es interrumpida, pero los tiempos de espera necesarios en el empleo del polvo, hacen inapropiada su interrupción. El resultado es una extracción continua de polvo e independiente de la trayectoria, y por lo tanto un derroche de material en cada reposicionamiento del cabezal.

Por esta razón, y como ya se ha comentado, se pueden encontrar diversas investigaciones relacionadas con la optimización de la trayectoria. En la realización de este trabajo, este factor ha sido uno de los principales temas a tratar y se han generado algoritmos destinados a solucionar este asunto. Sin embargo, aunque se hayan obtenido resultados aceptables, no se han considerado óptimos, por lo que este aspecto pasa a ser uno de los principales a tratar en una posible futura mejora del programa.

Para una pieza cóncava, y antes de realizar ninguna modificación, el zigzag es generado por secciones ordenadas según las propiedades de la sección y la dirección principal de la estrategia. Utilizando el siguiente modelo como ejemplo:

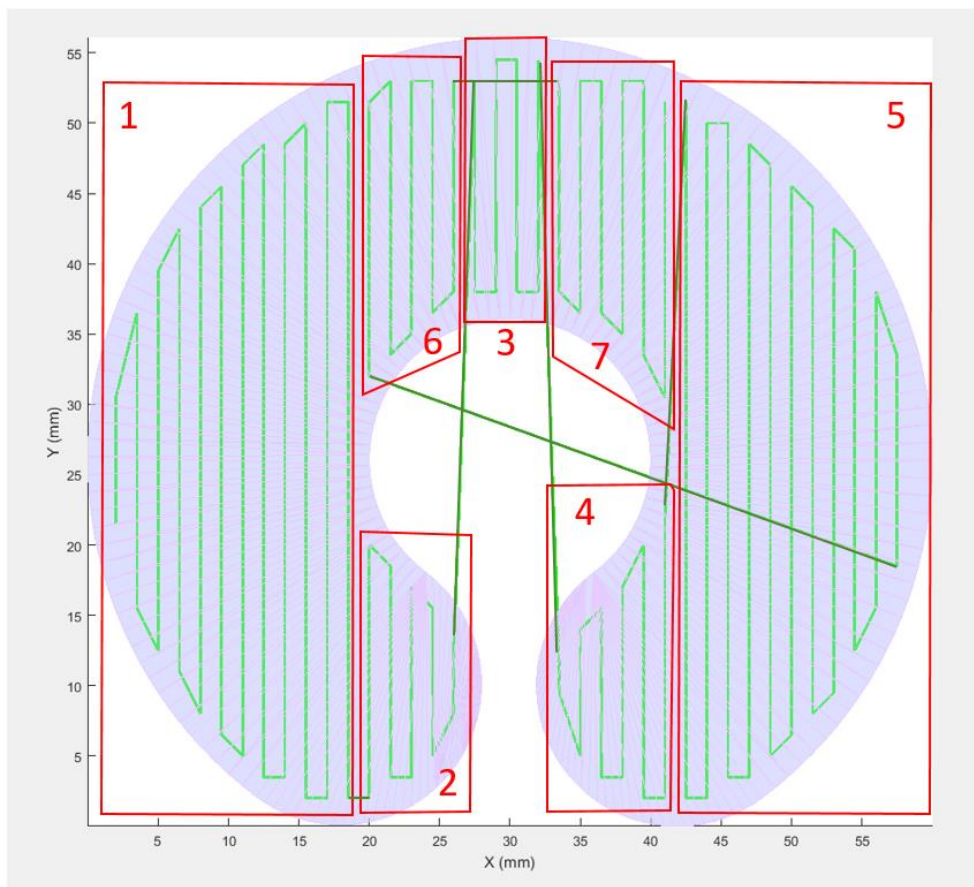


Ilustración 50: División de las secciones en las que se divide la estrategia de zigzag antes de realizar ninguna modificación.

En la ilustración 50 se puede apreciar una trayectoria completa del zigzag de una sección cóncava en la que se muestran de verde oscuro los reposicionamientos del cabezal y se identifican las diferentes secciones en las que el movimiento es ininterrumpido. La tendencia de la trayectoria actual es generarse en dirección del eje X en sentido positivo (de izquierda a derecha en la ilustración...), por lo que el punto de inicio de cada tramo se encuentra en su coordenada x mínima. Por otro lado, el orden de las secciones se establece también según la dirección positiva de X , pero se adapta en función de las propiedades cóncavas de la sección en la dirección de las rectas paralelas de la estrategia y que coincide con la del eje Y . En este caso en concreto, la pieza se considera cóncava entre las coordenadas de x 20-27 y 33-41 aproximadamente, ya que una recta paralela al eje Y que comience en dichas coordenadas de X corta la sección en dos ocasiones.

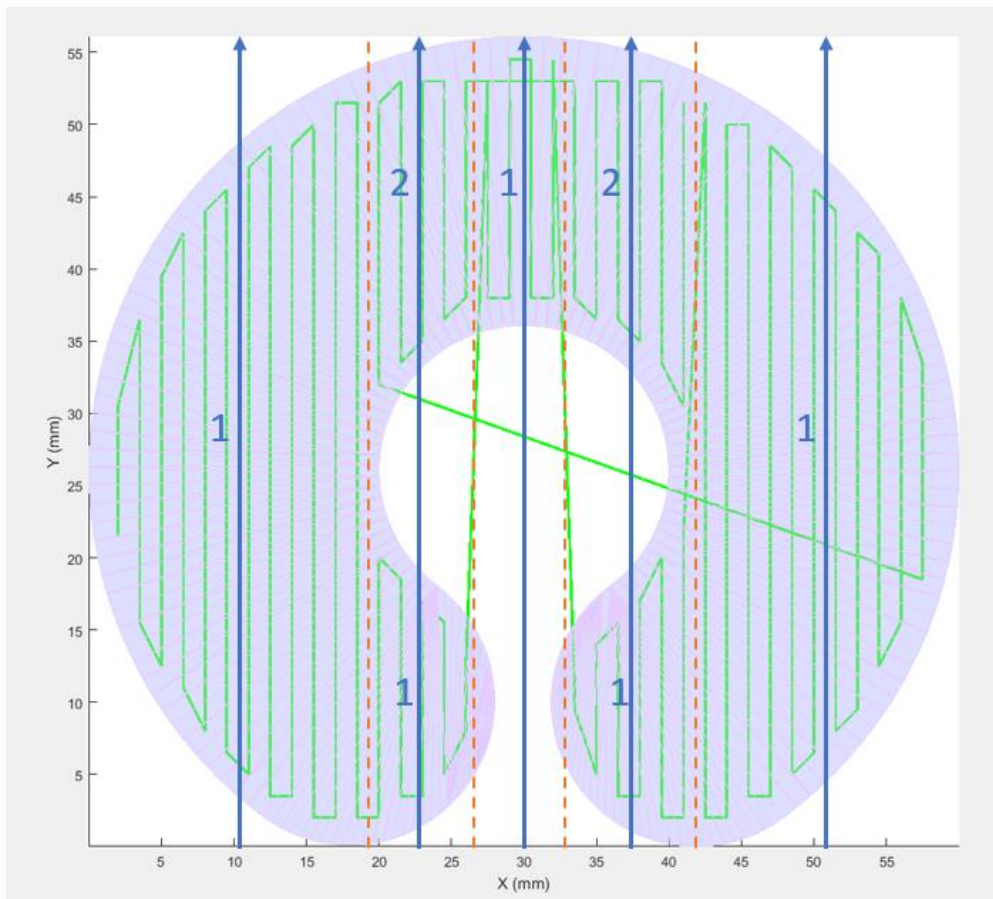


Ilustración 51: De azul, la cantidad de veces que las flechas ficticias cortan la sección.

En la ilustración 51 se han representado varias flechas paralelas al eje Y en sentido positivo, indicando con un 1 las secciones que cortaría primero y con un 2 las secciones que cortaría por segunda vez. De esta manera, se ordenan primero las secciones a las que se les ha asignado el 1 en el sentido positivo de X , y después las secciones 2 con el

mismo criterio. El resultado es el orden mostrado por la secuencia de números de color rojo.

El algoritmo desarrollado resuelve parcialmente este defectuoso movimiento reordenando la trayectoria en función de dichas secciones y reduciendo considerablemente el número de saltos. Se basa principalmente en el cálculo de las distancias entre secciones y la elección de la más cercana. Trabaja de la siguiente manera:

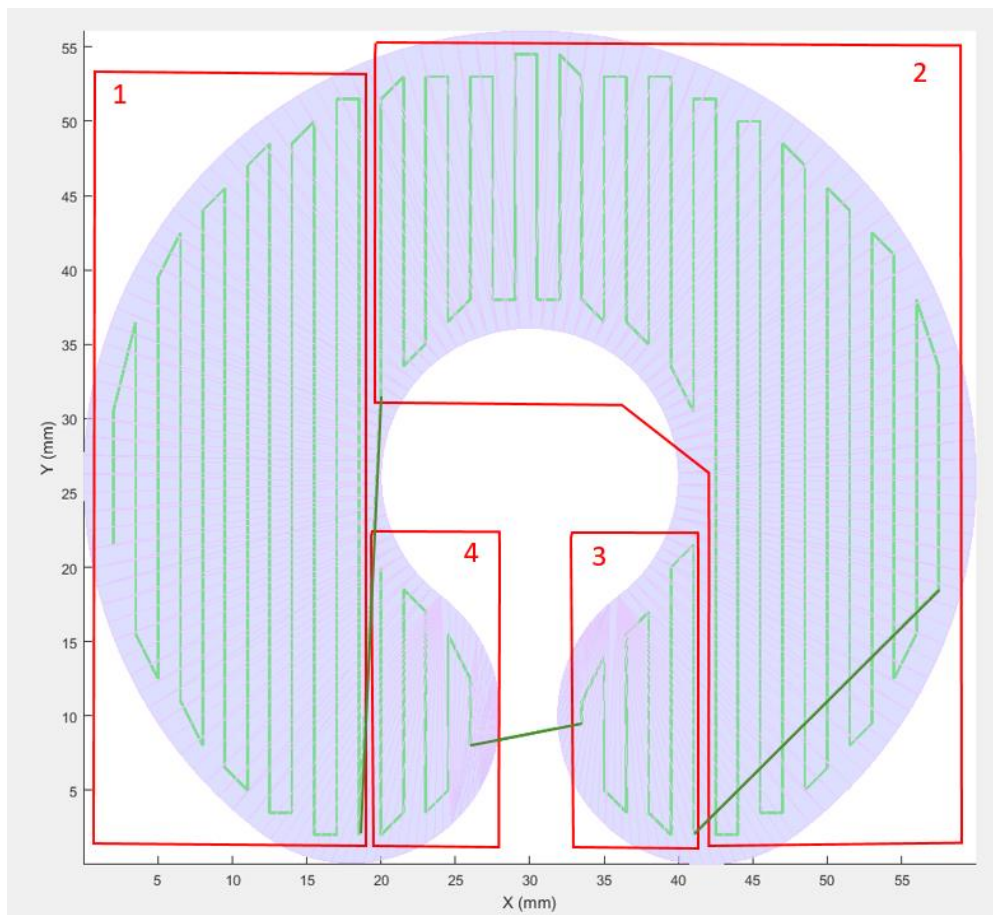


Ilustración 52: División y ordenación de las secciones en las que se divide la estrategia de zigzag después de la modificación.

Comienza con la primera sección, que es la ubicada en la coordenada mínima de x para el zigzag en la orientación de la ilustración 52 (coordenada mínima de y para la orientación rotada 90 grados). El siguiente paso consiste en el cálculo de las distancias entre el punto medio de la última recta paralela de la sección 1 y los puntos medios de los primeros y últimos tramos del resto de secciones. La conexión con un tramo final de una sección implica permutar la estrategia, generando un movimiento en sentido negativo de x (de derecha a izquierda en la ilustración 52). La iteración de este proceso completa la conexión de todas las secciones que componen cada superficie

obteniendo una notable optimización de la trayectoria respecto a la previamente mostrada (ilustración 50). Para la capa con la orientación de la deposición rotada, el resultado es el siguiente.

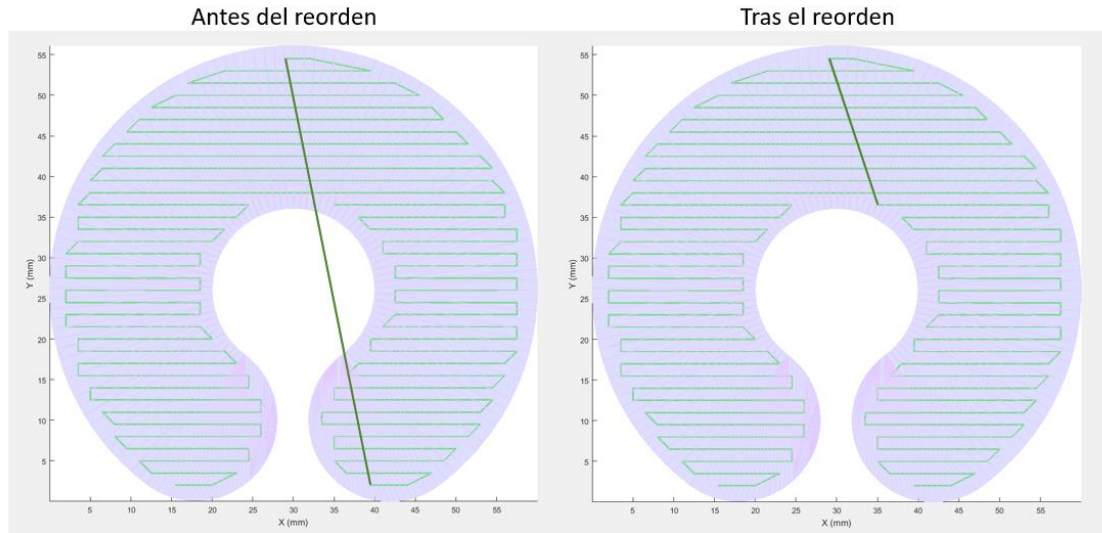


Ilustración 53: Representación del resultado de la optimización de la trayectoria.

Sin embargo, destaca una carencia en la función que convendría ser introducida en una posterior mejora: En vez de considerar las distancias entre secciones mediante los puntos medios de los tramos, se deberían tener en cuenta las distancias originadas desde los dos puntos que componen dichos tramos de forma independiente, proporcionando la posibilidad de permutar el sentido de la trayectoria al comienzo de cada zigzag.

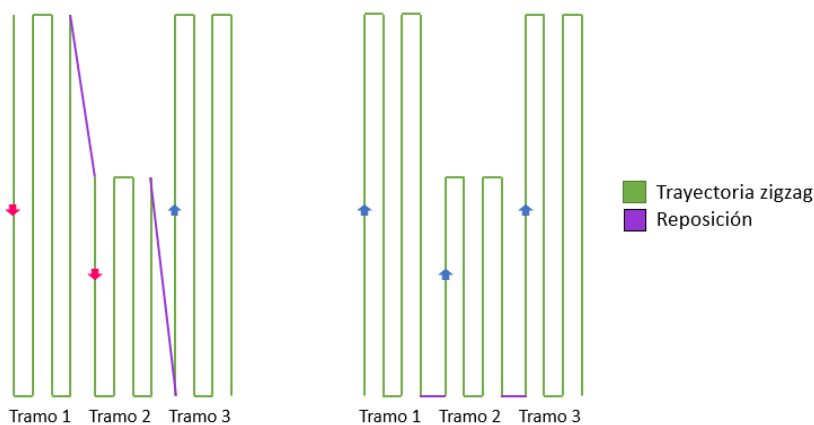


Ilustración 54: Permutación del sentido del zigzag para reducir las interrupciones.

Esta modificación aportaría una significativa reducción de las distancias recorridas sin producir del cabezal, e incluso favorecer una trayectoria continua en tramos donde sea posible.

Una vez creada una preliminar trayectoria del zigzag que puede ser comparada con la trayectoria del contorno, es posible comprobar su aptitud y detectar los defectos que podría ocasionar a la hora de producir una pieza. Por lo tanto, a partir de este punto se hace referencia a la corrección del error de discretización presentado por el zigzag a la hora de trabajar con una nube de puntos restringida por su directa dependencia de la distancia entre cordones establecida.

El principal inconveniente causado por la diferencia en la capacidad de adaptación al modelo real de la trayectoria del perímetro y la del zigzag, es la creación de zonas en las que no se deposita material, que surgen cuando ambas trayectorias quedan demasiado alejadas o el excesivo acercamiento, donde podrían producirse abultamientos. Esto origina huecos o sobreelevaciones en la superficie que conlleva la fabricación de una capa irregular. El error puede llegar a ser acumulativo, lo que ocasionaría la fabricación de piezas defectuosas e inservibles.

La solución adoptada en este trabajo se basa en el ajuste del zigzag a la geometría de la trayectoria del perímetro. Al igual que en la trayectoria del interior, donde se define la distancia entre cordones que permite que el solape entre ellos cree una capa uniforme, también es conveniente mantener dicha distancia entre los puntos del perímetro y los extremos del zigzag. El error es interpretado dibujando círculos con radio igual a esta distancia, donde la trayectoria ideal es en la que los bordes de giro del zigzag son tangentes a los círculos próximos.

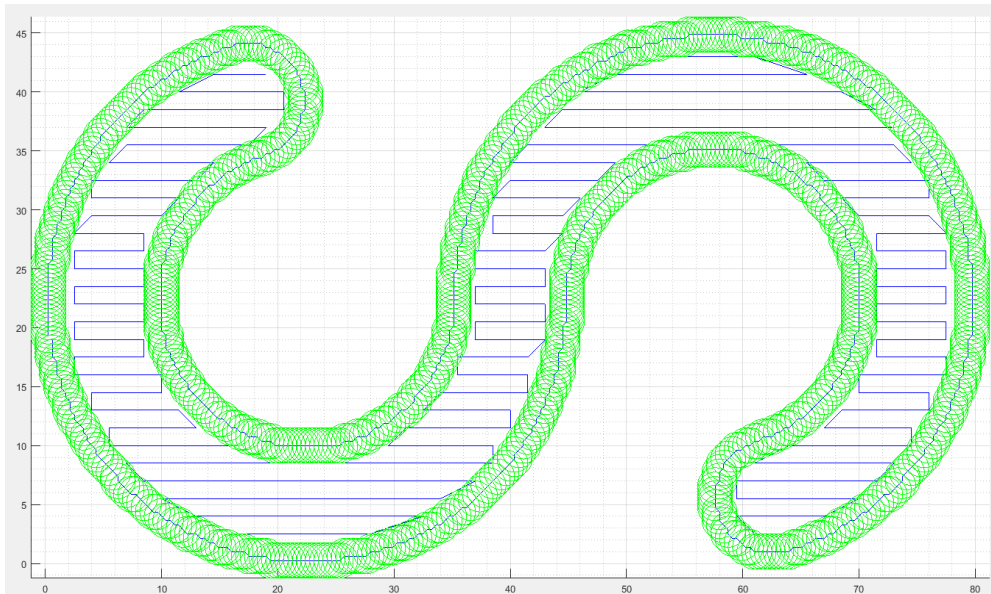


Ilustración 55: Representación del error de discretización del zigzag.

De esta manera, se van a llevar a cabo dos tipos de ajustes de la trayectoria del zigzag: un ajuste longitudinal (en la dirección de las rectas paralelas) y otro transversal

(perpendicular al anterior).

Ajuste longitudinal

El ajuste longitudinal se basa en el movimiento de los extremos a lo largo de las rectas paralelas a las que pertenecen hasta una adecuada distancia al perímetro. El proceso se realiza examinando la distancia entre cada punto del zigzag y el punto más cercano del perímetro. Cuando la distancia entre ellos es inapropiada, el punto del zigzag es reubicado a lo largo de la línea que corresponde al segmento recto, en la posición en la que la distancia al punto del perímetro más cercano es la distancia entre cordones. Esta es la razón por la que se ha considerado necesaria la inserción de puntos en el perímetro, ya que, si un movimiento estuviera representado únicamente por los puntos de los extremos, los tramos del zigzag ubicados en la mitad del recorrido no hallarían puntos próximos con los que comparar su posición. En la ilustración ... se representa gráficamente la comparación mencionada.

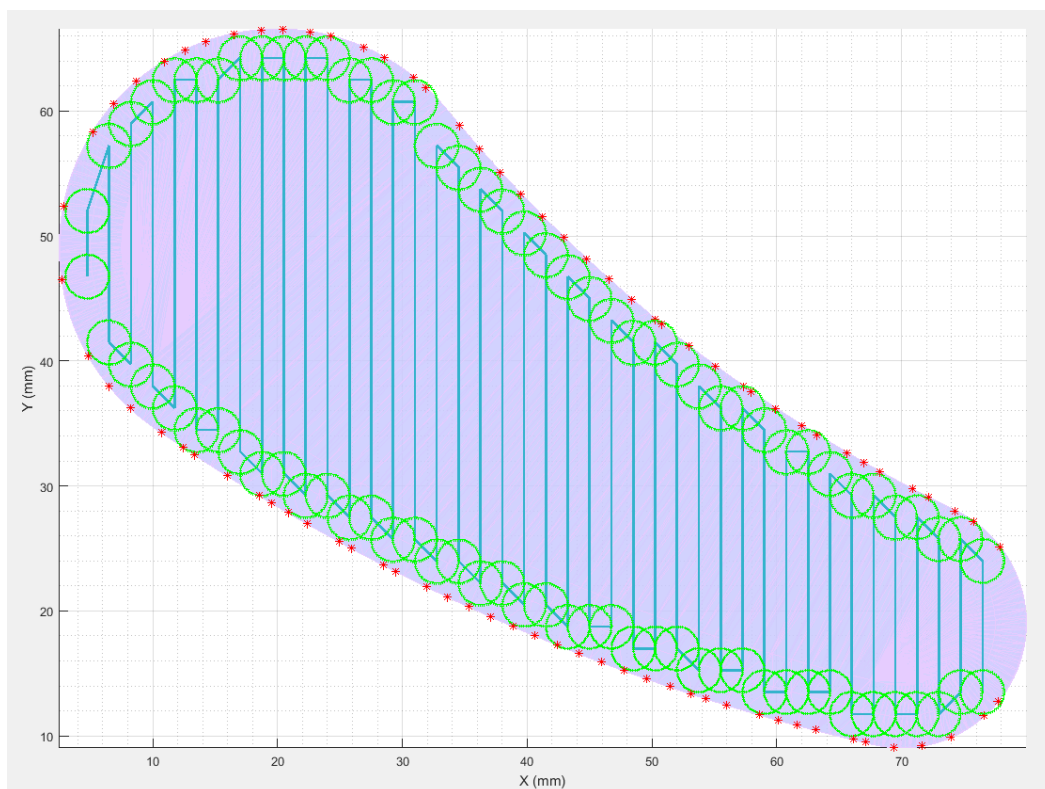


Ilustración 56: Representación de la distancia entre el zigzag y el perímetro, e identificación de los puntos más cercanos del perímetro por cada extremo del zigzag.

Los asteriscos rojos representan los puntos más cercanos del perímetro por cada punto del zigzag. En este caso, los círculos que marcan la distancia óptima entre ambas trayectorias tienen el centro en el zigzag, por lo tanto, la condición óptima es en la que el asterisco pertenece a la circunferencia. Naturalmente, si el asterisco se encuentra

fuera de la circunferencia, el borde del zigzag debe acercarse al perímetro, y si se encuentra dentro, debe distanciarse.

Utilizando esta técnica, se realiza dos veces el proceso de forma consecutiva para aumentar la eficiencia del reposicionamiento de los puntos. El resultado del ajuste de los bordes de giro del zigzag respecto al perímetro en dos capas consecutivas se muestra en las ilustraciones 57 y 58, donde se pueden comparar las modificaciones realizadas.

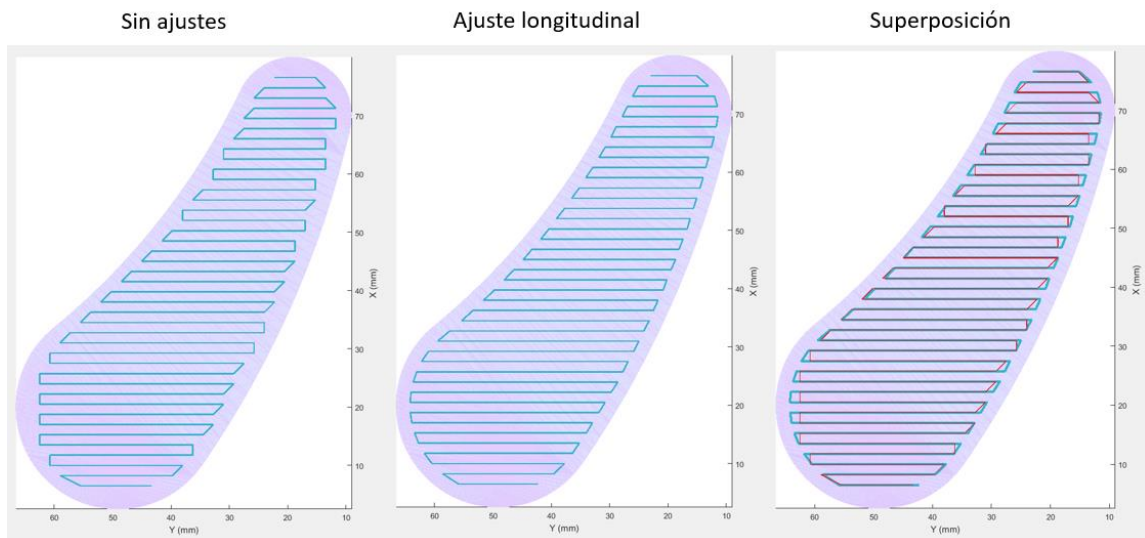


Ilustración 57: Representación del ajuste longitudinal en capas con zigzag paralelo al eje Y.

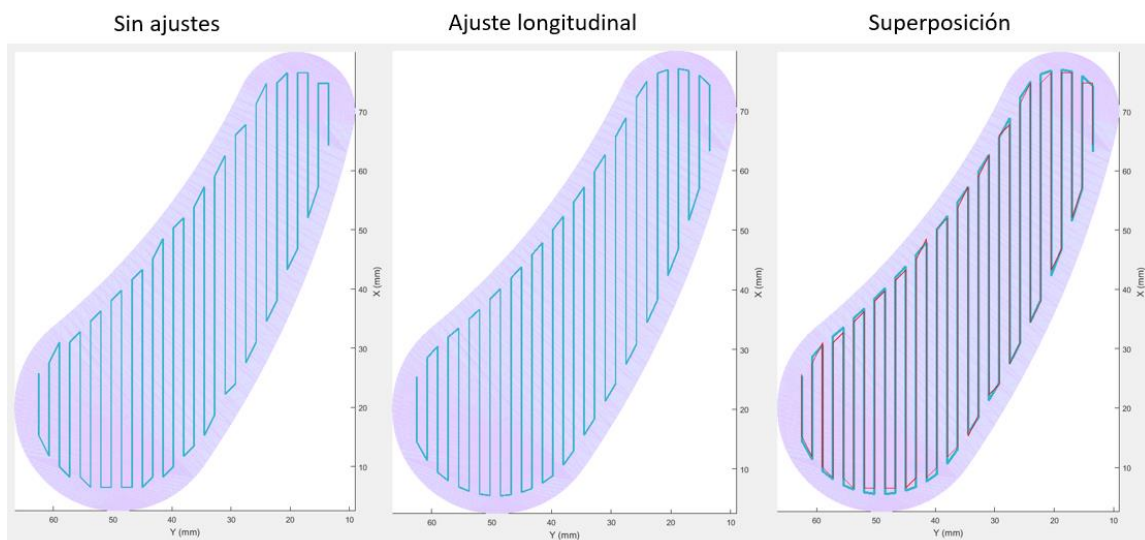


Ilustración 58: Representación del ajuste longitudinal en capas con zigzag paralelo al eje X.

En las imágenes que representan la superposición de la trayectoria antes y después del ajuste, donde se comprueba como un pequeño reposicionamiento de los extremos

permite mantener la separación adecuada respecto al contorno de la pieza. Cada giro del zigzag se realiza adaptándose a las condiciones del perímetro próximo, proporcionando un movimiento prácticamente paralelo al contorno.

A continuación, se demuestra el beneficio que aporta realizar dos veces el mismo procedimiento:

Como se ha comentado, el reposicionamiento del borde del zigzag se realiza en función del punto más cercano del perímetro y, por lo tanto, no se tiene en cuenta más que ese punto. Ignorando el tramo de la trayectoria del perímetro que lo contiene.

Por este motivo, al realizar el cálculo de las coordenadas de la nueva posición se puede dar el caso en que, aunque las nuevas coordenadas cumplan la condición de separación específica, puntos próximos del perímetro pasen a incumplirlas. Es decir, tras el reposicionamiento del zigzag, sea un punto diferente del perímetro el que se encuentre más cerca. Este fenómeno se acentúa cuanto mayor sea la distancia entre el punto seleccionado del perímetro y la línea que contiene el tramo recto del zigzag. Por el contrario, se anula cuando este punto se encuentra en dicha línea ficticia.

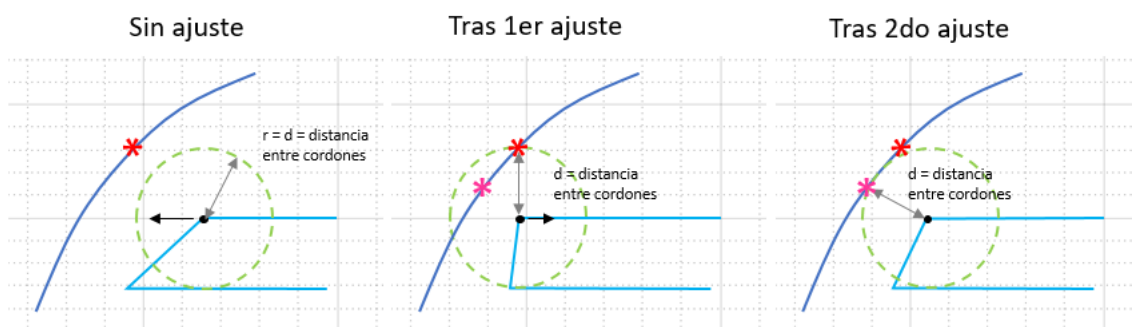


Ilustración 59: Procedimiento de ajuste longitudinal en el caso crítico.

En esta última ilustración se representa el procedimiento llevado a cabo en el doble ajuste. El asterisco rojo representa el punto más cercano del perímetro en el primer ajuste, y el asterisco rosa el del segundo. Este proceso se lleva a cabo de forma iterativa para todos los puntos que componen el zigzag.

En el caso mostrado en la ilustración 59, la distancia entre el punto más cercano del perímetro (asterisco rojo) y la línea ficticia es igual a la distancia entre cordones. Es decir, el punto se encuentra lejos de la línea, y el reposicionamiento requerido implica acercarse excesivamente a los puntos del perímetro de la izquierda.

Tras el primer ajuste, identificando el nuevo punto de referencia del perímetro (asterisco rosa) y dibujando el círculo que representa la distancia de separación, se puede observar el fenómeno mencionado. El cambio de posición no es válido, pero

ahora, el punto del perímetro con el que se va a calcular la distancia se encuentra más cerca de la línea del segmento recto y, por lo tanto, realizando el segundo ajuste, se logra un reposicionamiento longitudinal eficiente.

Ajuste transversal

Ha quedado demostrada la capacidad del zigzag de ser adaptado a la geometría del contorno de la superficie en dirección longitudinal. Sin embargo, el reposicionamiento de los tramos de giro queda restringido por el único movimiento permitido a lo largo de las rectas paralelas. En efecto, un movimiento en cualquier otra dirección implicaría la distorsión de la distancia entre los cordones de deposición.

El ajuste transversal va dirigido a la adaptación de la trayectoria en el inicio y final de la trayectoria de cada capa, donde generalmente existe una separación excesiva entre los movimientos del zigzag y los del perímetro.

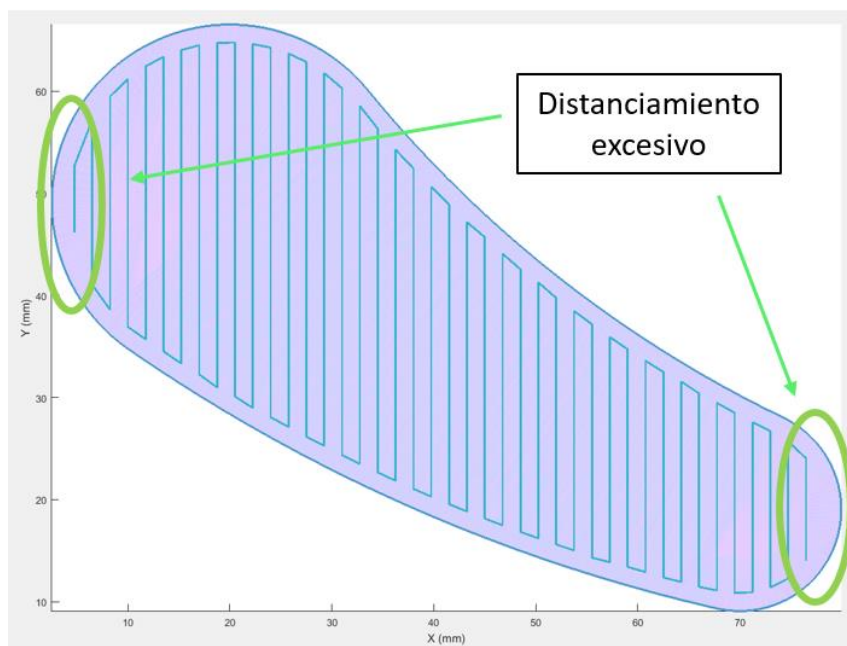


Ilustración 60: Representación de las separaciones entre la trayectoria del zigzag y la del perímetro en los tramos de inicio y fin.

Se ha desarrollado un algoritmo destinado a modificar la trayectoria del zigzag, de forma que se adapte a la geometría del contorno y se obtenga una separación constante igual a la distancia entre cordones requerida. Para optimizar la adaptación, se han considerado varios casos diferentes en función de la distancia entre el tramo del zigzag y la trayectoria del contorno próxima al tramo, realizando una solución diferente para cada caso.

Por lo tanto, el primer paso consiste en calcular la distancia entre el punto medio de dicho tramo y el punto más cercano del perímetro, que aproximadamente es el punto

de intersección entre el perímetro y una recta perpendicular al tramo desde dicho punto medio. En función de la distancia calculada se va a llevar a cabo una solución adecuada a cada caso:

- **Distancia calculada > 1.5 * distancia entre cordones:**

Si la distancia calculada supera en un 50% a la distancia entre cordones establecida (a), se procede con la adición de un tramo adaptado a la geometría del perímetro. Esta nueva curva es establecida con una separación constante sobre el contorno igual a la distancia entre cordones.

El procedimiento para crear la curva es derivado del método utilizado en el ajuste longitudinal. Se crea una secuencia de puntos sobre el tramo del zigzag (b), que servirán para describir la curva de ajuste. Cada uno de los puntos es reposicionado en dirección perpendicular a las rectas del zigzag hasta establecerse a la distancia indicada de la trayectoria del perímetro (c). Para poder realizar un adecuado reposicionamiento se emplea el método mencionado en el apartado anterior, y que consiste en un doble ajuste consecutivo.

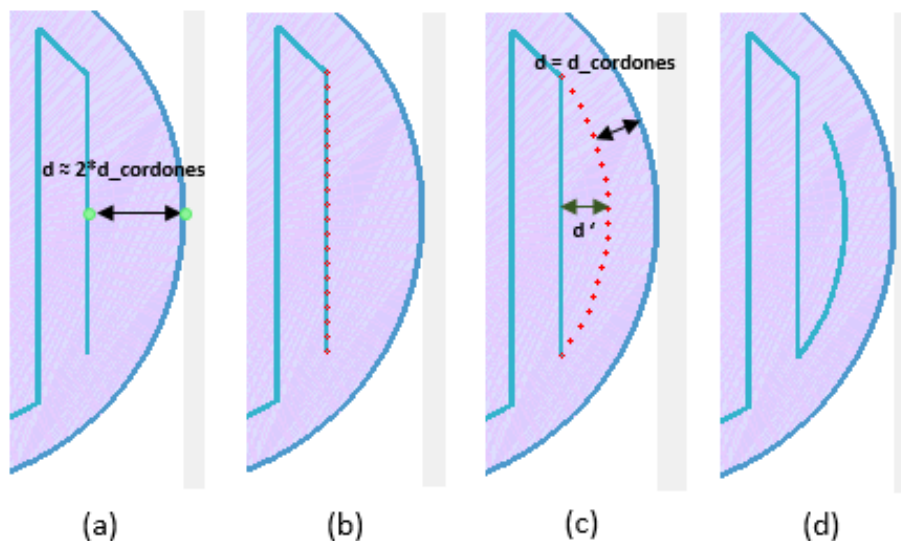


Ilustración 61: Ajuste transversal del zigzag para el caso en el que el margen entre trayectorias super en un 50% la distancia entre cordones.

El hecho de adaptar la curva al perímetro a la distancia entre cordones implica un mayor acercamiento al último tramo del zigzag. El valor de la distancia calculada en este caso se mantendrá dentro del rango $(1,5 \div 2) * distancia\ entre\ cordones$, siendo el límite inferior el caso crítico. En estas condiciones, la separación entre la curva generada y el tramo del zigzag (cota d') tendrá un valor máximo igual al 50% de la distancia entre cordones.

Por último, la secuencia de puntos generada se incorpora a la trayectoria del zigzag

dejando un margen en el extremo respecto al movimiento de este último (d).

- **Distancia calculada < 1.2 * distancia entre cordones:**

El segundo caso se considera cuando la distancia calculada es menor que un 20% más sobre la distancia entre cordones (a). En estas condiciones, la adición de una nueva curva supone un excesivo acercamiento entre las deposiciones, ya que, si se generara con el método anterior, en la que la curva se mantiene a la distancia entre cordones sobre el perímetro, existiría una distancia máxima entre curva y zigzag de $0,2 * distancia\ entre\ cordones$.

La solución tomada se basa en la supresión del último tramo del zigzag (b), es decir, los últimos 2 puntos que lo definen, y la sustitución por una curva de ajuste idéntica a la presentada en el método anterior.

Si antes de eliminar el tramo, se contemplaban distancias en el rango $(1 \div 1,2) * distancia\ entre\ cordones$, tras realizar este paso se obtendrán valores entre $(2 \div 2,2) * distancia\ entre\ cordones$. De esta manera, en el peor de los casos (factor 2,2), estableciendo la curva de igual forma que en el primer caso, se obtiene una separación máxima entre curva y zigzag (cota d') de $1,2 * distancia\ entre\ cordones$, cuya distancia se ha considerado admisible.

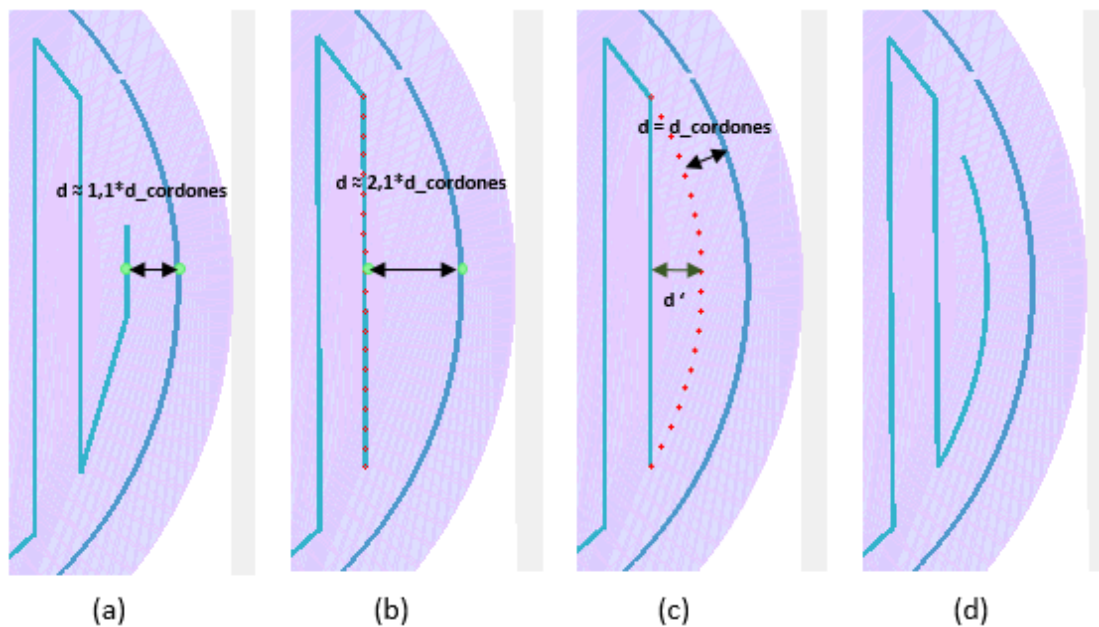


Ilustración 62: Ajuste transversal del zigzag para el caso en el que el margen entre trayectorias es inferior al 120% de la distancia entre cordones.

Existe una variante de este caso, en la que el tramo final del zigzag es un único punto en vez de una recta paralela. Se repite el procedimiento explicado suprimiendo dicho punto, o lo que es lo mismo, la diagonal del extremo del zigzag, y se genera la curva de

ajuste a partir del último tramo paralelo del movimiento.

- **1.2 * distancia entre cordones < distancia calculada < 1.5 * distancia entre cordones:**

Se ha considerado innecesaria la adición de una curva de ajuste en los casos intermedios, donde en la peor de las situaciones existiría una distancia máxima un 50% mayor que la distancia entre cordones.

Sin embargo, la separación que obtiene el extremo del zigzag respecto al resto de movimientos puede ocasionar una zona con menos material del necesario, pudiendo producir huecos en la superficie (a). Se ha optado por resolver este desperfecto prolongando la trayectoria del zigzag con un nuevo punto que produce una recta prácticamente paralela al contorno (b).

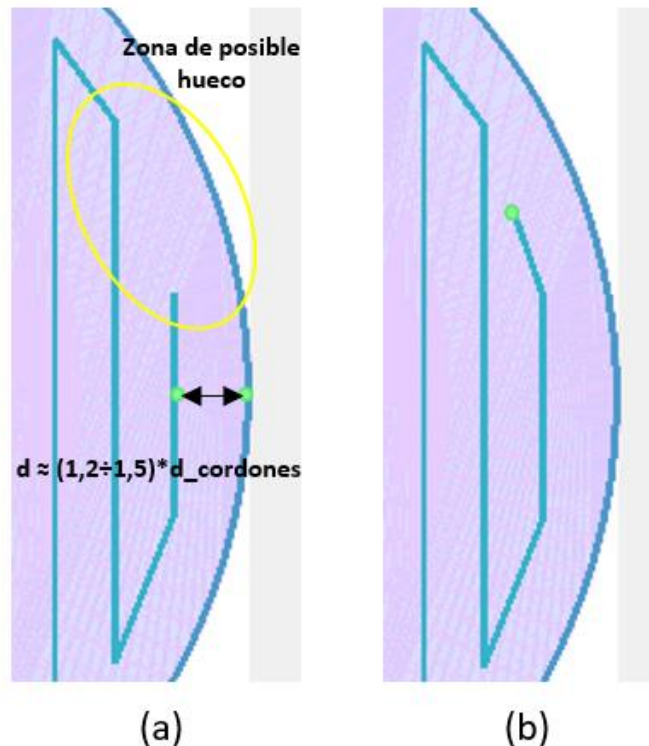


Ilustración 63: Ajuste transversal del zigzag para el caso intermedio en el que la distancia calculada está entre $(1,2 \div 1,5) * distancia entre cordones$.

Mediante la metodología expuesta se lleva a cabo la generación de la estrategia de zigzag y la posterior optimización, que permiten producir una trayectoria adaptada a la superficie con el fin de fabricar el interior del modelo de forma eficiente.

Unificación de ambas trayectorias (perímetro y zigzag)

En este punto, ya se han generado las trayectorias del perímetro y del zigzag en el interior de forma independiente. Sin embargo, el proceso de fabricación consiste en la

deposición de material capa por capa, sirviendo la anterior como base de la siguiente. De modo que se deben intercalar ambas trayectorias en una única, para generar cada capa completamente antes de pasar a la siguiente. El objetivo es lograr la trayectoria que debe seguir el cabezal de aporte de material para completar cada una de las capas de las que se compone la pieza final.

En este trabajo se ha planteado realizar por cada capa, primero el perímetro y a continuación la deposición del interior, uniendo el último punto del perímetro con el extremo inicial del zigzag. Se ha optado por esta estrategia, y no al contrario, para que la deposición del contorno sirva de contención de la deposición del interior. Por otra parte, la construcción de la capa se basa en el solape producido entre cordones consecutivos, logrando una superficie uniforme. Sin embargo, la trayectoria del perímetro solamente puede beneficiarse del solape por su lado interior, adquirido de los extremos del zigzag. El resultado es un crecimiento inferior en la periferia de la pieza, que puede verse resuelto aumentando el número de trayectorias del perímetro. Los diferentes parámetros empleados en el proceso de fabricación y la geometría del modelo afectan a la evolución de la construcción y a la desviación del crecimiento, complicando el cálculo de la cantidad de trayectorias del perímetro necesaria.

Por lo tanto, aunque se contemple la posibilidad de añadir movimientos de deposición a lo largo del contorno cada un número determinado de capas, que habría que calcular de forma experimental y variaría según las especificaciones de la fabricación, en este trabajo se va a considerar una sola trayectoria del perímetro por cada capa.

La trayectoria creada en cada una de las capas determina una superficie compuesta por la trayectoria del perímetro, la del zigzag, las uniones entre estas dos y los saltos de posición entre las distintas áreas en el zigzag. En el caso de que estas dos últimas uniones puedan producirse entre dos puntos próximos, dicho movimiento podría convertirse en un tramo de deposición.

El resultado obtenido en este apartado debe ser, por una parte, la secuencia de puntos mediante sus coordenadas espaciales en el orden adecuado que completan la trayectoria y, por otra parte, es necesario especificar los tramos en los que el láser debe estar encendido y se deposita material y los tramos en los que el cabezal únicamente es reposicionado. Tras unir las trayectorias en una sola, e identificando los tramos de reposición, el resultado queda de esta manera para una pared curvada.

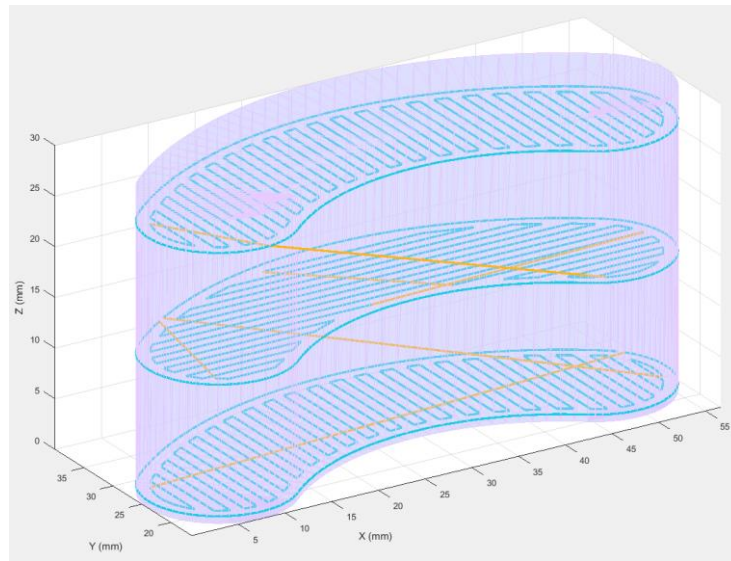


Ilustración 64: Vista 3D de una pared curvada con la trayectoria de 3 capas consecutivas.

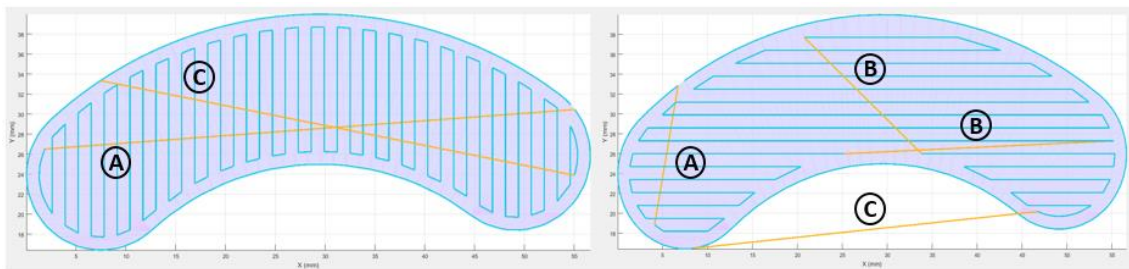


Ilustración 65: Vista de planta de dos capas consecutivas.

En las ilustraciones 64 y 65 se muestra la trayectoria completa que debe imitar el cabezal para producir la pieza. Cabe destacar que la distancia entre capas de la imagen se ha establecido con el fin de hacer visibles las diferentes capas y no se corresponde con los valores reales. La trayectoria se divide en la estrategia de deposición del perímetro y el zigzag (azul) y los movimientos de reposición sin deposición (naranja). Se han identificado y representado 3 clases de reposicionamiento:

- Unión entre perímetro y zigzag (A)

Este tipo de interrupción sucede entre puntos de una misma capa y es la unión entre las trayectorias del perímetro y el zigzag por cada una de las capas. El haber determinado el comienzo de la trayectoria del perímetro de forma aleatoria, hace que difícilmente coincida con el inicio de la trayectoria del zigzag, por lo que esta conexión se ha identificado como un salto sin deposición.

- Conexión entre áreas del zigzag (B)

Cuando se precisa la fabricación de piezas tan simples como pueden ser cubos,

cilindros o esferas, es decir, con secciones transversales convexas, la trayectoria generada puede ser completamente continua a lo largo de toda la sección. No es posible cuando no se cumple dicha característica, donde es necesario interrumpir la deposición para reposicionar el cabezal.

En el caso de piezas cóncavas, el uso de la estrategia de zigzag no permite recorrer la superficie por completo sin realizar un salto por lo menos. Por lo tanto, son necesarios varios tramos que conecten las distintas áreas en las que se ha dividido el zigzag. Como se ha comentado previamente, conectando adecuadamente las áreas, es posible reducir el número de reposicionamientos hasta un valor mínimo asociado a la concavidad de cada superficie. Asimismo, dentro de este valor mínimo, es conveniente minimizar la suma de las distancias recorridas en estos tramos.

- **Salto de capa (C)**

Una vez se haya fabricado una capa cualquiera, el paso a la siguiente debe realizarse sin depositar material. Este salto supone un cambio en la cota por la que se mueve la herramienta que debe ser constante durante la deposición de cada una de las capas y la distancia recorrida en dirección vertical concuerda con la altura de capa.

Como consecuencia del orden de deposición establecido entre perímetro y zigzag, este salto es la unión entre el último punto depositado del zigzag y el primero del perímetro de la siguiente capa. Por lo tanto, salvo en casos excepcionales, implica también un desplazamiento horizontal tanto en el eje *X* como en el *Y*.

6.1.3. Crear texto en lenguaje *Rapid*

Una vez generada la trayectoria de deposición, el formato del lenguaje de los datos obtenidos debe ser adaptado para que pueda ser interpretado por el robot y el cabezal. En este trabajo se ha utilizado el sistema *RobotStudio* de la compañía ABB para manipular su brazo robot. La trayectoria generada se reproduce a partir de una secuencia de comandos introducidos mediante el lenguaje *Rapid*, que es el lenguaje de programación de *RobotStudio*.

Además de manipular los movimientos del brazo robot, es necesario tener un total control sobre los sistemas relacionados con la fabricación aditiva, como la fuente de energía, la extracción del material metálico o el flujo de gas inerte. El software de ABB permite incorporar y manipular herramientas externas a través de él, por lo que se deben crear varios comandos para controlar estos sistemas externos.

Por el momento, la trayectoria generada está compuesta por 3 tipos de datos: las coordenadas de los puntos que componen la trayectoria, la orientación del cabezal en

cada punto, y un vector lógico que indica la situación de la fuente de energía, es decir, apagada o encendida. El siguiente algoritmo genera un archivo de texto con los comandos a partir de estos datos como se va a ver a continuación. Cabe destacar que existen diferencias entre los comandos necesarios y el modo de dar las ordenes según el material con el que se va a trabajar (hilo o polvo) o el número de ejes de movimiento.

Todo proceso requiere la definición de un sistema de coordenadas denominado *Work Object* que sirve de referencia de los puntos de la pieza que se va a fabricar, por lo que el usuario podrá definirlo al comienzo del proceso para elegir la posición de la zona de trabajo. Del mismo modo, se debe indicar la herramienta montada en el extremo del brazo junto con la información que la concierne: La relación entre el sistema de coordenadas del extremo de la máquina y el correspondiente al TCP, el centro de gravedad o el peso de la herramienta principalmente.

También son requeridos 2 parámetros básicos en un proceso de fabricación: la velocidad y la precisión del movimiento. Ambos parámetros son previamente definidos y adaptados a las solicitudes del proceso. Por un lado, se han empleado dos velocidades diferentes para los movimientos de deposición y para los movimientos de solo translación sin deposición. Por el otro lado, el software de ABB dispone de varios niveles de precisión con la que la herramienta se acerca a las coordenadas indicadas. Se ha empleado un factor ligeramente menos preciso que llega a permitir un movimiento continuo entre los puntos de una trayectoria de deposición y un factor totalmente preciso (dentro del error del propio brazo robot) para definir de una manera más exacta los comienzos y finales de cada tramo.

En cuanto a los procesos que emplean movimiento en 3 ejes, tanto de hilo como de polvo, se añade la definición de un punto inicial referido al *Work Object*, sobre el que se definen todos los puntos de la trayectoria mediante *offsets*. Es decir, cada punto se define mediante sumas o restas de valores sobre las coordenadas x , y y z del punto inicial predefinido. La razón por la que se utiliza este método es la comodidad y rapidez con la que se define dicho punto, en comparación con la definición del *Work Object*.

Los procesos que además disponen de la capacidad de orientación del cabezal deben estar referenciados al *Work Object*, por lo que, al no emplear un punto inicial, el dato de entrada con las posiciones de la trayectoria consiste en una secuencia de coordenadas x , y y z . Igualmente, a cada punto se le es asignada una orientación del cabezal mediante cuaterniones en el siguiente orden: $[w, x, y, z]$. En este caso, en el que la trayectoria del interior, es decir, el zigzag, se va a producir con la orientación vertical constante del cabezal, y siendo la relación entre el *Work Object* y el sistema de

referencia del TCP un giro de 90 grados sobre el eje Y, el cuaternion asignado a estos puntos es [0, 0, 1, 0].

El movimiento en 5 ejes debe describirse con la adición de un parámetro que establece la configuración del brazo robot con la que debe moverse, con el fin de no producir grandes giros sobre sus ejes motores que implicarían discontinuidades en la deposición. Además, dispone de la posibilidad de controlar un eje exterior adicional, que podría ser una mesa rotatoria, pero que no se va a utilizar en la realización de este trabajo.

Por otro lado, deben definirse las instrucciones para los dispositivos externos de la fabricación aditiva. Para el material en polvo, tanto con 3 como con 5 ejes, la extracción del material y del gas inerte no son interrumpidos durante los reposicionamientos del cabezal, por lo que se realiza el encendido antes de empezar con el movimiento y se apagan al acabar el proceso completo. En cuanto a la fuente de energía, el haz láser, se introducen los comandos de encendido y apagado para cada tramo, generando un movimiento de reposición y un tiempo de espera estática definido mediante otro comando, con el láser apagado.

Al contrario, en el caso del hilo, tanto la fuente de energía como el alimentador de material deben ser detenidos durante las interrupciones, por lo que se generan los comandos necesarios para indicar dichas instrucciones en cada reposicionamiento.

Los archivos de texto obtenidos resultan de la siguiente manera:

- Texto para polvo y movimiento en 3 ejes:

```

1 MoveL Offs(Pinicial,off_x+59.6502,off_y+36.3864,off_z+0.4000), speed_aire, fine, t_cursoDic\WObj:=temple;
2 Haz_ON; → Encendido láser
3 MoveL Offs(Pinicial,off_x+60.7964,off_y+35.6326,off_z+0.4000), speed_prueba, z0, t_cursoDic\WObj:=temple;
4
5 MoveL Offs(Pinicial,off_x+61.9177,off_y+34.9028,off_z+0.4000), speed_prueba, z0, t_cursoDic\WObj:=temple;
  
```

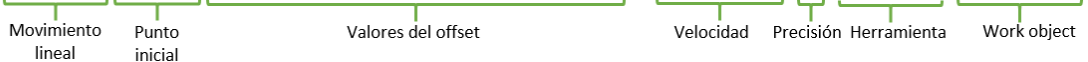


Ilustración 66: Texto del comienzo del movimiento para 3 ejes y polvo.

```

415 MoveL Offs(Pinicial,off_x+59.6266,off_y+36.4023,off_z+0.4000), speed_prueba, fine, t_cursoDic\WObj:=temple;
416 Haz_OFF;WaitTime 1.2; → Apagado láser y tiempo de espera
417 MoveL Offs(Pinicial,off_x+5.6250,off_y+43.5913,off_z+0.4000), speed_aire, fine, t_cursoDic\WObj:=temple;
418 Haz_ON;
419 MoveL Offs(Pinicial,off_x+4.7500,off_y+46.1282,off_z+0.4000), speed_prueba, z0, t_cursoDic\WObj:=temple;
  
```

Ilustración 67: Texto de una interrupción de la deposición para 3 ejes y polvo.

- Texto para polvo y movimiento en 5 ejes:


```

1 MoveL [[59.6502,36.3864,0.4000],[-0.0343327,0.0017798,0.9980680,0.0517530],[-1,0,0,2],[0.000,9e+09,9e+09,9e+09,9e+09]],v20,fine,t_cursoDic\WObj:=temple;
2 Haz_ON;
3 MoveL [[60.7964,35.6326,0.4000],[-0.0340516,0.0017715,0.9980681,0.0519375],[-1,0,0,2],[0.000,9e+09,9e+09,9e+09,9e+09]],v20,z0,t_cursoDic\WObj:=temple;
4
5 MoveL [[61.9177,34.9028,0.4000],[-0.0338570,0.0017657,0.9980681,0.0520640],[-1,0,0,2],[0.000,9e+09,9e+09,9e+09,9e+09]],v20,z0,t_cursoDic\WObj:=temple;
  
```

Coordenadas
Orientación cuateriones
Configuración
Ejes adicionales

Ilustración 68: Texto del comienzo del movimiento para 5 ejes y polvo.

```

617 MoveL [[77.4498,22.4552,0.4000],[0.0000000,0.0000000,1.0000000,0.0000000],[-1,0,0,2],[0.000,9e+09,9e+09,9e+09,9e+09]],v20,fine,t_cursoDic\WObj:=temple;
618 Haz_OFF;WaitTime 1.2;
619 MoveL [[73.4039,10.7732,8.4000],[0.0180419,0.0010750,0.9980662,-0.0594741],[-1,0,0,2],[0.000,9e+09,9e+09,9e+09,9e+09]],v20,fine,t_cursoDic\WObj:=temple;
620 Haz_ON;
621 MoveL [[73.7163,10.8980,8.4000],[0.0183113,0.0010895,0.9980662,-0.0593924],[-1,0,0,2],[0.000,9e+09,9e+09,9e+09,9e+09]],v20,z0,t_cursoDic\WObj:=temple;
  
```

Ilustración 69: Texto de una interrupción de la deposición para 5 ejes y polvo.

- Texto para hilo y movimiento en 3 ejes:

```

1 MoveL Offs(Pinicial,off_x+59.6502,off_y+36.3864,off_z+0.4000), speed_aire, fine,t_COAXwire\WObj:=w_frametrabajo;
2 WaitDI LaserON,high;Set SolicitudDevHilo;WaitTime waiting1;Set SolicitudLaser;WaitTime waiting2;
3 MoveL Offs(Pinicial,off_x+60.7964,off_y+35.6326,off_z+0.4000), speed_prueba, z0,t_COAXwire\WObj:=w_frametrabajo;
4
5 MoveL Offs(Pinicial,off_x+61.9177,off_y+34.9028,off_z+0.4000), speed_prueba, z0,t_COAXwire\WObj:=w_frametrabajo;
  
```

Ilustración 70: Texto del comienzo del movimiento para 3 ejes e hilo.

```

415 TriggL Offs(Pinicial,off_x+59.6266,off_y+36.4023,off_z+0.4000), speed_prueba, TimeHilo_OFF, fine,t_COAXwire\WObj:=w_frametrabajo;
416 Reset SolicitudLaser;WaitTime t_capas;
417 MoveL Offs(Pinicial,off_x+5.6250,off_y+43.5913,off_z+0.4000), speed_aire, fine,t_COAXwire\WObj:=w_frametrabajo;
418 WaitDI LaserON,high;Set SolicitudDevHilo;WaitTime waiting1;Set SolicitudLaser;WaitTime waiting2;
419 MoveL Offs(Pinicial,off_x+4.7500,off_y+46.1282,off_z+0.4000), speed_prueba, z0,t_COAXwire\WObj:=w_frametrabajo;
  
```

Control alimentador hilo

Ilustración 71: Texto de una interrupción de la deposición para 3 ejes e hilo.

6.2. Fabricación de piezas huecas

A continuación, se lleva a cabo la presentación del segundo programa generado en Matlab, que está dirigido a la fabricación de piezas huecas, es decir, producidas solamente por trayectorias del perímetro. Por lo tanto, el proceso carece de un rellenado del interior como el del zigzag visto en el anterior apartado.

Bajo estas condiciones, es posible identificar 3 subprogramas con los que se obtienen diferentes soluciones para la construcción de una pieza hueca. Por un lado, empleando la estrategia de 3 ejes, se dispone la posibilidad de producir piezas mediante un número de perímetros escalados determinado por el usuario con el fin de poder variar el grosor de la pared. Por otro lado, la producción de piezas con un solo perímetro, pero con la capacidad de producir paredes inclinadas mediante la inclinación del cabezal. Ambas herramientas mantienen la construcción a partir de la superposición de capas planas y paralelas entre sí. Sin embargo, la tercera herramienta, que surge como actualización de la segunda, posee la capacidad de adaptar las superficies en las que se divide la pieza a las solicitudes de la fabricación, dejando a un lado las capas planas.

Estas 3 herramientas utilizan varias funciones adquiridas del programa previamente presentado. Por un lado, la obtención de los datos, donde se identifican los puntos del perímetro es producida mediante la función que detecta los puntos de intersección entre capas y vértices. Por el otro lado, la generación del archivo texto con los comandos interpretables con el lenguaje Rapid, que es idéntica a la explicada en el anterior apartado. Por este motivo, no se van a exponer dichas funciones, presentando solamente el proceso de generación de trayectoria para cada uno de los casos.

6.2.1. Varios perímetros en 3 ejes

Como ya se ha mencionado, mediante este subprograma se dispone de una herramienta capaz de generar una trayectoria de varios perímetros por cada una de las capas planas mediante un movimiento de 3 ejes (realmente de 2,5 ejes). Se trata de una variante del programa explicado previamente que posibilita la construcción de una pieza a partir de una combinación entre el contorno y un zigzag interior. La gran diferencia reside en la supresión de la estrategia del zigzag y la adición de trayectorias del perímetro complementarias y relacionadas entre sí.

El primer paso consiste en la obtención de los puntos que representan el contorno del modelo 3D mediante capas, con el mismo proceso que en el programa anterior. Del mismo modo, se asigna un vector normal a cada punto, correspondiente a la cara a la que pertenece. Se regula la cantidad de puntos que componen la trayectoria,

insertando puntos con sus vectores en los distanciamientos a la vez que se reduce la cantidad de datos si se considera excesiva.

Hasta este punto, las funciones utilizadas son idénticas a las ya mencionadas, por lo que el punto de partida que se va a tomar es la secuencia de puntos con sus vectores normales que componen la pieza y se puede representar de la siguiente manera:

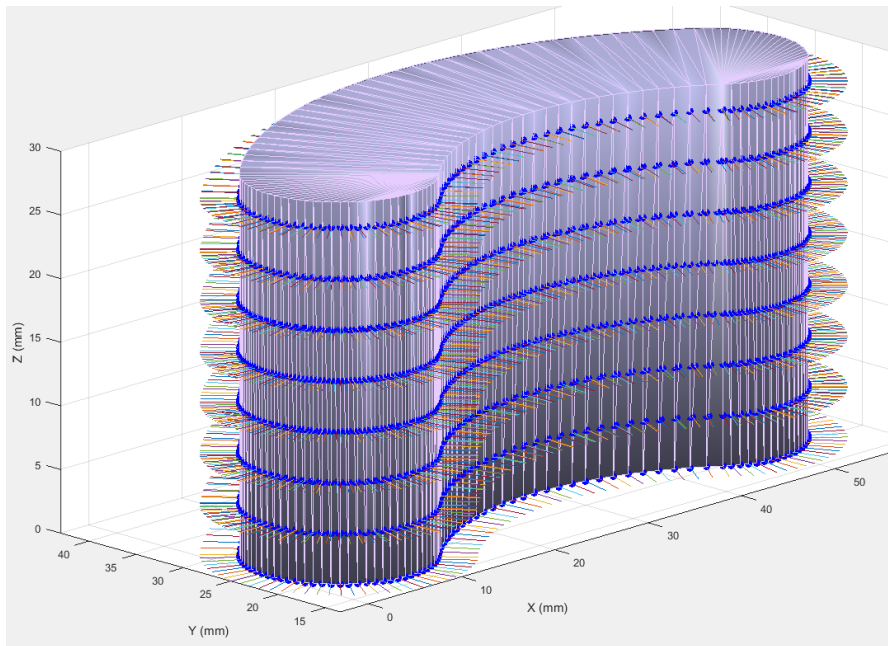


Ilustración 72: Representación de los puntos del perímetro identificados y sus vectores normales.

A partir de las trayectorias del perímetro exterior, se realiza un escalado de cada trayectoria de cada capa. El usuario tiene la posibilidad de definir el número de perímetros que desea producir, la distancia entre ellos y la altura de capa. Para generar las trayectorias de los perímetros interiores se reproduce el perímetro exterior escalándolo hacia el interior a una distancia igual a la distancia entre cordones. El proceso se realiza generando nuevos puntos sobre el inverso del vector normal y ordenándolos para producir un conjunto de curvas cerradas contenidas una dentro de la otra.

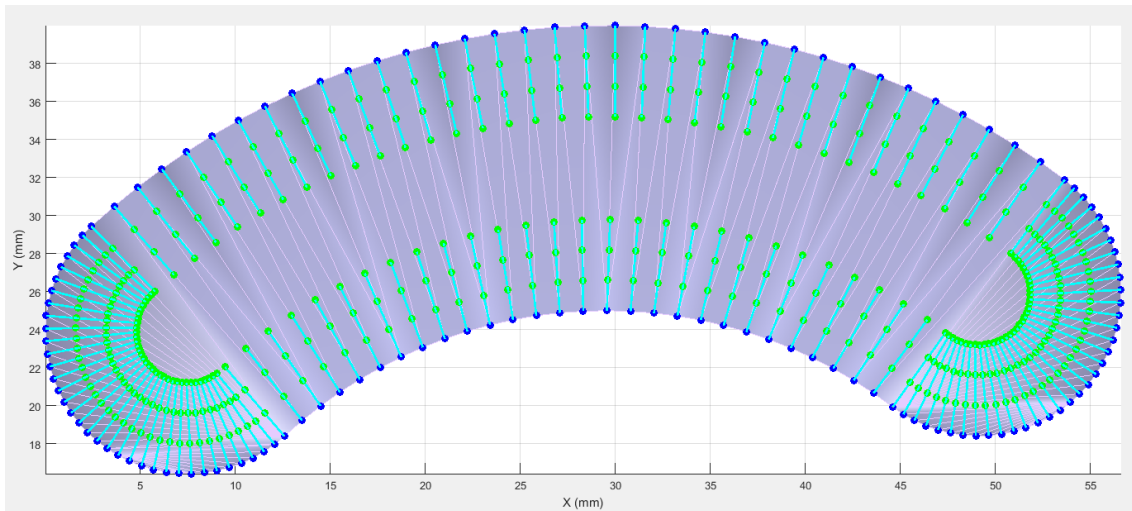


Ilustración 73: Representación de los puntos que componen las trayectorias del perímetro interiores.

Al tratarse de curvas cerradas, la conexión entre los extremos de cada curva es uno de los puntos críticos en la aparición de defectos, pudiendo ocasionar huecos o elevaciones en función de la distancia establecida entre dichos puntos. Se han llevado a cabo dos optimizaciones para reducir el efecto de las posibles irregularidades:

- Mediante la aleatorización de la posición del comienzo de cada curva se evita la aparición de un error acumulativo, tanto entre las curvas de una misma capa, como entre las trayectorias superpuestas a diferentes cotas.
- Por otro lado, se procede con la optimización de la distancia entre el primer y el último punto de cada curva, reduciendo directamente la aparición del defecto. La aproximación del modelo mediante triángulos y la identificación de puntos del perímetro únicamente a partir de los vértices (y aunque se hayan introducido puntos en los distanciamientos), implican una distribución no uniforme de los puntos. Por este motivo, el hecho de seleccionar aleatoriamente el comienzo del trayecto hace que la separación entre los extremos de cada curva también varíe aleatoriamente.

La solución tomada en este trabajo se basa en la adaptación de esta separación, mediante la eliminación de puntos en el caso de que exista una excesiva proximidad o la inserción de puntos con el fin de prolongar la trayectoria. De esta manera, se logra uniformizar la separación existente entre los extremos de cada curva dándole un valor determinado por el usuario. Se ha considerado adecuado un valor en el rango de $0.5 \div 0.8 * \text{distancia entre cordones}$. El resultado queda visible en las siguientes ilustraciones:

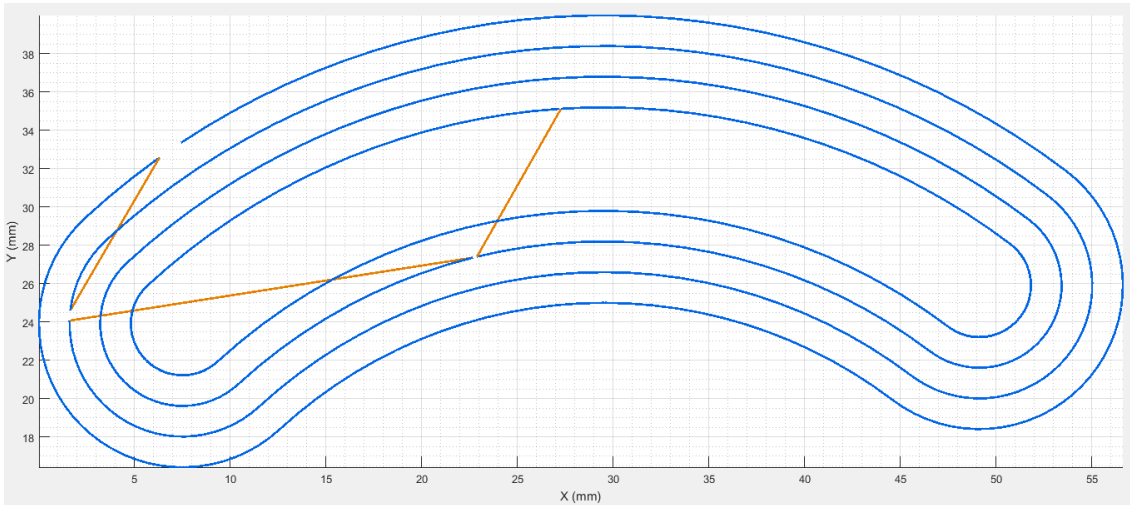


Ilustración 74: 4 perímetros de una misma capa antes de realizar el ajuste de la separación de los extremos.

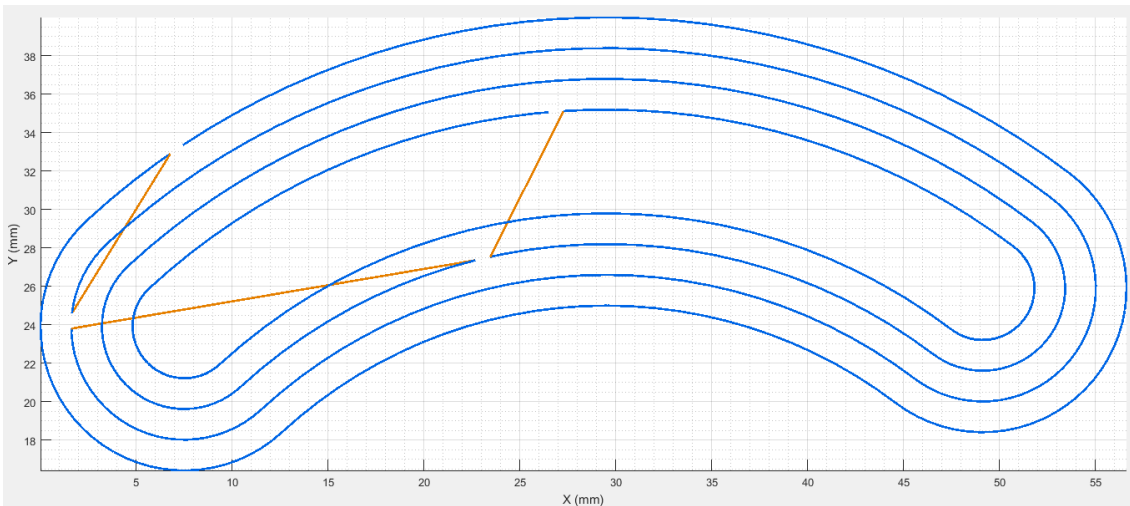


Ilustración 75: 4 perímetros de una misma capa tras realizar el ajuste de la separación de los extremos.

Por último, se ha planteado la posibilidad de alternar el orden de deposición haciendo que la construcción de la capa se pueda realizar de fuera hacia adentro o de dentro hacia afuera. La finalidad de esta función es una posible mejora de la calidad constructiva, pero su verificación queda fuera del alcance de este trabajo, formando parte de una de las líneas de trabajo futuras.

Tras identificar los movimientos de reposicionamiento del cabezal, que se van a dar entre las curvas cerradas de la misma capa y para realizar el cambio de cota, se lleva a cabo la realización del archivo texto adaptado al movimiento de 3 ejes.

6.2.2. Un perímetro en 5 ejes con capas planas

La obtención de una trayectoria que complete un solo perímetro, es decir, una pieza hueca con una pared perimetral delgada, mediante la combinación de la translación y

la orientación del cabezal, no es más que una variante del programa explicado al comienzo de este apartado. El programa del que se obtiene esta herramienta es el que genera una trayectoria híbrida (perímetro + zigzag), donde en el movimiento del perímetro se permite una reorientación continua.

La utilidad de este programa es la de servir como base al programa que se va a explicar en el punto siguiente, a la vez que permitir una comparación de los resultados entre estos dos.

Realmente, la principal función de la deposición del perímetro combinado con una deposición del interior es la de contener el material depositado en el interior y permitir un mayor grado de uniformidad de la capa. La fabricación de piezas huecas mediante el empleo de un único perímetro presenta una mayor dificultad a la hora de mantener una deposición regular y una altura de la pieza fabricada constante.

Por este motivo, se plantea la creación de este programa como base en la que añadir optimizaciones, y no como una herramienta que permita una fabricación efectiva.

6.2.3. Un perímetro en 5 ejes con capas adaptadas

Las dificultades que presentan tanto la fabricación de un perímetro mediante un solo cordón, como el movimiento del cabezal en 5 ejes continuos, a la hora de mantener una deposición constante y efectiva, conducen a replantear las técnicas comunes empleadas en la fabricación aditiva.

Las trayectorias generadas con los programas vistos hasta el momento se basan en la división por capas planas de la pieza, produciendo estrategias o movimientos sobre superficies en 2D. Esta propiedad considera un crecimiento constante y uniforme durante la fabricación de la pieza, por lo que solamente es válida mientras se cumpla dicha condición. Sin embargo, una geometría con un mayor grado de complejidad como una variación en la inclinación a lo largo del contorno, y la proporcional inclinación del cabezal para adaptarse a la geometría, producen irregularidades en el crecimiento que requieren un ajuste en los movimientos establecidos.

De esta manera, la herramienta presentada en este apartado se enfoca en la resolución de este problema para el caso de una pieza hueca fabricada mediante la deposición de un cordón. Como ya se ha comentado, se parte de los algoritmos utilizados en el programa anterior, al que se añaden funcionalidades que se exponen a continuación.

Las primeras funciones o algoritmos del programa, que coinciden con los de los anteriores programas, obtienen por una parte la secuencia de coordenadas de los puntos de los perímetros determinados mediante capas planas. Por la otra parte, a

cada punto se le es asignado un sistema de coordenadas X , Y y Z de la misma forma que se ha visto anteriormente. Siendo el vector Z tangente a la superficie y lo más vertical posible, y con el que debe coincidir el eje de la herramienta una vez tome la posición del punto correspondiente.

Las características de la geometría implican unas solicitudes que impiden la posibilidad de producir la pieza mediante capas planas y sin la reorientación del cabezal. Por una parte, la inclinación de la pared afecta a la variación de su longitud respecto a una pared vertical. Por otra parte, la orientación del cabezal adaptada a la pared influye en la altura vertical de crecimiento del cordón depositado. Por estas dos razones, se requiere una adaptación de las capas en función de las características del material previamente depositado, que se realiza a continuación efectuando una modificación variable y adaptada de la cota de cada uno de los puntos que compone cada perímetro.

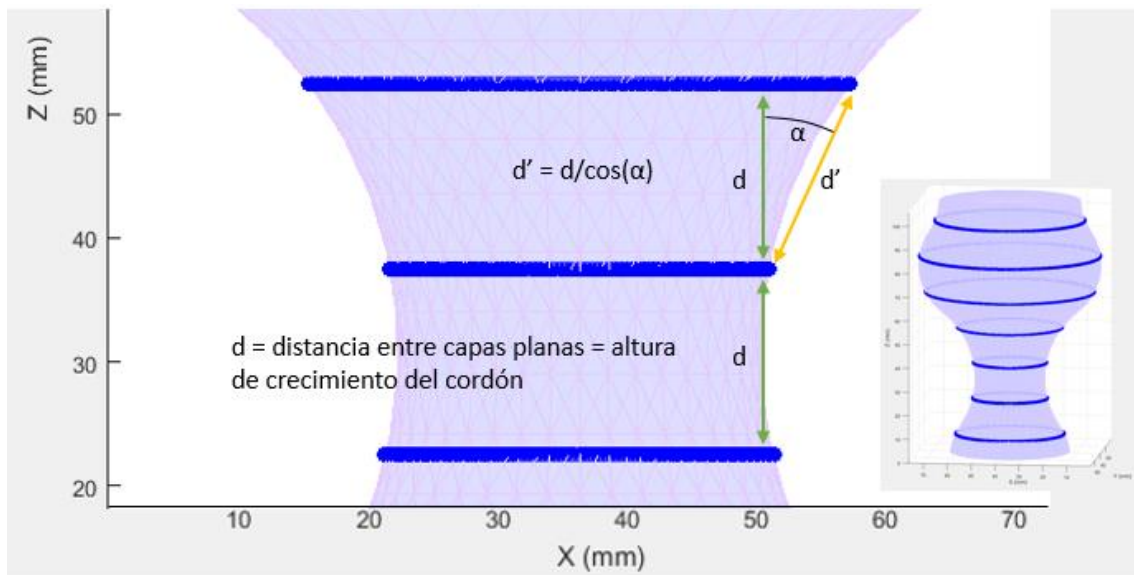


Ilustración 76: Representación de las distancias entre capas planas igualmente distanciadas.

En esta ilustración se puede comprobar la influencia de la inclinación de la pared en la separación entre los puntos de las trayectorias de las capas consecutivas. Un mayor ángulo de inclinación implica una mayor separación, y por lo tanto una insuficiencia en la cantidad del material depositado con las capas planas e igualmente distanciadas.

La solución tomada en este trabajo se basa en el acercamiento de las capas en función de la inclinación o lo que es lo mismo, la separación calculada. El algoritmo generado analiza cada uno de los puntos de todos los perímetros y calcula la distancia al punto más cercano del perímetro de la capa anterior que ya ha sido ajustada. En el caso en que la distancia calculada supere a la distancia entre capas establecida, que es

previamente determinada y es igual a la altura del cordón depositado, se realiza un acercamiento del punto analizado a lo largo de la recta generada entre dicho punto y el punto más cercano hasta ubicarlo a la distancia entre capas sobre este último.

Las características del proceso de fabricación por polvo metálico hacen que la distancia entre capas establecida sea de 0,1 a 0,2 mm, que es la altura de crecimiento del cordón depositado para el caso de un solo perímetro. Esta cercanía implica una gran similitud entre los sistemas de coordenadas de los dos puntos utilizados en el ajuste, por lo tanto, el sistema de coordenadas asignado al punto acercado consiste en una media entre los de ambos, en lugar de un ajuste dependiente de la distancia desplazada.

Esta parte del proceso se limita a los mencionados aspectos de la modificación siempre y cuando la coordenada z de la nueva posición sea mayor que la coordenada z del punto más cercano seleccionado. En caso contrario, el reposicionamiento del punto se encuentra por debajo de la anterior capa sin ajustar, como se puede ver en la siguiente ilustración.

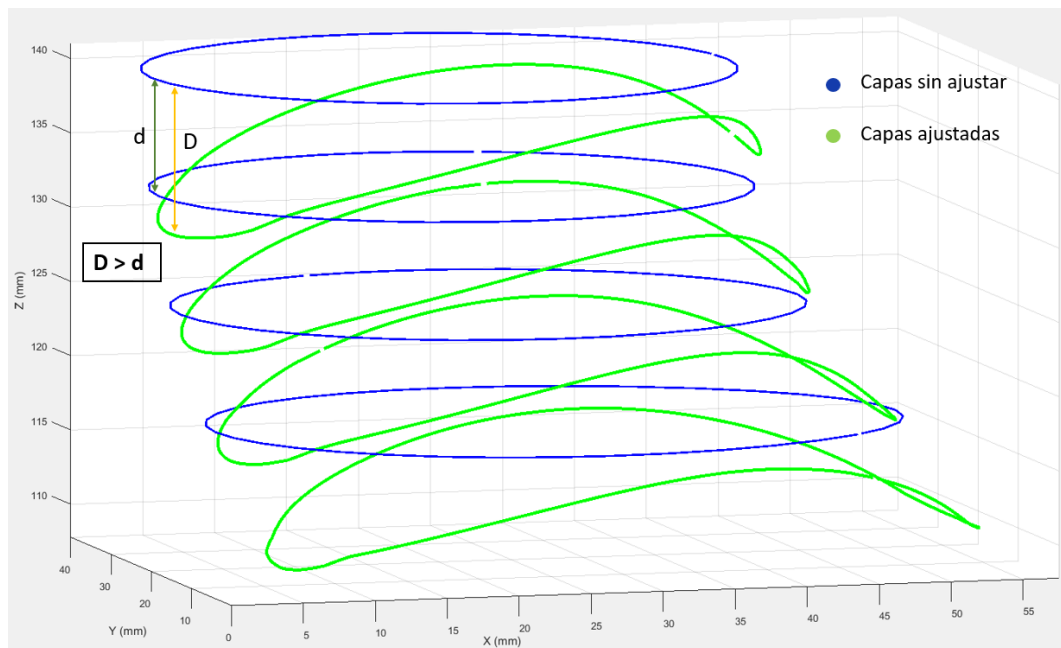


Ilustración 77: Representación de las capas antes de ser ajustadas (azul) y las capas ajustadas (verde).

Este fenómeno ocurre debido a una acumulación de ajustes en la que exista una gran variación de la inclinación a lo largo de la geometría, por lo que, generalmente, es más distinguido en las zonas superiores de la pieza.

En estos casos, para optimizar la adaptación de las capas, se procede a modificar tanto la recta en la que se ubica la nueva posición como los puntos con los que se determina el nuevo sistema de coordenadas. Para entender mejor el proceso, se expone la

siguiente ilustración.

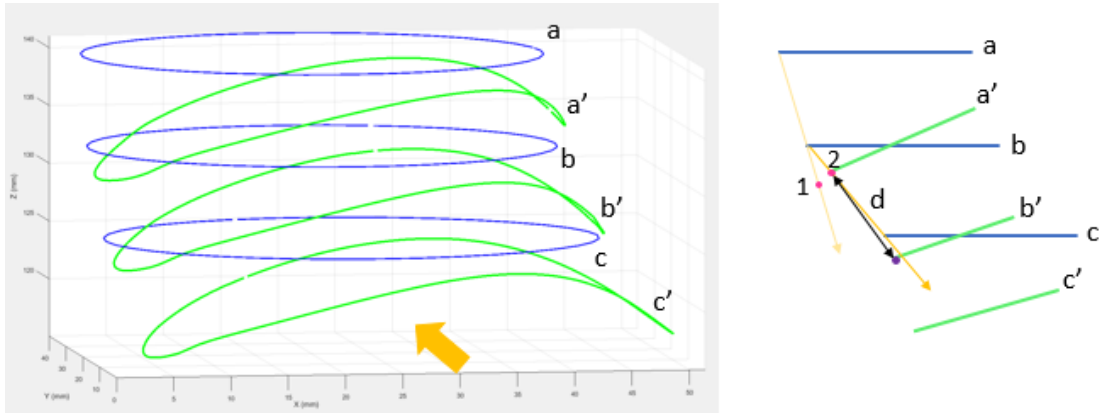


Ilustración 78: Representación esquemática del ajuste de un punto de una capa.

Suponiendo que se desea calcular la adaptación de la capa a , el punto de referencia con el que reposicionarse a una distancia igual a la altura de capa pertenece a la curva b' . Al calcular la nueva posición (punto 1), la coordenada Z es inferior a la cota de b . Si no se realizase esta optimización, la recta se crea a partir de los puntos de a y b , y cabe la posibilidad de colocar el punto excesivamente lejos del contorno de la pieza, tanto hacia el exterior como al interior. Se modifica la recta sobre la que se posiciona el punto, calculándola a partir de puntos de las capas sin ajustar entre las que se ubica, es decir, entre puntos de b y c . La nueva posición (punto 2), se encuentra a la distancia especificada ($d =$ altura de capa) de la capa ajustada anterior (b') y contenida aproximadamente en el contorno del modelo.

Del mismo modo, el sistema de coordenadas que hubiera sido calculado a partir de los sistemas de los puntos de a y b' , mediante esta optimización, es calculado a partir de b y b' , consiguiendo un sistema de coordenadas más apropiado a la nueva posición.

Cabe destacar que el proceso volvería a realizarse en el caso en que la nueva posición estuviera por debajo de la capa precedente a la capa anterior de la que está siendo adaptada. Como ejemplo, tomando el caso de la ilustración 71, el punto 2 debería ubicarse por debajo de la capa c para repetir el procedimiento con los puntos de referencia correspondientes.

Un caso particular es el visto en la ilustración 76, donde la inclinación es constante a lo largo del contorno para cada una de las cotas, se requiere un ajuste idéntico para todos los puntos que componen cada una de las curvas cerradas. Por lo tanto, aunque se deba modificar la posición de los puntos de los perímetros, se mantiene una coordenada z constante a lo largo de cada curva, es decir, una división en capas planas (cordón rojo en la ilustración 79)

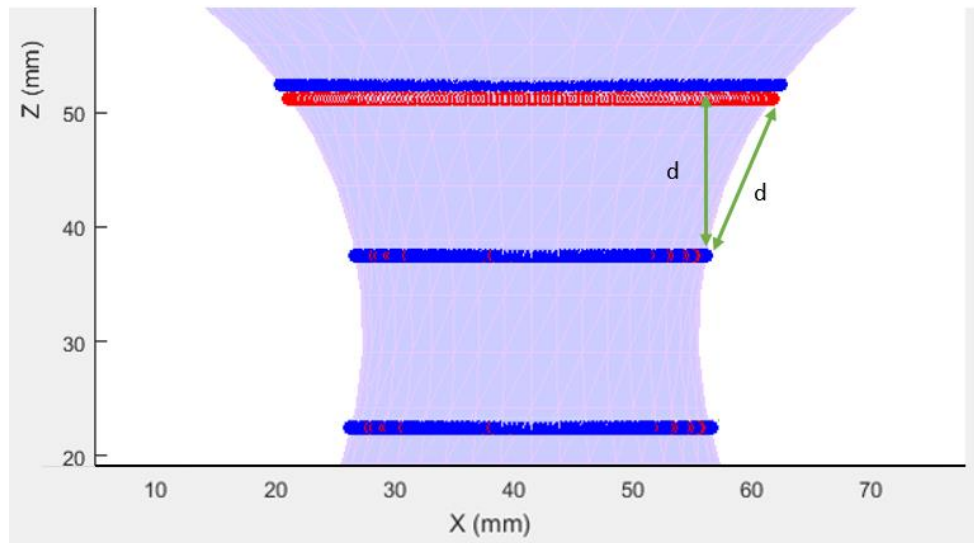


Ilustración 79: Representación de las distancias entre los perímetros tras ser adaptados.

La verdadera funcionalidad de este programa queda visible en modelos donde la inclinación varíe a lo largo del contorno a una misma altura, haciendo falta un ajuste adaptado según las solicitudes que encuentra cada punto del perímetro.

Una vez se han recolocado los puntos de las capas planas originales, y se ha obtenido un conjunto de curvas cerradas adaptadas a las características de la geometría y a los requerimientos de la deposición que representan el perímetro de la pieza, se procede con la optimización de dichas curvas.

El primer paso consiste en calcular una aproximación de la curva, eliminando las posibles variaciones entre los puntos consecutivos que completan la trayectoria. La posición de cada punto es recalculada mediante una media de las posiciones de una cantidad de puntos especificada por el usuario que lo rodean en ambos sentidos. El proceso es reiterado para todos los puntos que componen la trayectoria, reduciendo el error entre las coordenadas de los puntos y la aproximada de la curva, logrando un movimiento continuo y fluido.

Por otro lado, la adaptación de la capa implica la creación de una trayectoria continua que varía a lo largo de la coordenada z. Cuanto más se acentúe este fenómeno, mayor será la elongación de la curva respecto a la de la capa original. Por este motivo, y con el fin de mantener la capacidad de aproximación de una curva mediante puntos, se procede a insertar puntos en los tramos donde se den excesivos distanciamientos, que coincide con los tramos en los que se dé una mayor variación de la coordenada z.

Por último, la adaptación de cada capa implica un mínimo descenso de la trayectoria sobre el eje Z global, por lo que, la acumulación de las adaptaciones conlleva la

necesidad de incorporar más curvas de deposición en la parte superior del modelo. La incoherencia geométrica entre la última capa ajustada y la superficie superior de la pieza genera la necesidad de completar el modelo mediante curvas abiertas.

Las nuevas curvas incorporadas son generadas a partir de la última capa sin ajustar y la última curva ajustada mediante el mismo método utilizado en la adaptación de las capas. Del mismo modo, las coordenadas de los nuevos puntos son aproximadas para optimizar el movimiento y los sistemas de coordenadas de cada punto son determinados en función de su posición en el modelo a partir de los sistemas de coordenadas previamente asignados a las capas sin ajustar.

Mediante la ejecución de estos algoritmos, el resultado es el siguiente, donde las trayectorias azules son las capas originales adaptadas, y las verdes son las últimas incorporadas para completar la pieza.

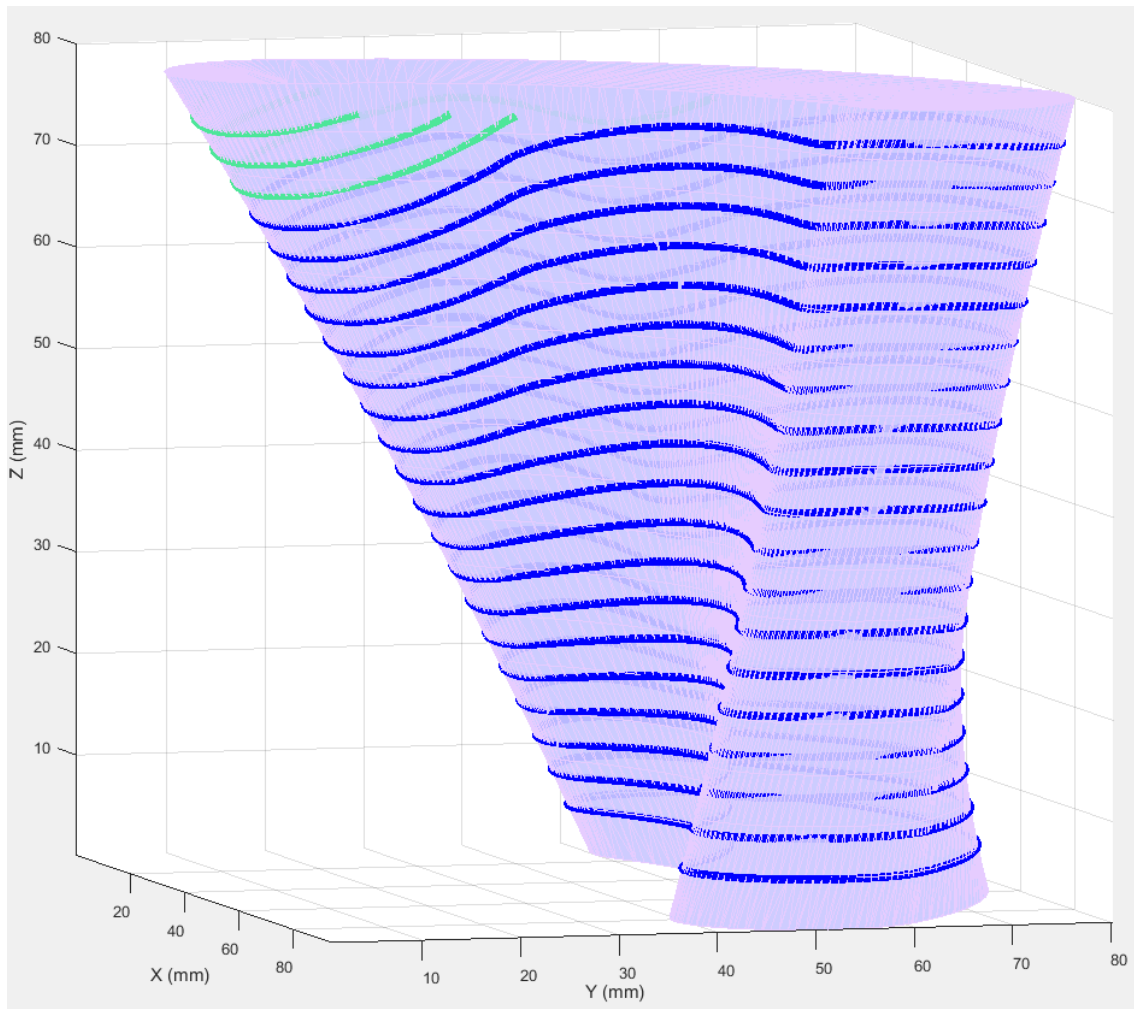


Ilustración 80: Representación de la trayectoria perimetral para fabricación mediante 5 ejes.

Como se ha comentado anteriormente, la distancia entre capas establecida para

permitir una construcción eficaz con el proceso de fabricación aditiva empleado en este trabajo debe ser de entre 0,1 y 0,2mm. Un modelo 3D de entre 3 y 10 cm de altura aproximadamente (que son los que se han planteado), empleando dicha altura entre capas, requiere tal cantidad de puntos que la manipulación de todos ellos en el procedimiento mencionado lleva al software Matlab a necesitar tiempos de ejecución inviables para este trabajo.

Por este motivo, la solución tomada consiste en una primera ejecución del proceso con una altura de capa superior a la requerida, con la que la cantidad de datos manipulada es significativamente inferior. Para generar todas las trayectorias necesarias, se realiza una interpolación entre cada pareja de curvas consecutivas. La interpolación concierne tanto a las coordenadas de los puntos, como a los sistemas de orientación. De este modo, se consigue una generación de trayectorias adaptada a la geometría de una forma más rápida. El error que se puede producir al no generar los puntos exactamente contenidos en el contorno, que se incrementa cuanto mayor sea la curvatura entre las curvas consecutivas, se ha considerado despreciable. Esto se debe a la irrelevante separación entre el plano entre dichas curvas y el contorno real cuando se emplea una altura de capa eventual relativamente pequeña, como 1.6mm.

Una vez generada la secuencia de puntos que completan las curvas que consuman la trayectoria y sus correspondientes sistemas de coordenadas, se procede a generar el archivo de texto anteriormente explicado para el caso del movimiento en 5 ejes.

7. RESULTADOS Y VALIDACIÓN

En este apartado se describen los resultados obtenidos mediante la metodología mencionada y los diferentes programas generados. Como ya se ha comentado, el principal objetivo de este trabajo es la obtención de una herramienta que permita la generación semi-automática de las trayectorias para fabricación aditiva de componentes metálicos.

Los resultados del programa son visibles a partir de la representación de los movimientos que debe seguir el cabezal de deposición, pero también se han llegado a realizar pruebas reales en las instalaciones de IK4-TEKNIKER. Para verificar la funcionalidad del trabajo, se han empleado dos tipos de procesos dentro de la tecnología LMD de fabricación aditiva: la deposición directa de hilo metálico, por una parte, y la de polvo metálico por otra.

La validación de las trayectorias generadas se ha basado en la visualización de éstas y la comprobación del cumplimiento de los parámetros introducidos, como la distancia entre cordones y la altura de capa. De este modo, la representación de las trayectorias permite conocer las posiciones que tomará el cabezal a lo largo del proceso de fabricación, al igual que la visualización de los vectores Z calculados en cada punto ilustran la orientación de la herramienta.

Por lo tanto, la validación de los resultados obtenidos se limita a la inspección de las representaciones obtenidas, quedando la validación exhaustiva de las piezas fabricadas para trabajos futuros. Realmente, una inspección de las piezas construidas supondría una valoración de la precisión de movimiento del robot y del sistema de deposición, y no de las trayectorias generadas.

Como se expone a continuación, han sido construidos varios modelos empleando algunas de las herramientas generadas en este trabajo. Los resultados obtenidos permiten obtener una validación de la eficacia de las trayectorias generadas para 3 de las herramientas: la trayectoria híbrida mediante 3 ejes, la incorporación de la orientación adaptada de la herramienta y la fabricación de varios perímetros. Sin embargo, la complejidad que presenta el movimiento de 5 ejes continuos presenta

unas optimizaciones mayores y la utilización en construcciones se realizará en trabajos posteriores a este proyecto.

Estas construcciones conllevan la posibilidad de comprobar las características desarrolladas en los programas y permiten conocer los requerimientos reales de la fabricación aditiva. Por lo tanto, el trabajo realizado permite un posterior estudio independiente mediante construcciones experimentales con los que conocer las solicitudes no contempladas que permitan una optimización de los programas.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en el trabajo desarrollado.

7.1. Trayectoria híbrida

Una de las herramientas generadas ha sido dirigida a la construcción de piezas macizas mediante la deposición del interior usando una estrategia de zigzag combinada con una deposición del contorno de la pieza que sirva como contención.

Las trayectorias se han dibujado sobre capas planas que representan la sección transversal de la pieza y se ha planteado la opción de producir la deposición del contorno mediante la orientación vertical constante del cabezal o la reorientación continua adaptada a las condiciones de la geometría. Sin embargo, el relleno del interior se realiza manteniendo la orientación vertical.

Independientemente de la opción seleccionada, el movimiento del TCP de la herramienta debe seguir la trayectoria mostrada en las siguientes ilustraciones. Cabe destacar que los parámetros utilizados para obtener las ilustraciones son puramente adecuados para lograr una mejor interpretación.

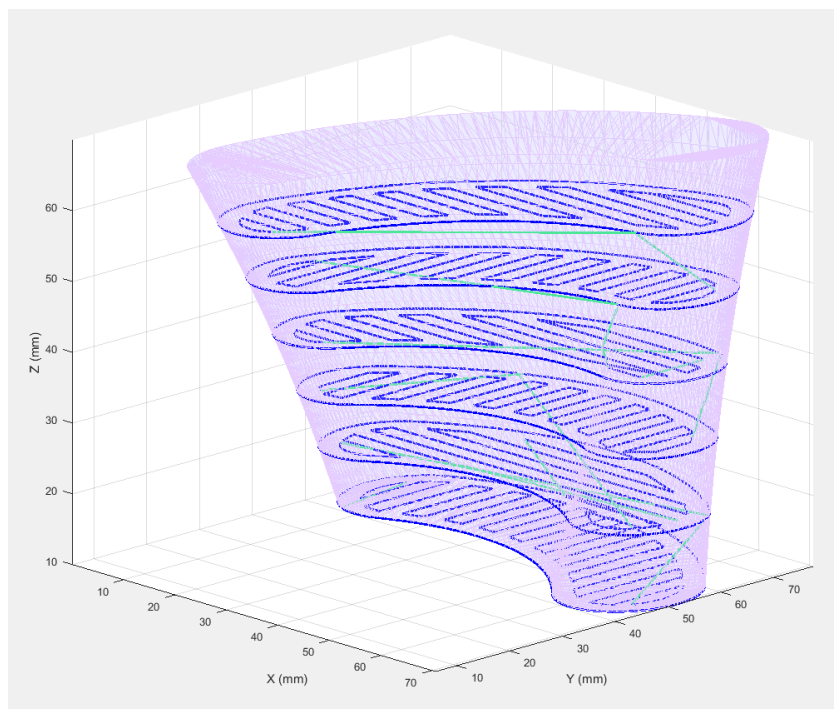


Ilustración 81: Vista 3D de una pared girada e inclinada. Trayectoria híbrida.

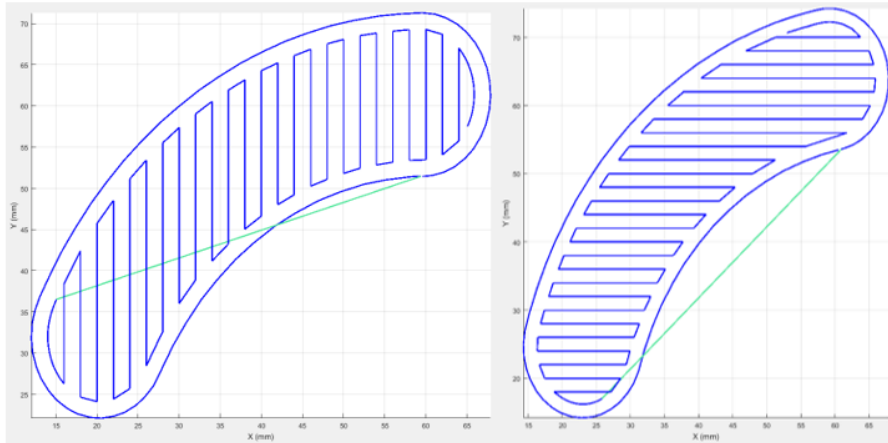


Ilustración 82: Representación de trayectoria híbrida en dos capas consecutivas.

Para representar la inclinación que debe establecer la herramienta a lo largo del movimiento del perímetro, se describen los sistemas de coordenadas durante la trayectoria, donde el eje de la herramienta debe coincidir con el eje Z de cada sistema.

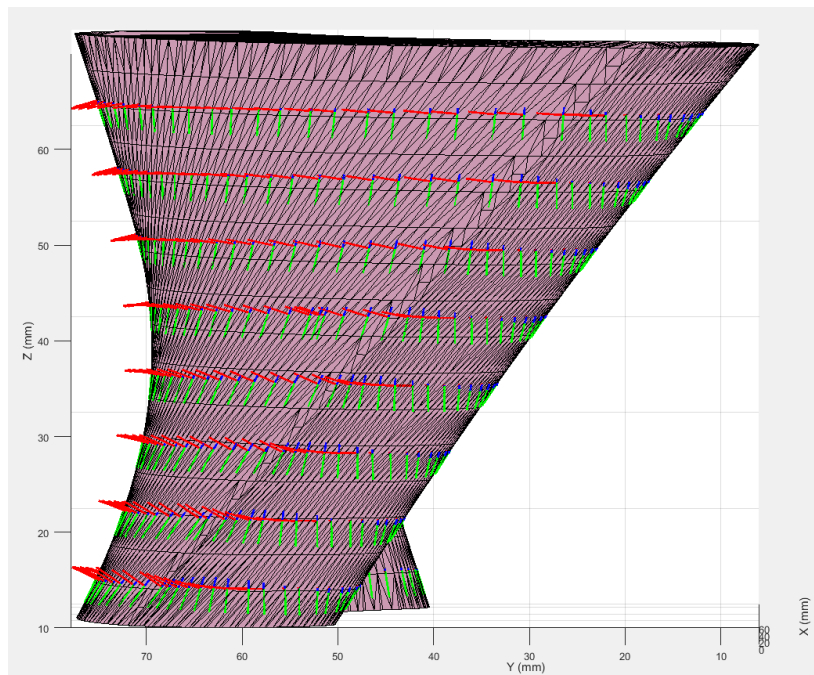


Ilustración 83: Vista lateral de la pieza con los sistemas de coordenadas de los puntos del perímetro.

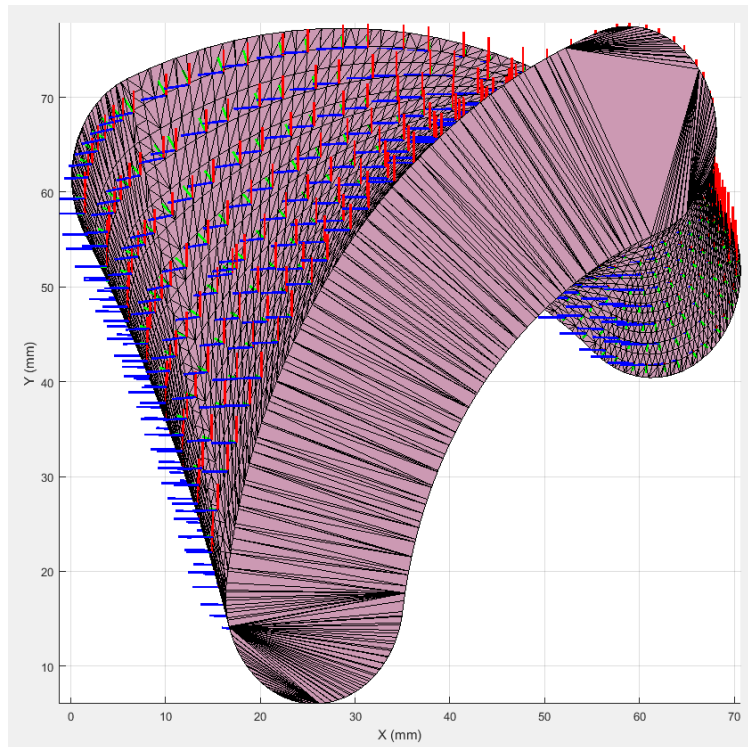


Ilustración 84: Vista de planta de la pieza con los sistemas de coordenadas de los puntos del perímetro.

7.1.1. Proceso de hilo metálico

La trayectoria híbrida en 3 ejes (o 2,5 ejes) generada por esta herramienta ha sido probada en un caso real de fabricación para las siguientes piezas empleando material en forma de hilo.

Por una parte, la producción de un semi-cono con el que se valida la trayectoria híbrida en cada una de las capas, con el que se comprueba en la ilustración 85 una separación adecuada entre los cordones y una fabricación capa por capa. Con la construcción del semi-cono se valida la capacidad de fabricación que proporciona la trayectoria generada.

Por otra parte, un acercamiento a las tipologías básicas de los alabes, donde la trayectoria híbrida permite una fabricación efectiva sin la aparición de destacables huecos o excesos de material.

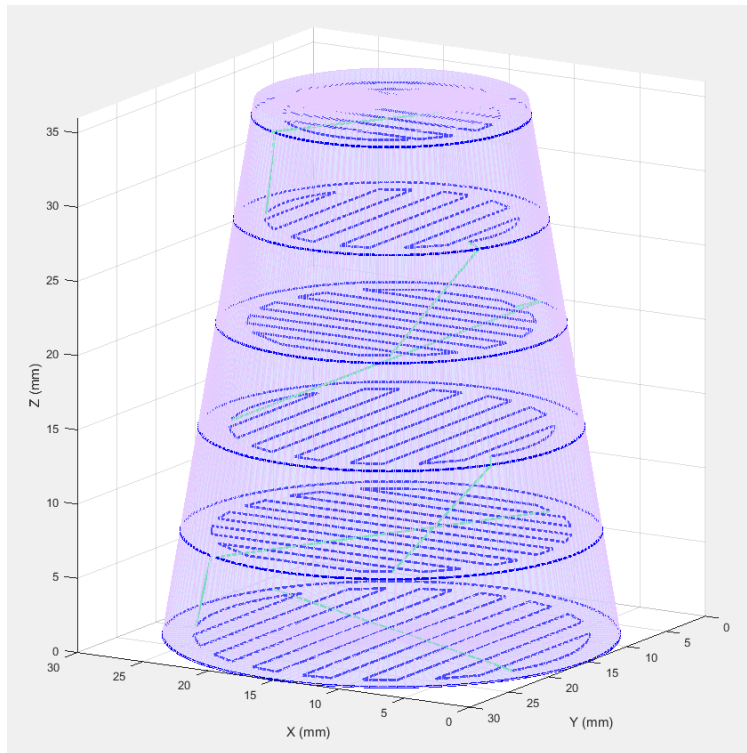


Ilustración 85: Vista 3D de un semi-cono. Trayectoria híbrida.

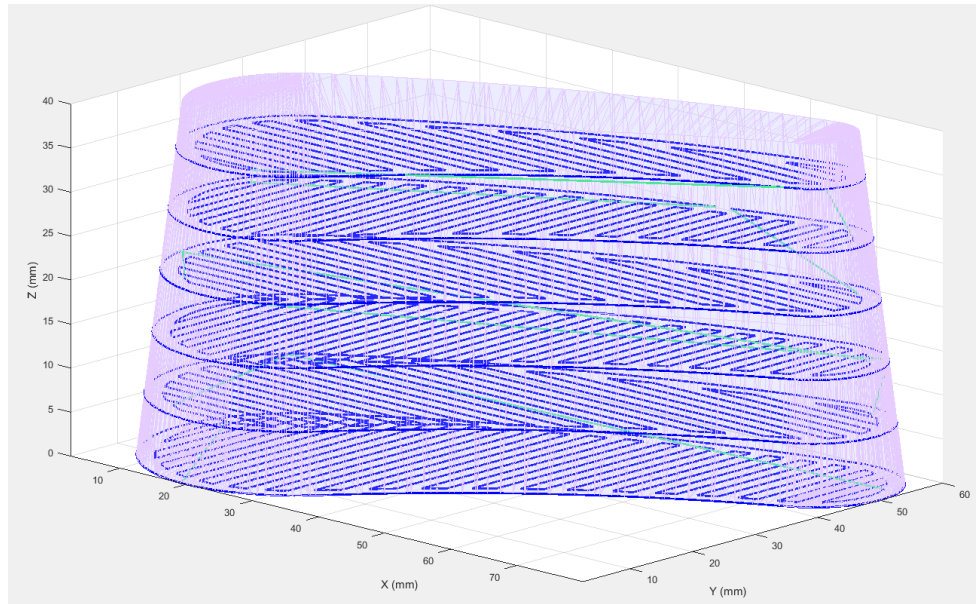


Ilustración 86: Vista 3D de un alabe. Trayectoria híbrida.



Imagen 2: Resultado de la fabricación de un semi-cono mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en hilo.



Imagen 3: Vista de planta del resultado del semi-cono fabricado (izquierda) y una de las capas del comienzo de la fabricación del semi-cono (derecha) con 3 ejes y material en hilo.

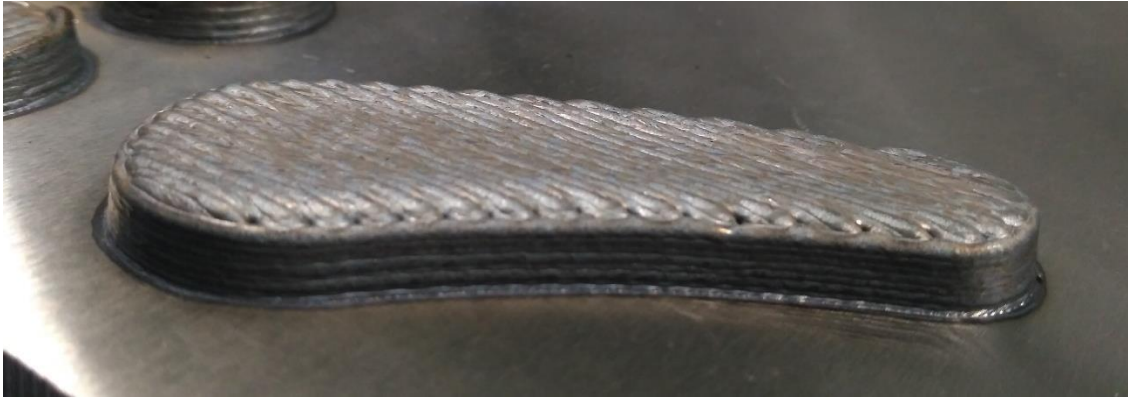


Imagen 4: Resultado de la fabricación de un alabe mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en hilo.



Imagen 5: Vista de planta del resultado de la fabricación de un alabe mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en hilo.

Actualmente, esta tecnología se encuentra en proceso de puesta en marcha, por lo que requiere de mejoras y optimizaciones de los elementos que la componen y las técnicas empleadas para lograr una construcción efectiva. Por este motivo, cabe destacar que los resultados obtenidos mediante el proceso de hilo metálico no comprenden una buena representación de la calidad de las trayectorias generadas, ya que un desperfecto en la construcción podría deberse a diversos aspectos de la propia deposición, y no de la aptitud de las trayectorias.

7.1.2. Proceso de polvo metálico

La tecnología que emplea polvo metálico se encuentra en un mayor desarrollo, y teniendo en cuenta los beneficios constructivos en cuanto a la facilidad de fabricación que aporta, las piezas fabricadas mediante esta tecnología obtienen unos mejores resultados. Por esta razón, se ha optado por hacer las pruebas experimentales de la deposición mediante la reorientación del cabezal con material en forma de polvo. Sin embargo, un mayor avance de las pruebas, con las que comprobar las ventajas que aporta inclinar el cabezal, son parte de los trabajos futuros planteados a partir del trabajo realizado aquí expuesto.

Por un lado, la construcción de una pared curva sin inclinación y, por lo tanto, una deposición con el cabezal constantemente en posición vertical.

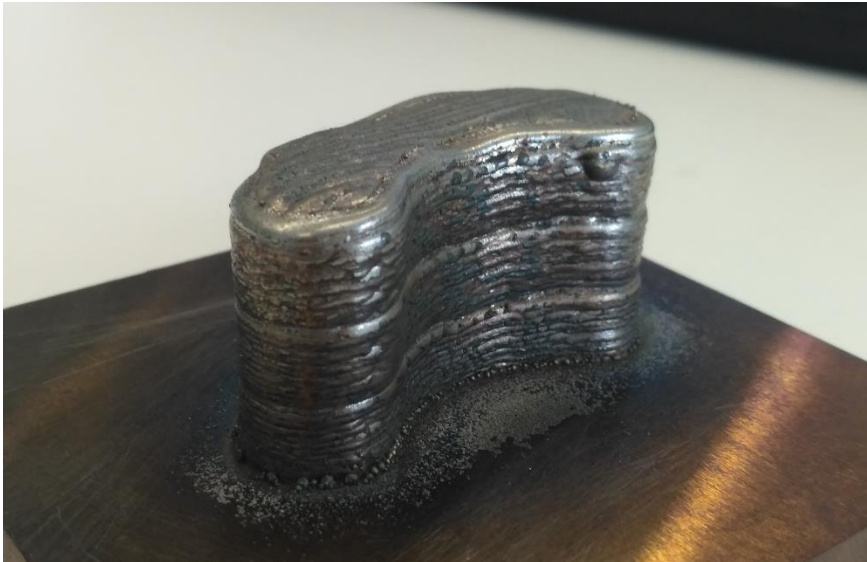


Imagen 6: Pared curva mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en polvo.

Al igual que en el proceso de hilo, la trayectoria generada es validada a partir de la previa visualización de los movimientos, similar a la ilustración 86, y con la comprobación de la capacidad de fabricación (imagen 6).

A continuación, una pared con una inclinación variable a lo largo del contorno, que imita la tipología de un alabe, pero manteniendo el movimiento vertical de la herramienta.



Imagen 7: Pared curva inclinada mediante trayectoria híbrida en 3 ejes y material en polvo.

En esta imagen queda visible el desprendimiento de material que ocurre en los tramos sobresalientes de la estructura, donde al mantener el eje de la herramienta vertical, se produce una deposición en el aire.

Las pruebas continúan con la deposición de un modelo similar, pero con unas dimensiones mayores, con el fin de generar un mayor radio de curvatura. En este caso, se emplea la inclinación adaptable de la herramienta en función del ángulo de inclinación de la pared.

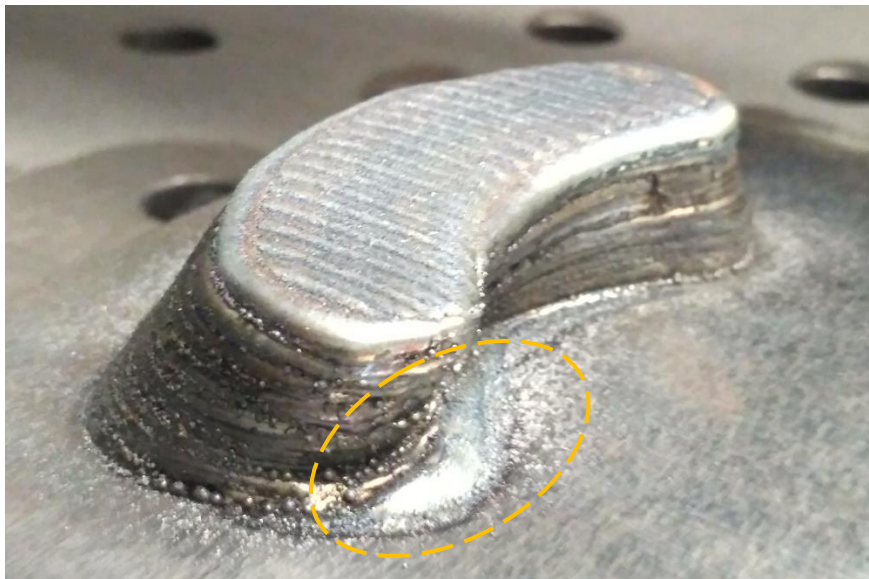


Imagen 8: Pared curva inclinada mediante trayectoria híbrida en 5 ejes y material en polvo.



Imagen 9: Vista en planta de pared curva inclinada mediante trayectoria híbrida en 5 ejes y material en polvo.

El desprendimiento de material visible en la imagen 8 se debe a errores producidos a la hora de realizar la reorientación del cabezal durante la quinta, la sexta y la duodécima deposición del perímetro. Estos errores se deben a incorrectas definiciones de los cuaterniones que describen la inclinación y que forman parte de las optimizaciones necesarias englobadas en los trabajos futuros.

7.2. Trayectoria de varios perímetros

Se ha obtenido una herramienta capaz de producir piezas huecas mediante la deposición de varios perímetros por cada una de las capas. El número de curvas cerradas que componen cada una de las capas planas es definido por el usuario.

Dichas curvas cerradas recorren el contorno de cada una de las secciones transversales de la pieza, formando por cada capa un conjunto de curvas relacionadas por un escalado.

Las características de los movimientos generados son validadas a través de la representan mediante Matlab de la siguiente manera, donde se puede comprobar la permanente distancia entre cordones y la secuencia ascendente de las capas.:

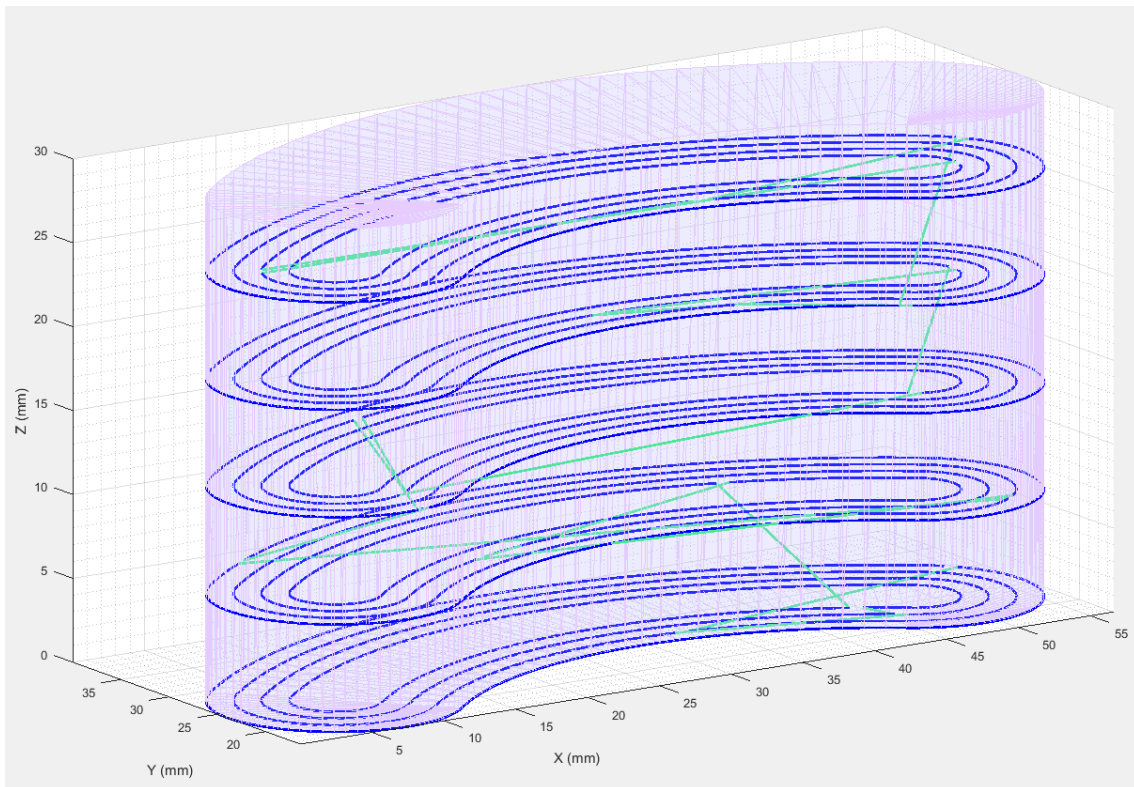


Ilustración 87: Trayectoria de varios perímetros para pared curva.

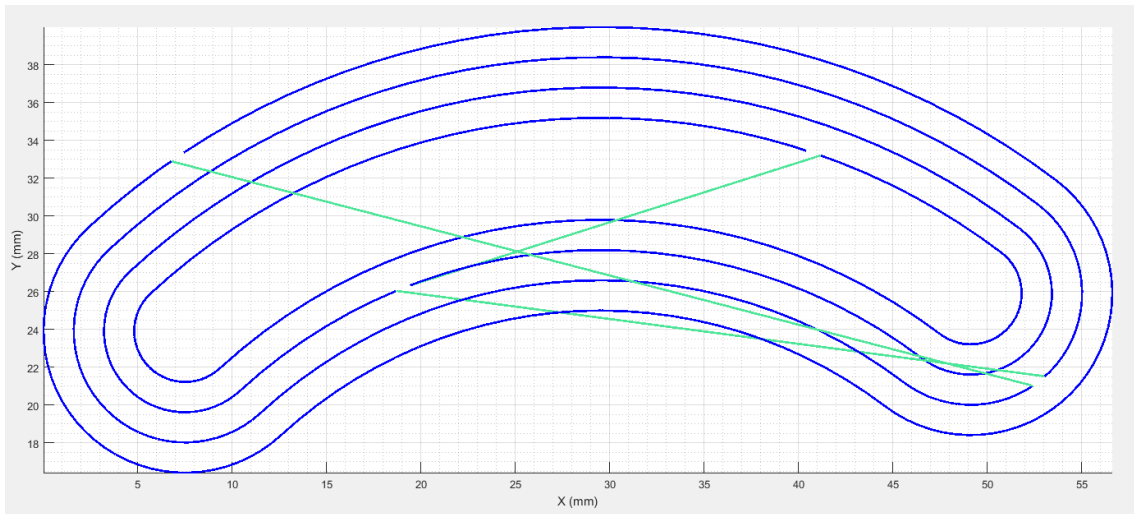


Ilustración 88: Vista en planta de la trayectoria de varios perímetros para pared curva.

Mediante estas trayectorias, se ha realizado el comienzo de la construcción de una pared curva, empleando la tecnología LMD con material metálico en forma de hilo y produciendo 4 contorno por cada capa.



Imagen 10: Vista en planta de pared curva mediante trayectoria de varios perímetros, movimiento en 3 ejes y 4 contornos por cada capa.

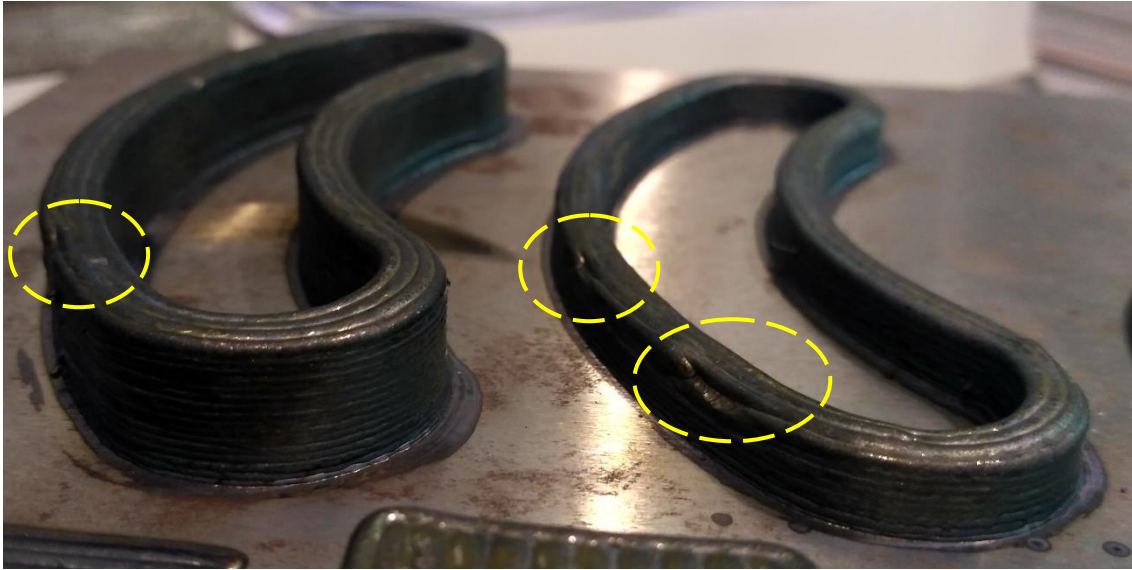


Imagen 11: Construcción de paredes curvas mediante trayectoria de varios perímetros, movimiento en 3 ejes y 4 contornos por cada capa.

Los errores señalados en las anteriores dos imágenes no son resultantes de desperfectos sobre las trayectorias generadas, ya que como se puede ver en la ilustración 88, existe una deposición a lo largo de todo el perímetro y una pequeña separación entre los extremos de cada curva cerrada. Esta separación es previamente adecuada para que no produzca huecos en la superficie.

Estos desperfectos son producidos debido al incorrecto funcionamiento de la tecnología, en concreto se debe a un descentramiento del hilo extraído que no es depositado sobre la superficie anterior.

Por motivos como éste se concluye que, aunque los movimientos de la herramienta se validen a través de la visualización virtual de las trayectorias, la precisión del brazo robótico y la imperfección tecnológica del proceso de deposición, no aseguran una construcción completamente efectiva.

7.3. Trayectoria de un perímetro

Por último, los resultados obtenidos mediante la herramienta que genera una trayectoria de un solo perímetro a lo largo del contorno de la pieza. Dentro de este apartado, se pueden distinguir, por un lado, el movimiento a través de capas planas y una reorientación constante del cabezal, y por otro lado la adaptación de las capas a las solicitudes de la construcción logrando un movimiento en 5 ejes continuos

La construcción de piezas mediante el último método presenta una complejidad mayor que el resto, al que probablemente haya que dedicarle un mayor estudio y optimización de la herramienta a partir de la interpretación de los resultados de las pruebas experimentales. Durante este trabajo no se han realizado construcciones empleando esta herramienta, por lo que formarán parte de los trabajos futuros.

La primera imagen muestra las trayectorias del perímetro para una pared curva y con inclinación variable a lo largo del contorno.

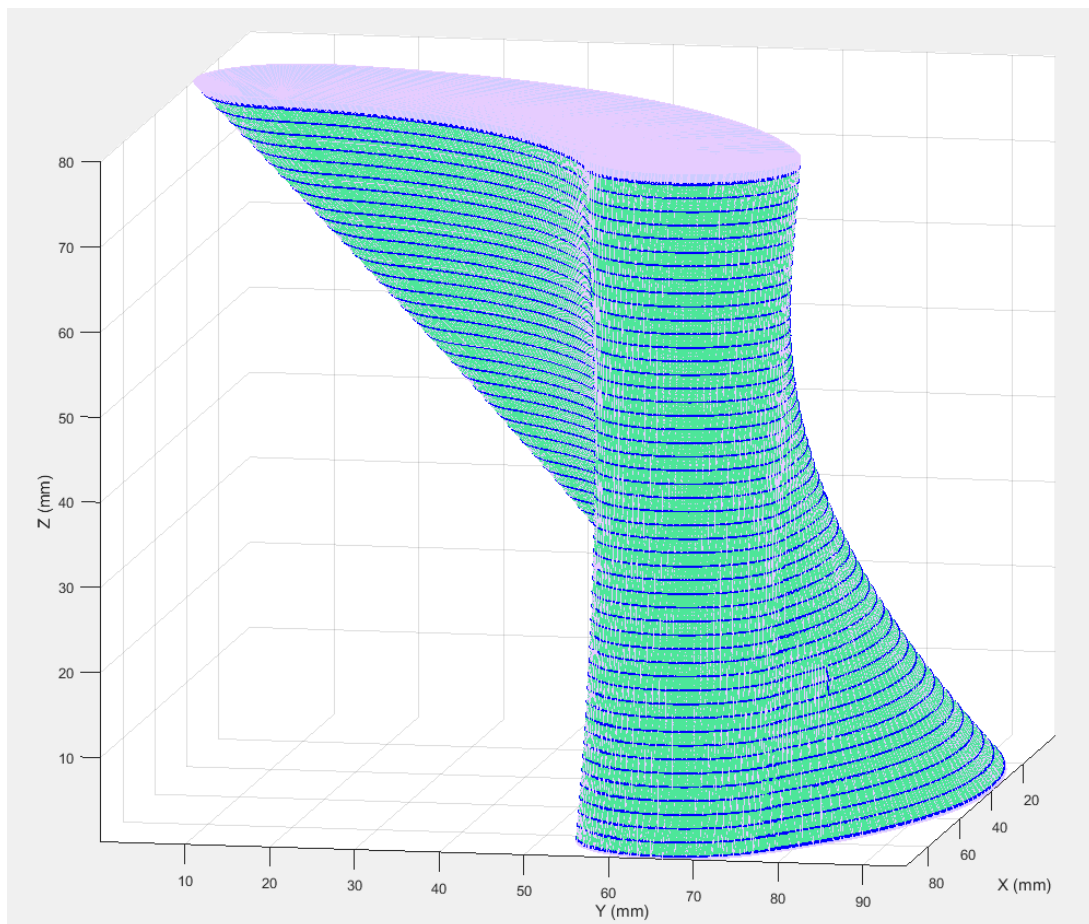


Ilustración 89: Trayectoria del perímetro mediante capas planas.

En la imagen se pueden ver las trayectorias del perímetro con las que se ha calculado

todo el proceso del programa (azules), con una separación mayor a la requerida para reducir los tiempos de cálculo del programa. Por otro lado, los tramos verdes, que están compuestos por curvas cerradas con una separación de 0.1 mm y que representan el movimiento real de la herramienta. Estas últimas, se generan a partir de la interpolación de las primeras, produciendo un pequeño error que se ha considerado despreciable.

Dibujando los sistemas de coordenadas de varias capas alternas, el resultado es el siguiente:

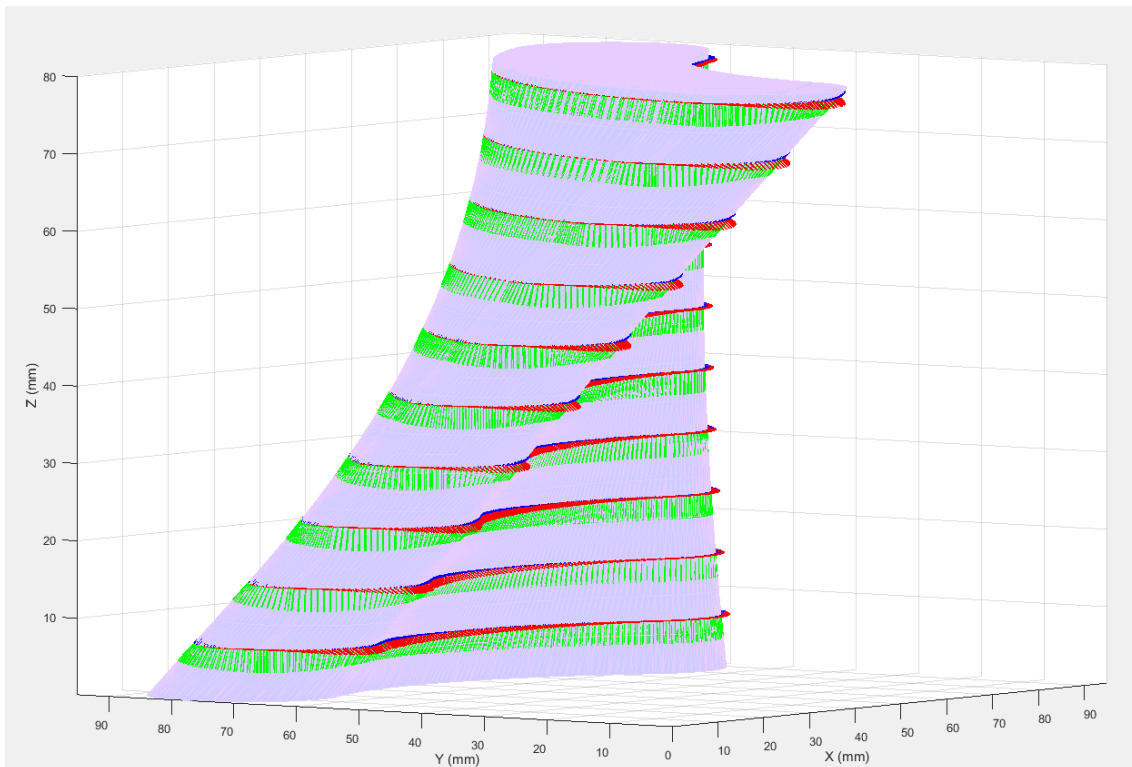


Ilustración 90: Sistemas de coordenadas (X azul, Y rojo, Z verde) en varias capas alternas.

La adaptación de la forma de las capas a las solicitudes de la construcción está dirigida a la producción de piezas de esta tipología, donde predomina la variación de la inclinación de la pared a lo largo de la estructura. Además, generalmente, una capa no uniforme está conectada con el movimiento en 5 ejes continuos.

Los resultados de la herramienta que genera estas complejas trayectorias son los siguientes. Donde se pueden ver las trayectorias originales sobre planos de color amarillo, la adaptación de estas últimas de color azul, y las capas superiores incorporadas para completar la pieza de color verde.

Cabe destacar que también en este caso se han representado capas con una distancia entre ellas superior a las requeridas por el proceso, con el fin de facilitar su

exposición e interpretación.

Representando los sistemas de coordenadas de algunas de las capas:

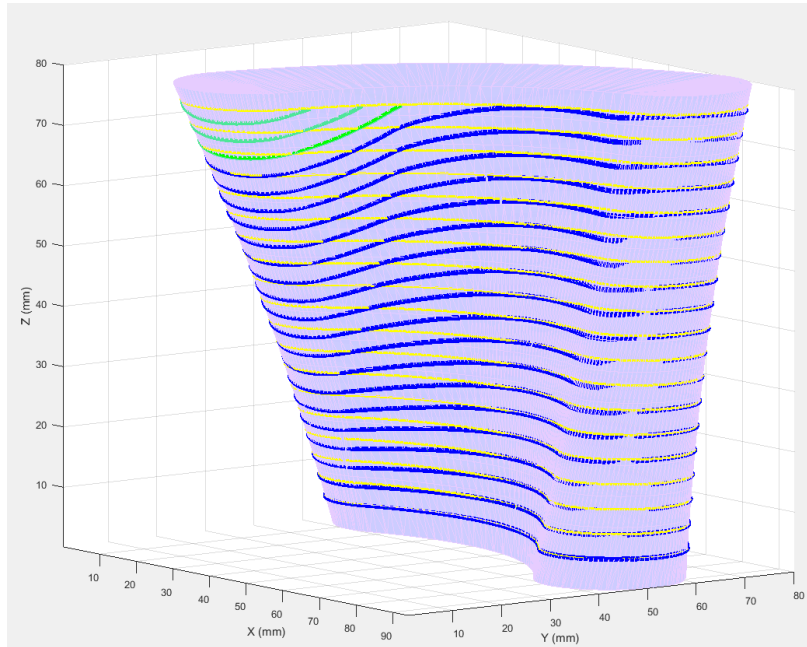


Ilustración 91: Representación de las trayectorias originales (amarillo), las capas adaptadas (azules) y las superiores incorporadas (verdes).

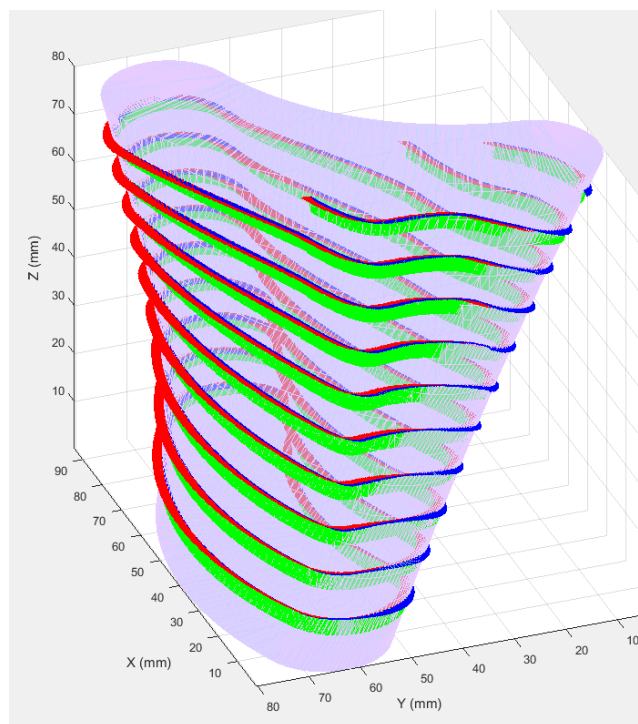


Ilustración 92: Sistemas de coordenadas (X azul, Y rojo, Z verde) en varias capas alternas.

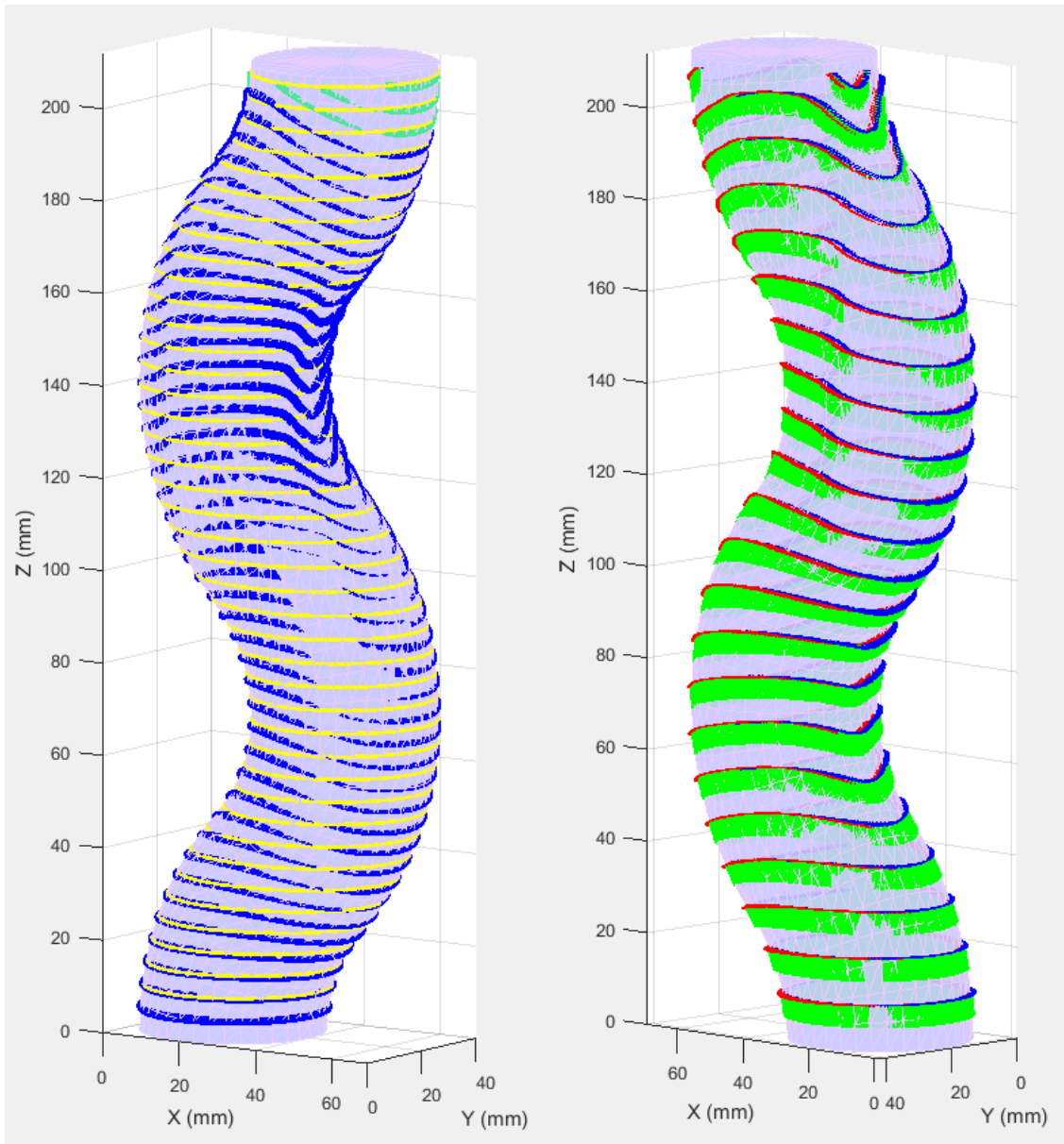


Ilustración 93: Trayectorias originales y adaptadas en la izquierda, y sistemas de coordenadas en varias capas en la derecha.

Mediante estas ilustraciones se puede validar el posterior movimiento de la herramienta y su aptitud frente a las solicitudes geométricas. Por una parte, la clara separación de cada una de las curvas cerradas que componen el contorno y se ajustan a la geometría a la vez que forman un movimiento continuo. Por otra parte, la efectividad de los vectores para mantenerse contenidos en la superficie, asegurando una inclinación de la herramienta adaptada a las condiciones de la zona de deposición.

7.4. Resultados y ventajas técnicas obtenidas

Uno de los principales objetivos planteados en la realización de este trabajo, ha sido la generación de trayectorias con un mayor grado de optimización de varios aspectos frente a las alternativas. De esta forma, las herramientas creadas para producir los movimientos de deposición han sido dirigidas a la fabricación de piezas sencillas, pero teniendo en cuenta los requerimientos que presenta la fabricación aditiva de componentes metálicos.

El hecho de haber creado la herramienta mediante programación manual en el entorno Matlab, permite la posibilidad de ajustar los algoritmos libremente para obtener un resultado adecuado para cada caso. Además, a medida que se vayan construyendo piezas empleando las trayectorias generadas, se podrán identificar las carencias del programa y las solicitudes de la tecnología no contempladas hasta el momento, que posibilitan una continua optimización del programa.

De esta manera, la herramienta creada a lo largo de este trabajo aporta las siguientes ventajas:

Trayectoria híbrida

El empleo de la combinación entre la estrategia de contorno y la de zigzag, contribuye a una fabricación más efectiva y eficiente. La denominada trayectoria híbrida alberga los beneficios que presentan ambas estrategias a la vez que evita sus inconvenientes.

Por un lado, se ha generado un movimiento a lo largo del contorno a partir de los triángulos que componen el modelo 3D en formato STL, asegurando una excelente reproducción del contorno de la pieza. Además, se han incorporado datos adicionales en los tramos donde se encontrases distanciamientos para garantizar la exactitud del movimiento. De esta forma, se consigue mejorar la precisión geométrica y la calidad superficial de la pieza fabricada, a la vez que producir un cordón de deposición que sirve de contención para la estrategia del interior al que ayuda a crecer de forma uniforme.

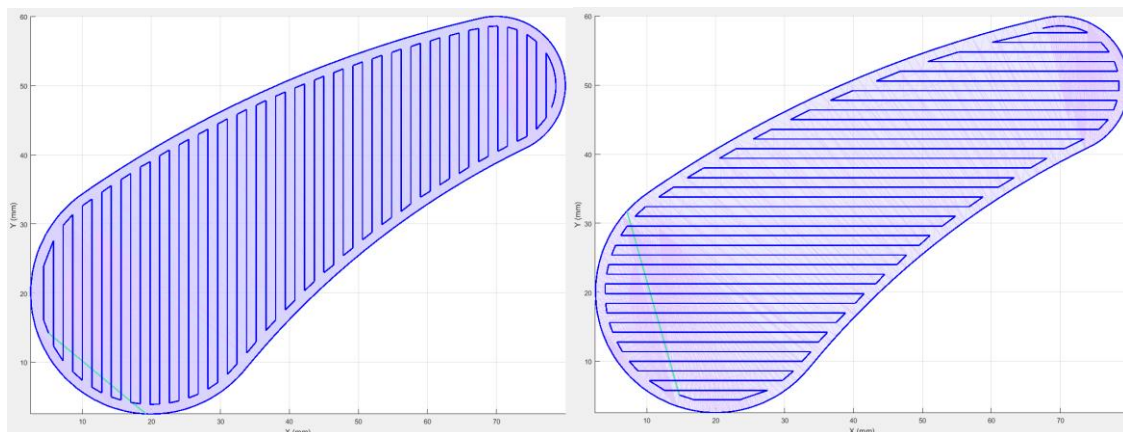


Ilustración 94: Trayectoria híbrida con la estrategia de zigzag adaptado a la estrategia de contorno para dos capas consecutivas.

Por el otro lado, el movimiento de zigzag ha sido empleado para depositar el material que sirve de relleno y constituye la parte fundamental de la trayectoria en cuanto a la construcción del modelo. Esta estrategia aporta un modo rápido de fabricación, a la vez que asegura una completa deposición en el interior gracias al solape producido entre sus tramos rectos. El aspecto crítico reside en la relación entre el zigzag y el perímetro, donde cabe la posibilidad de que se produzcan insuficiencias o excesos de material. Este fenómeno se ha resuelto mediante la optimización de los bordes del zigzag mediante la adaptación a las condiciones del cordón depositado en el contorno. De esta manera, todos los límites del zigzag, tanto los tramos de giro como los extremos, se han modificado para describir un movimiento prácticamente paralelo al perímetro y mantener una separación constante y predeterminada, que coincida con la distancia entre cordones preestablecida.

En las siguientes imágenes se muestra una construcción experimental mediante deposición directa de hilo. En estas, se expone la ventaja obtenida a la hora de producir piezas empleando el ajuste de los extremos del zigzag, quedando visible la creación de huecos y crecimiento uniforme producidos por la ausencia de la adaptación de los extremos.



Imagen 12: Fabricación mediante movimiento en 3 ejes y hilo. A la izquierda sin adaptar los extremos del zigzag, y a la derecha adaptando dichos extremos.

Se ha aplicado una variación de la dirección de los tramos paralelos del zigzag de 90 grados para las capas consecutivas, con el fin de asemejar las propiedades en cualquier dirección y evitar el fenómeno de contracción al enfriarse el material.

Capas adaptadas

El método más común en la fabricación aditiva actual consiste en la fabricación mediante trayectorias dibujadas sobre capas planas, produciendo un movimiento de la herramienta denominado 2,5 ejes. Este método es aceptable en los procesos donde el eje de la herramienta se mantenga vertical y se garantice un crecimiento uniforme de la pieza.

Sin embargo, tanto una pieza con un cierto grado de complejidad como las irregularidades que pueden aparecer durante el proceso de fabricación, requieren de la posibilidad de adaptar las capas a las solicitudes planteadas. En este trabajo, se ha desarrollado una herramienta que genera trayectorias únicamente perimetrales mediante curvas cerradas que adaptan su forma a las exigencias geométricas en un proceso de fabricación en 5 ejes continuos.

Para realizar el ajuste de las capas, se ha considerado por una parte la dirección de crecimiento que se adquiere al inclinar el cabezal y que coincide con la dirección de dicho eje. Por lo tanto, el cordón depositado con un cierto grado de inclinación produce una altura de crecimiento en dirección vertical inferior al cordón depositado con la herramienta en orientación vertical. Por otro lado, una pieza con una inclinación variable a lo largo de su contorno implica una diferencia en la longitud de las paredes de cada zona y, por lo tanto, una cantidad de material necesaria diferente.

Este ajuste de las capas espera aportar una solución eficaz a la fabricación de

perímetros de piezas complejas mediante la continua reorientación de la herramienta. Además, sirve como base de los métodos de fabricación que emplean capas adaptadas, incluyendo los movimientos de zigzag sobre bases no uniformes, y que podrían formar parte de los trabajos futuros.

Manipulación de la programación

La obtención de una herramienta para generar trayectorias para fabricación aditiva puramente a partir de la programación manual en el entorno Matlab, capacita al usuario para tener un total control sobre los resultados. Tanto el proceso de fabricación, como las condiciones deseadas en la construcción, o las características del modelo 3D, pueden acarrear la necesidad de distintas particularidades de las trayectorias que pueden logradas mediante modificaciones en los algoritmos.

A continuación, se plantean varias modificaciones que se han considerado interesantes en la fabricación aditiva.

- En las trayectorias híbridas, los tramos paralelos del zigzag son solapados entre sí formando un crecimiento uniforme. Sin embargo, el cordón del contorno solo es solapado por su lado interior con los bordes del zigzag, produciendo un menor crecimiento en los límites de la última superficie depositada. Se ha planteado la posibilidad de incorporar trayectorias del contorno adicionales, en lugar de realizar un único cordón perimetral por cada capa. La relación entre el número de perímetros adicionales y el número de capas puede ser definido por el usuario en función de los requerimientos de la construcción que permiten un crecimiento totalmente uniforme.
- Se ha implementado una variación de 90 grados de la dirección de los tramos paralelos del zigzag entre capas consecutivas, que deriva en una dirección idéntica entre capas impares o entre capas pares. En piezas donde se produce una revolución gradual sobre el eje vertical, o existe una diferencia significativa entre secciones transversales, parece interesante la posibilidad de adaptar la dirección principal del zigzag a cada sección para obtener una trayectoria óptima.
- La calidad de la reproducción de la curva que representa el contorno de la pieza está relacionada con la cantidad de puntos que la componen, aumentando la calidad cuantos más datos se utilicen. Sin embargo, se ha podido comprobar que una excesiva cantidad de puntos produce un movimiento escalonado de la máquina, completamente perjudicial para la deposición del cordón. Por este motivo, se debe llegar a un compromiso entre ambas condiciones, pudiendo ser ajustado directamente por el usuario.
- Los principales parámetros que actúan en el proceso de fabricación y que son variables fundamentales de las características de la trayectoria pueden ser libremente definidos por el usuario. Estos parámetros son la altura de capa y la distancia entre cordones, y son completamente dependientes de la tecnología

empleada y las solicitudes de la construcción.

- Otros parámetros de la trayectoria, y que pueden afectar a la calidad de la construcción, también pueden ser modificados hasta obtener un resultado óptimo. Entre estos parámetros, se pueden destacar la separación entre los extremos de la curva que representa el perímetro, la separación entre el extremo del zigzag y el tramo paralelo próximo, el acercamiento de los bordes del zigzag al perímetro, la cantidad de puntos con los que definir los extremos del zigzag y las condiciones para seleccionar la estrategia de adaptación, o la cantidad de datos recogida para calcular la aproximación de la curva o de los vectores de los sistemas de coordenadas.

La definición de todas estas variables es dependiente de cada proceso, y requiere de una mínima experiencia y ensayos previos para poder adquirir la capacidad de determinar los valores óptimos.

8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se van a comentar las conclusiones más relevantes obtenidas tras la realización de este trabajo de fin de máster, en base a los objetivos planteados al comienzo.

La petición por parte del centro tecnológico IK4-TEKNIKER consistía en la obtención de una herramienta dirigida a la generación de trayectorias para fabricación aditiva de componentes metálicos, por lo que, para definir los aspectos generales que describen las características de las trayectorias empleadas, ha sido necesario un estudio del estado del arte enfocado a los softwares comerciales actuales y las investigaciones sobre el ámbito.

De esta manera, y junto a las solicitudes del centro, se han planteado los principales factores a cubrir por las herramientas generadas en este trabajo.

Ha quedado demostrada la funcionalidad a la hora de fabricar piezas sencillas empleando las trayectorias generadas por la herramienta para movimientos sobre capas planas y estrategias híbridas que combinan el contorno y el zigzag o la conjunción de varios perímetros. Del mismo modo, se ha comprobado la efectividad de la inclinación variable de la herramienta respecto a la fabricación mediante la orientación vertical constante, que muestra significativas ventajas y posibilita la fabricación de piezas con un mayor grado de complejidad.

Precisamente, se ha realizado una primera comprobación sobre la fabricación de paredes inclinadas que el movimiento en orientación vertical del cabezal se ve incapaz de producir. Sin embargo, es necesaria una continuación en torno a este trabajo y enfocada a la construcción de pruebas experimentales para permitir una optimización del proceso y conocer las limitaciones de la inclinación del cabezal.

Por otra parte, se ha desarrollado una herramienta basada en la adaptación de las capas y en la fabricación mediante el movimiento continuo de 5 ejes. La complejidad que presenta, tanto su programación, como la definición del comportamiento real de

la construcción, prevén un largo proceso de iteración entre pruebas y optimizaciones hasta lograr un aceptable funcionamiento de la herramienta.

Por lo tanto, la realización de este trabajo ha permitido la creación de una herramienta completamente funcional dirigida a la fabricación de piezas macizas mediante trayectorias híbridas y piezas huecas empleando una cantidad predefinida de contornos, basada en la estrategia de 2,5 ejes y permitiendo una adaptada inclinación del cabezal. Asimismo, se ha logrado una última herramienta enfocada a la fabricación mediante capas adaptadas pendiente de ser probada experimentalmente y que servirá como base de una posterior optimización.

La finalización de este trabajo abre las puertas a un posterior proceso de pruebas experimentales que permitan una optimización del programa, con el fin de alcanzar la capacidad de producir piezas con mejores resultados constructivos o de mayor complejidad. Cabe destacar el diseño modular proporcionado a la estructura del programa, de modo que se permita con una mayor facilidad la incorporación de mejoras o funciones adicionales.

Como se ha mencionado, el trabajo realizado permite un continuo proceso de mejora de la herramienta a través de los resultados obtenidos en construcciones reales, pero también aporta un gran apoyo facilitando una herramienta fundamental en el proceso de fabricación, colaborando en el continuo desarrollo de las tecnologías de la fabricación aditiva en general.

Entre las principales líneas futuras de trabajo, se pueden distinguir las siguientes:

- La optimización de los algoritmos y de los parámetros empleados a partir de las pruebas experimentales de fabricación.
- La generación de una herramienta basada en el empleo de capas adaptadas en las que desarrollar tanto el movimiento de contorno como el de zigzag, dirigida a la aplicación de recubrimiento de superficies.
- El estudio y análisis de la fabricación aditiva mediante el movimiento simultáneo de 5 ejes, a la vez que desarrollar la herramienta funcional que genere las trayectorias apropiadas.
- La optimización de la herramienta en cuanto al abanico de tipologías de piezas abarcadas por sus capacidades.
- La incorporación de diferentes estrategias de deposición entre las que destacan la estrategia de contorno o el de espiral.
- La continuación de la producción de piezas con las trayectorias generadas, y la posterior valoración de los resultados mediante su inspección.

9. PRESUPUESTO

A continuación, se realiza el descargo de gastos mediante el que se expone la inversión requerida para llevar a cabo la realización de este trabajo, donde se engloban por una parte los relacionados con la generación del programa y, por otra parte, las construcciones realizadas mediante fabricación aditiva.

En la primera tabla, se contabilizan las horas internas dedicadas al proyecto, en las que han tomado parte un ingeniero junior, un ingeniero senior, y un maestro de taller especializado en esta tecnología.

En segundo lugar, se detallan amortizaciones de los sistemas participantes en el proyecto, que envuelve todos los recursos utilizados a lo largo de este en las instalaciones del centro tecnológico IK4-TEKNIKER.

Por últimos, se realiza una cuantificación aproximadas de los gastos producidos durante la realización del trabajo.

A partir de los subtotales calculados en estos 3 apartados, es posible obtener el resultado de los aspectos económicos de este Trabajo de Fin de Máster mediante la exposición del presupuesto planteado del trabajo por completo.

De esta manera, en la siguiente tabla se detallan las horas internas:

HORAS INTERNAS	Coste horario	Tiempo	Total
Ingeniero Junior	20 €/hora	900 horas	18.000,00 €
Ingeniero Senior	40 €/hora	90 horas	3.600,00 €
Maestro de taller	20 €/hora	32 horas	640,00 €
Subtotal de las horas internas			22.240,00 €

Tabla 11: Horas internas del trabajo.

En la siguiente tabla se exponen los gastos relacionados con los recursos. Cabe destacar que, al haber empleado dos celdas, la de polvo y la de hilo, se ha hecho uso de dos máquinas distintas e independientes. Sin embargo, las similitudes entre los sistemas de generador láser, cabezal y alimentador de material que posee cada

tecnología, hacen posible englobarlas como si se tratara de sistemas comunes. Es decir, se van a cuantificar las horas empleadas de la fuente de energía de la celda de hilo y de la celda de polvo mediante la suma de las horas dedicadas a cada una de ellas.

AMORTIZACIONES	Coste	Vida útil	Tiempo	Total
Licencia Matlab	2.000 €	1 años	700 horas	875,00 €
Licencia SolidWorks	8.000 €	1 años	20 horas	100,0 €
Microsoft Office	108 €	3 años	160 horas	3,60 €
Ordenador	1000 €	5 años	850 horas	106,25 €
Celda de LMD de polvo	10.000 €	10 años	4 horas	2,50 €
Celda de LMD de hilo	10.000 €	10 años	3 horas	1,88 €
Robot ABB IRB4400	35.000 €	10 años	4 horas	8,75 €
Robot ABB IRB4600	40.000 €	10 años	3 horas	7,50 €
Fuente de energía	200.000 €	10 años	7 horas	87,50 €
Cabezal	30.000 €	10 años	7 horas	13,12 €
Alimentador de material	25.000 €	10 años	7 horas	10,9 €
Subtotal de las amortizaciones				1.217,00 €

Tabla 12: Amortizaciones.

Para llevar a cabo el cálculo de los gastos de las amortizaciones se ha considerado que los recursos solamente podrían ser utilizados durante la jornada laboral que contiene 1600 horas anuales.

A continuación, se detallan los gastos correspondientes a los recursos materiales.

GASTOS		Coste por unidad	Potencia	Uso	Total
Material de oficina		-	-	-	50,00 €
Electricidad	Ordenador	0,13 €/kWh	200 W	850 horas	22,10 €
	Láser		1.500 W	7 horas	1,36 €
Acero 316L en polvo		20 €/kg	-	0,5 kg	10,00 €
Acero 316L en hilo		10 €/kg	-	0,5 kg	5,00 €
Subtotal de los gastos					88,46 €

Tabla 13: Gastos de recursos materiales.

Para realizar el gasto correspondiente al consumo de la electricidad, se ha considerado una tarifa media de 0,13 €/kWh.

Por último, se presenta el resumen de los gastos totales a partir de la suma de los anteriores.

Gastos totales	Total
Horas internas	22.240,00 €
Amortizaciones	1.217,00 €
Gastos	88,46 €
Subtotal costes directas	23.545,46 €
Costes indirectos (%7)	1.648.18 €
Total presupuesto	25.193,64 €

Tabla 14: Resumen de los gastos totales.

Por lo tanto, el presupuesto necesario para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Máster es de veinticinco mil ciento noventa y tres con sesenta y cuatro euros (25.193,64 €).

10. REFERENCIAS

- ABB Robotics. (2010). *Manual del operador. RobotStudio*.
- Alvarez, P., Garcíandia, F., & Gurmendi, U. (28 de 01 de 2014). *Interempresas*. Obtenido de Tecnologías y aplicaciones en fabricación aditiva de materiales metálicos: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/118715-Tecnologias-y-aplicaciones-en-fabricacion-aditiva-de-materiales-metalicos.html>
- Arregui, L., Garmendia, I., Leunda, J., & Pujana, J. (2018). *Estudio de defectos y limitaciones geométricas asociados al proceso de fabricación de piezas metálicas mediante la tecnología LMD*. Fundación Tekniker. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/206574-Estudio-defectos-limitaciones-geometricas-asociados-proceso-fabricacion-piezas-metalicas.html>
- Autodesk Netfabb. (2017). *Make the most of additive manufacturing*. AUTODESK NETFABB.
- Avantek. (10 de 04 de 2014). *NX CAM: una solución completa para fabricar piezas mejores en menos tiempo*. Obtenido de Avantek Blog : <https://avantek.es/nx-cam-una-solucion-completa-para-fabricar-piezas-mejores-en-menos-tiempo/>
- Boisselier, D., Sankaré, S., & Engel, T. (2014). *Improvement of the laser direct metal deposition process in 5-axis configuration*. IREPA LASER and iCube. Elsevier.
- Calleja, A., Tabernerero, I., Fernández, A., Celaya, A., A Lamikiz, & Lacalle, L. L. (2014). *Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations*. University of the Basque Country , Mechanical Engineering. Bilbao: Elsevier.
- Campos, I. T., Ochoa, A. C., Arrien, E. U., & Marcaide, L. N. (2012). *Laser cladding en 5 ejes continuos para la fabricación de piezas de alto valor añadido*. Universidad

- del País Vasco (UPV/EHU) , Dpto. de Ingeniería Mecánica, Bilbao.
- Choi, S. H., & Kwok, K. T. (1999). *A Memory Efficient Slicing Algorithm for Large STL Files*. HKU Scholars Hub.
- Ding, D., Pan, Z. (., Cuiuri, D., & L, H. (2014). *A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing*. Springer.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). *A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures*. Elsevier.
- Fleming, C., Walker, S., Branyan, C., Nicolai, A., Hollinger, G., & Mengüç, Y. (2000). *ToolpathPlanningforContinuousExtrusionAdditive Manufacturing*. School of Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering at Oregon State University.
- Fundación Cotec. (2011). *Fabricación Aditiva*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A.
- Ganganath, N., Cheng, C.-T., Fok, K.-Y., & Tse, C. K. (2016). *Trajectory Planning for 3D Printing: A Revisit to*. The Hong Kong Polytechnic University, Department of Electronic and Information Engineering .
- IK4-LORTEK. (2013). *Fabricación aditiva en metal*. Ordizia.
- IK4-TEKNIKER. (s.f.). *tekniker*. Obtenido de Laser Cladding: <http://www.tekniker.es/es/laser-cladding-o-laser-metal-deposition-lmd>
- J. Choi, J. Mazumder, & A. Schifferer. (1999). *Direct materials deposition: designed macro and microstructure*. Springer.
- Jee, H., & Lee, K. (2015). *Slicing algorithms for multi-axis 3-D metal printing of overhangs*. Hongik University, School of Mechanical Engineering and Mechanical and System Design Engineering. Journal of Mechanical Science and Technology.
- Jin, G., Li, W., Gao, L., & Popplewell, K. (2012). *A hybrid and adaptative tool-path generation approach of rapid prototyping and manufacturing for biomedical models*. Elsevier.
- Jin, Y.-a., He, Y., Fu, J.-z., Gan, W.-f., & Lin, Z.-w. (2014). *Optimization of tool-path generation for material extrusion-based additive manufacturing technology*. Zhejiang University, Department of Mechanical Engineering. Hangzhou: Elsevier.
- Jin, Y.-a., He, Y., Xue, G.-h., & Fu, J.-z. (2014). *A parallel-based path generation method for fused deposition modeling*. Springer.

- Kapil, S., Legesse, F., Kumar, R., & Karunakaran, K. (2017). *Hybrid Layered Manufacturing of Turbine Blades*. IIT Bombay, Mechanical Engineering. Elsevier.
- Kapil, S., Negi, S., Joshi, P., Sonwane, J., Sharma, A., Bhagchandani, R., & Karunakaran, K. P. (2017). *5-AXIS SLICING METHODS FOR ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS*. Indian Institute of Technology Bombay, Mechanical Engineering.
- Liu, R., Wang, Z., Zhang, Y., Sparks, T., & Liou, F. (2016). *A Smooth Toolpath Generation Method for Laser Metal Deposition*. Missouri University of Science and Technology, Department of Mechanical and Aerospace Engineering.
- Nickel, A., Barnett, D., & Prinz, F. (2001). *Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing*. Department of Materials Science and Engineering. Elsevier.
- Nilsiam, Y., Sanders, P., & Pearce, J. M. (2017). *Slicer and process improvements for open-source GMAW-based metal 3D-printing*. Michigan Technological University, Electrical & Computer Engineering and Materials Science & Engineering. Elsevier.
- Onemagazine. (24 de Diciembre de 2011). *Cotec: la fabricación aditiva, base de la "fábrica digital 2.0"*. Obtenido de Onemagazine: <http://www.onemagazine.es/noticia/6443/Sin-Especificar/Cotec:-la-fabricacion-aditiva-base-de-la-fabrica-digital-2.0-.html>
- Paccot, F., Andreff, N., & Martinier, P. (s.f.). A review on Dynamic Control of Parallel Kinematic Machine: Theory and Experiments.
- Pandey, P. M., Reddy, N. V., & Dhande, S. G. (2003). *Slicing procedures in layered manufacturing: a review*. Rapid Prototyping Journal.
- Polígonos de Thiessen. (2018). *Polígonos de Thiessen*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADgonos_de_Thiessen
- Problema del viajante. (2018). *Problema del viajante*. Obtenido de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Problema_del_viajante
- Robotmer. (2012). *ABB IRB 1400 ROBOT POSITIONER ROTARY TABLE ARC WELDING* . Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=aJywzaIDmyU>
- Routhu, S. (2010). *2-D path planning for direct laser deposition process*. Missouri: Scholars' Mine.
- Ruan, J., Eiamsa-ard, K., & Liou, F. (2005). *Automatic Process Planning and Toolpath Generation of a Multiaxis Hybrid Manufacturing System*. University of Missouri-Rolla, Mechanical & Aerospace Engineering. Journal of Manufacturing

Processes.

Rui, W., Haiou, Z., Guilan, W., Shangyong, T., & Runsheng, L. (2017). *Generation of deposition paths and quadrilateral meshes in Additive Manufacturing*. Solid Freeform Fabrication Symposium .

Siemens PLM. (05 de 01 de 2017). *NX10.0.2 Hybrid Manufacturing for Rotary Part*.
Obtenido de Youtube:
<https://www.youtube.com/watch?v=ZiaEwsUx18s&t=715s>

tct magazine. (23 de 2 de 2017). *tct MAG*. Obtenido de
<https://www.tctmagazine.com/3d-software-news/renishaw-latest-quantam-3d-printing-software/>

Topcu, O., Tascioglu, Y., & Unver, H. O. (2011). *A method for slicing CAD models in binary STL format*. ResearchGate.

Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2004). *Laser Cladding*. Waterloo: CRC Press.

Ukar, E., & Lamikiz, A. (08 de 06 de 2015). *Fabricación aditiva: Qué es cada tecnología*.
Universidad del País Vasco UPV/EHU, Dpto. de Ingeniería Mecánica . Obtenido de
Interempresas:
<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/138289-Fabricacion-aditiva-Que-es-cada-tecnologia.html>

Wikipedia. (2018). *Regla de la mano derecha*. Obtenido de Wikipedia:
https://es.wikipedia.org/wiki/Regla_de_la_mano_derecha

Wulle, F., Coupek, D., Schäffner, F., Verl, A., Oberhofer, F., & Maier, T. (2017). *Workpiece and Machine Design in Additive Manufacturing for Multi-Axis Fused Deposition Modeling*. Control Engineering of Machine Tools & Manufacturing Units and Engineering Design & Industrial Design. Elsevier.

ANEXO I: NORMATIVA APLICABLE

Fabricación aditiva

Recientemente han sido publicadas las primeras ediciones de distintas normas relacionadas con los procesos de fabricación aditiva que incluyen descripciones de los fundamentos de los distintos procesos, categorías, terminología, ensayos y caracterización.

La norma **ISO 17296**, cuyo título es Fabricación aditiva, detalla los principios generales correspondientes a esta tecnología a través de 4 partes.

La primera parte de la norma, **ISO 17296-1** describe los principios generales y la terminología aplicada.

La parte 2, visión general de categorías de procesos y de materias primas, identificada como **UNE-EN ISO 17296-2:2017**, describe los fundamentos del proceso de fabricación aditiva, ofrece una visión general de las categorías de los procesos y los relaciona a la vez que explica los diferentes tipos de materiales empleados.

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN ISO 17296-2:2016 que a su vez adopta la Norma ISO 17296-2:2014.

La norma 3, características principales y métodos de ensayo correspondientes, **UNE-EN ISO 17296-3:2017**, comprende los principales requisitos relacionados con los ensayos de las piezas fabricadas mediante fabricación aditiva con el fin de facilitar la comunicación entre las diferentes partes sobre las características de la calidad.

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN ISO 17296-3:2016 que a su vez adopta la Norma ISO 17296-3:2014.

La parte 4, visión general del intercambio de datos, **UNE-EN ISO 17296-4:2017**, engloba las especificaciones sobre los términos y definiciones que permiten el intercambio de información que permitan fabricar piezas con esta tecnología. Esta parte de la norma esta dirigida entre otros, a usuarios y fabricantes de sistemas de softwares asociados.

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN ISO 17296-4:2016

que a su vez adopta la Norma ISO 17296-4:2014.

La norma combinada entre las asociaciones ISO y ASTM, **UNE-EN ISO/ASTM 52921:2017**, titulada sistemas de coordenadas y métodos de ensayo, incluye terminología, nomenclatura, acrónimos asociados en un esfuerzo por normalizar las bases de la tecnología.

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN ISO/ASTM 52921:2016 que a su vez adopta la Norma ISO/ASTM 52921:2013.

Productos láser

Los procesos de fabricación aditiva empleados en este trabajo disponen de un haz láser como fuente de energía para fundir el material. La normativa vigente y la seguridad a tener en cuenta referente a los productos láser viene especificada en la **UNE-EN 60825-1:2015**.

Esta norma, cuyo título es seguridad de los productos láser, describe mediante la parte 1 la clasificación de los equipos y los requisitos.

Es aplicable a la seguridad de los productos láser que emiten radiación en el intervalo de longitud de onda comprendido entre 180 mm y 1 mm, los cuales no requieren de un recinto donde se ha hecho vacío.

Los objetivos de esta parte de la norma son los siguientes: introducir un sistema de clasificación de láseres de acuerdo con su grado de peligro de radiación óptica, establecer los requisitos para que el fabricante dé la información para que puedan ser adoptadas las precauciones apropiadas, asegurar mediante instrucciones una advertencia adecuada y reducir la posibilidad de daño minimizando la radiación accesible y mejorando el control sobre las medidas protectoras.

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 60825-1:2014, que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 60825-1:2014. Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 60825-1:2008.