



Instituto Politécnico Nacional

Centro de Investigación en Computación

*“Algoritmo de segmentación para
para la reducción de tiempo de
fabricación en sistemas FDM”*

T E S I S

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
DE CÓMPUTO CON OPCIÓN EN SISTEMAS
DIGITALES**

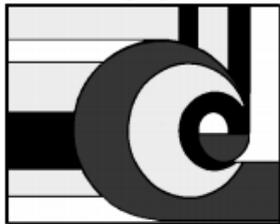
PRESENTA

ING. HUGO ALBERTO AVELINO HERNÁNDEZ

DIRECTORES:

DR. MARCO ANTONIO MORENO ARMENDÁRIZ

DR. ALFONSO GUTIÉRREZ ALDANA



MÉXICO D.F DICIEMBRE 2015



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 10:00 horas del día 27 del mes de noviembre de 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del:

Centro de Investigación en Computación

para examinar la tesis titulada:

“Algoritmo de segmentación para la reducción de tiempo de fabricación en sistemas FDM”

Presentada por el alumno(a):

Avelino

Apellido paterno

Hernández

Apellido materno

Hugo Alberto

Nombre(s)

Con registro:

B	1	3	0	0	6	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE CÓMPUTO CON OPCIÓN EN SISTEMAS DIGITALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de Tesis

Dr. Marco Antonio Moreno Armendáriz

Dr. Alfonso Gutiérrez Aldana

Dr. Sergio Suárez Guerra

Dr. Oleksiy Pogrebnyak

Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández

Dr. Francisco Hiram Calvo Castro

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Luis Alfonso Villalón



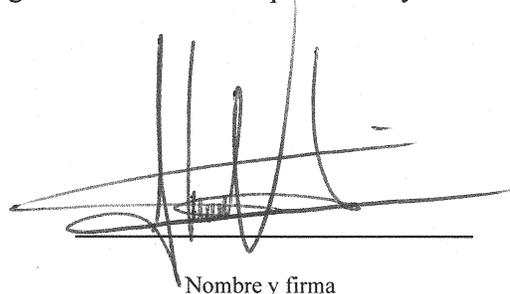


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 1 del mes diciembre del año 2015, el (la) que suscribe Hugo Alberto Avelino Hernández alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería en Computo con opción en Sistemas Digitales con número de registro B130067, adscrito al Centro de Investigación en Computación, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Marco Antonio Moreno Armendàriz y cede los derechos del trabajo intitulado “Algoritmo de segmentación para la reducción de tiempo de fabricación en sistemas FDM”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección hugo.avelinoh@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Nombre y firma

Resumen

El **prototipado rápido** y la **manufactura aditiva** son términos usados comúnmente en la industria para describir un conjunto de técnicas de fabricación de prototipos, maquetas o piezas por medio de la adición de material capa a capa, hasta obtener un objeto en tres dimensiones. En particular, el modelado por hilo fundido (**FDM**), es una técnica de manufactura aditiva la cual funciona a partir de un filamento de termoplástico el cual es fundido algunos grados por debajo del punto de fusión del material, el material es depositado de forma ordenada en cada capa como un hilo fundido que se solidifica inmediatamente sobre la capa precedente. En la mayor parte de los sistemas de segmentación FDM comerciales la división en capas del modelo 3D se realiza de manera uniforme y a una altura de capa fija para toda la pieza, manteniendo un compromiso entre una fabricación rápida con acabados burdos en la superficie o una fabricación lenta pero con un acabado superficial más fino. En esta tesis, se presenta un proceso alternativo que permite reducir los tiempos de fabricación entre un 20% y 50% del proceso original, tomando como base la fabricación del modelo 3D en dos flujos diferentes de inyección de material, el primero de estos, un flujo de inyección fino adecuado para las regiones externas del modelo y un flujo de inyección abundante para regiones internas de la pieza. La inyección dispar involucra la segmentación del modelo a dos alturas de capa distintas las cuales deben ser correctamente superpuestas a fin de ocultar los efectos de la burda fabricación interior del modelo, independientemente de la complejidad geométrica del modelo CAD 3D. El algoritmo de segmentación procesa el modelo CAD y entrega como resultado una serie de comandos que describen las rutas de inyección dispar de material para un sistema FDM de arquitectura abierta tipo REPRAP. En dicho sistema se fabricaron dos grupos de piezas, el primer grupo fabricado mediante el proceso tradicional y el segundo grupo mediante inyección dispar, para después comprar ambos grupos en un conjunto de atributos objetivos (dimensiones, peso, densidad, rugosidad y resistencia mecánica) y otros subjetivos (apariencia externa, cantidad de defectos y calidad visual), donde se obtuvo como resultado que las piezas fabricadas mediante inyección dispar mantienen características similares de dimensiones, peso y rugosidad, así como una evaluación equivalente en los atributos subjetivos, respecto de las piezas fabricadas mediante el proceso tradicional.

Abstract

Rapid Prototyping and Additive Manufacturing are terms commonly used in the industry to describe a set of techniques for manufacturing prototypes, models or parts adding materials layer by layer, until to get an object in three dimensions. Particularly the Fused Deposition Modelling (FDM), is an additive manufacturing technique which operates with a molten thermoplastic filament which is molten several degrees below the melting point, the material is orderly deposited in each layer as a thread which immediately solidifies on the preceding layer. Most commercial FDM commercial slicing systems use uniform slicing procedures with a fixed layer thickness to build the entire part, keeping a compromise between rapid manufacturing and rough surface or slow production but with a smooth surface. This thesis, proposes an alternative approach that reduces the building time by 20% and 50% of the original process, using two material injection flows to build a part. The first of these flows, is a thin injection suitable for the outer regions and abundant flow injection for internal part's regions. To implement this was necessary develop a slicing algorithm that allows slice the model in two different layer thickness where the layers should be correctly overlapped to hide the gross internal manufacturing, regardless of geometric complexity of 3D CAD model. The slicing algorithm processes the CAD model and delivery as a result a set of commands that describe routes and paths for material injection in an open source FDM system based on REPRAP machines. In that system was built two set of parts, the first batch manufactured by the traditional process and the second group were built by the process developed in this work, both group of parts were compared in a set of objective attributes (dimensions, weight, density, roughness and strength) and subjective attributes (external appearance, amount of defects and visual quality). Resulting that the parts manufactured by the process discussed in this work have similar characteristics of size, weight and roughness as well as an equivalent evaluation in subjective attributes regarding parts manufactured by the traditional process.

Agradecimientos

¿Cómo agradecer y devolver a tantas personas que has intervenido en mis acciones y motivaciones para al final lograr el documento aquí presente? En primera instancia debo el llegar aquí a mis padres, quienes gracias a su apoyo y consejo he avanzado por toda mi educación.

A mi novia (*la flaca*) que siempre me ha motivado a seguir adelante, gracias por tu paciencia, consejos y cariño incondicional.

A mis compañeros de la maestría que me han acompañado a en buenos y no tan buenos momentos dentro de esta parte de nuestra formación.

Al Instituto Politécnico Nacional y el CONACyT, pues es gracias a su apoyo económico, instalaciones, profesores, técnicos y administrativos que han provisto una segunda casa donde formar mi educación profesional.

Y a mis asesores por sus observaciones y el apoyo en el desarrollo de esta tesis.

Contenido

CONTENIDO	VIII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS	XV
LISTA DE ECUACIONES	XV
GLOSARIO	XVI
ABREVIATURAS	XIX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Aplicaciones de las tecnologías de manufactura aditiva	4
1.2 Técnicas de manufactura aditiva	5
1.3 Modelado por hilo fundido (FDM).	7
1.4 Planteamiento del problema.	10
1.5 Justificación del trabajo.	11
1.6 Hipótesis	12
1.7 Objetivos	14
1.7.1 Objetivo general	14
1.7.2 Objetivos particulares	14
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	19
2.1 Segmentación adaptativa	20
2.2 Segmentación directa	22
CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO	25
3.1 Sistemas FDM de bajo costo	25
3.2 Códigos máquina	29
3.3 El formato STL	31
3.4 Modelado por hilo fundido, descripción del proceso y limitaciones	33

CAPÍTULO 4	PROCESO DE SEGMENTACIÓN POR INYECCIÓN DISPAR.....	41
4.1	Carga en memoria del modelo 3D.....	43
4.2	Segmentación del modelo en capas	44
4.3	Identificación de regiones de superficie externas, internas y soportes.....	53
4.3.1	Trazado de patrón de rejilla y corrimiento	55
4.3.2	Operaciones booleanas entre vectores colineales (OBVC).	60
4.3.3	Identificación de regiones externas planas	63
4.3.4	Identificación de regiones de relleno interno.....	66
4.3.5	Identificación de regiones de soporte	69
4.4	Selección de capas para relleno dispar	72
4.5	Cálculo de saltos y vectores adicionales.....	74
4.6	Traducción a códigos máquina.....	77
4.7	Incorporación de rutinas adicionales.....	79
CAPÍTULO 5	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	81
5.1	Resultados de la segmentación.	81
5.2.1	Resultados de la segmentación por capas del modelo.....	82
5.2.2	Resultados en la identificación de regiones de relleno y superficie.	83
5.2.3	Vectores de adicionales y de salto	87
5.2	Estudio de tiempos de fabricación.	87
5.2.1	Estudio de tiempo de fabricación en modelos sencillos	89
5.2.2	Estudio del tiempo de fabricación en modelos complejos	92
5.3	Estudio comparativo de características objetivas.....	97
5.3.1	Estudio comparativo de peso y dimensiones	98
5.3.2	Estudio comparativo de resistencia mecánica	99
5.3.3	Estudio comparativo de rugosidad superficial.....	101
5.4	Estudio comparativo de características subjetivas	103
5.4.1	Características e imperfecciones a evaluar	104
5.4.2	Resultados de la encuesta	106
CAPÍTULO 6	CONCLUSIONES	109
6.1	Trabajo futuro	111
REFERENCIAS	112
ANEXOS	117
Anexo A	Notación manejada.....	117

Anexo B	Especificaciones impresora 3D ZCube Dual	119
Anexo C	Diagrama de clases del proyecto	120
Anexo D	Hoja de especificaciones de máquina de esfuerzos	121
Anexo E	Resultados de mediciones de rugosidad.....	122
Anexo F	Preguntas y resultados de encuesta realizadas.....	123

Lista de figuras

Figura 1	Proceso genérico de la manufactura aditiva [1].	3
Figura 2	Aplicaciones de las técnicas de manufactura aditiva.	5
Figura 3	Clasificación de las técnicas de Manufactura aditiva [5].	7
Figura 4	Esquema del cabezal de extrusión en un sistema FDM	8
Figura 5	Compromiso del acabado superficial entre una altura de capa pequeña y grande. [1]	9
Figura 6	Proceso de aproximación entre objeto fabricado y superficie ideal.	10
Figura 7	Inyección dispar de material.	13
Figura 8	Propuesta de desarrollo de algoritmo de segmentación	15
Figura 9	Errores presentes en el proceso de segmentación [10].	19
Figura 10	Ejemplos de segmentación adaptativa.	21
Figura 11	Fab@home Model 1.	26
Figura 12	Reprap Mendel segunda generación. [22].	27
Figura 13	Elementos de un sistema FDM de tipo REPRAP. [22].	28
Figura 14	Ejemplo de traducción a códigos máquina. [24].	30
Figura 15	Ejemplo de tetraedro descrito por un archivo STL.	32
Figura 16	Pieza fabricadas por FDM.	34
Figura 17	Pieza con base de fabricación	35
Figura 18	Contorno de generados por el proceso de segmentación.	36
Figura 19	Flexionamiento en áreas de superficies planas. a) 1 sola capa b) múltiples capas de relleno solucionan el problema de flexionamiento.	37
Figura 20	Regiones de proceso FDM de una capa.	38
Figura 21	Corte lateral de una pieza fabricada por FDM.	38
Figura 22	Ventilador con soportes.	39
Figura 23	Diagrama de flujo del proceso de segmentación de un modelo 3D.	42
Figura 24	Modelo CAD descrito por triángulos	43
Figura 25	Diagrama de flujo de apertura de archivo STL binario.	44

Figura 26 Cálculo de intersección entre plano de corte y plano triangular a una altura Z dada.	46
Figura 27 Principio de corte en modelo 3D [27].....	47
Figura 28 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores de contorno.	47
Figura 29 Tres vértices sobre el plano de corte.	48
Figura 30 Dos vértices sobre el plano de corte.....	49
Figura 31 Un vértice sobre el plano.....	49
Figura 32 Ningún vértice sobre el plano.	50
Figura 33 Ejemplo de vector orientado en dirección incorrecta.....	51
Figura 34 Orientación de contornos.	51
Figura 35 Modelo 3D segmentado por capas (contornos).....	52
Figura 36 Ejemplo de corrimiento de contornos.	53
Figura 37 Ejemplo de intersección en 3 polígonos compuestos.....	54
Figura 38 Ejemplo de trazo rejilla <i>zig-zag</i>	54
Figura 39 Ejemplo de patrones de rejilla en regiones planas externas y regiones internas en una capa.	56
Figura 40 Búsqueda de segmentos que intersecan la línea de corte.....	56
Figura 41 Ejemplo de regla impar-par.....	57
Figura 42 Errores en la regla impar-par.....	58
Figura 43 Detección de áreas internas usando vector normal.	59
Figura 44 Ejemplo de corrimiento externo.....	59
Figura 45 Ejemplo de patrón de rejilla paralelo al eje X.....	60
Figura 46 Ejemplo de superposición entre vectores colineales.....	60
Figura 47 Cálculo de la unión entre dos vectores superpuestos.....	61
Figura 48 Cálculo de la intersección entre dos vectores superpuestos.....	62
Figura 49 Cálculo de diferencia entre dos vectores superpuestos.....	63
Figura 50 Ejemplo de cálculo de un segmento del patrón de rejilla para regiones externas planas.....	64
Figura 51 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores para regiones externas planas.	65
Figura 52 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores de las regiones internas de relleno.	67

Figura 53 Ejemplo de cálculo de un segmento del patrón de rejilla para regiones de relleno interno.....	68
Figura 54 Diagrama de flujo para cálculo de vectores de las regiones de soporte.....	70
Figura 55 Ejemplo del cálculo de un segmento del patrón de rejilla de las región de soportes.	71
Figura 56 Diagrama de flujo para la selección de capas de relleno dispar.....	73
Figura 57 Resultado de la selección de vectores por inyección dispar.	74
Figura 58 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores de salto y vectores adicionales....	75
Figura 59 Resultado del trazado de vectores adicionales y saltos en una capa.	76
Figura 60 Descripción de movimiento controlado	77
Figura 61 Directivas iniciales para impresora 3D Zcube	80
Figura 62 Código G adicional al final del archivo para impresora 3D Zcube ⁵	80
Figura 63 Error en cálculo de áreas internas (corte transversal).	82
Figura 64 Modelos prueba complejos segmentados en capas de 1mm.	84
Figura 65 Trazos de vectores en fabricación por inyección dispar de material.	85
Figura 66 Regiones de relleno y superficie en diversas capas de los modelos prueba complejos (corte transversal).....	86
Figura 67 Resultados en el cálculo de vectores de adicionales y de salto en los modelos prueba complejos (corte transversal).....	88
Figura 68 Modelos de estudio altura extensión.	89
Figura 69 Tendencia tiempos de fabricación modelos solidos.....	91
Figura 70 Modelos prueba.....	92
Figura 71 Impresora 3D Zcube.	93
Figura 72 Cubo. <i>ReplicatorG</i> (izquierda) inyección dispar (derecha).	94
Figura 73 Edificio MIT. <i>ReplicatorG</i> (izquierda) inyección dispar (derecha).....	94
Figura 74 Mano. <i>ReplicatorG</i> (izquierda) inyección dispar (derecha).....	94
Figura 75 Soporte mecánico. <i>ReplicatorG</i> (izquierda) inyección dispar (derecha).	95
Figura 76 Oso. <i>ReplicatorG</i> (izquierda) inyección dispar (derecha).....	95
Figura 77 Turbina. <i>ReplicatorG</i> (izquierda) inyección dispar (derecha).	95
Figura 78 Grafico de tiempos de fabricación registrados.....	96

Figura 79 Reducción porcentual de los tiempos de fabricación de los modelos usando inyección dispar.....	97
Figura 80 Comparativo de densidades relativas a la densidad del PLA.....	99
Figura 81 Probetas antes y después de la prueba de tensión (arriba proceso tradicional, abajo inyección dispar).....	100
Figura 82 Esquema demostrativo de parámetros de mediciones en rugosidad.	102
Figura 83 Imagen equipo medición rugosidad.	102
Figura 84 Modelos prueba de ambos grupos.....	104
Figura 85 Imperfecciones presentes en piezas fabricadas	105
Figura 86 Comparativo general de imperfecciones.....	107
Figura 87 Comparativo de imperfecciones por pieza.....	107
Figura 88 Evaluación visual de calidad.....	108

Lista de Tablas

Tabla 1 Valores usados en la traducción de los vectores a códigos de movimiento controlado.....	78
Tabla 2 Tiempos registrados en estudio extensión altura.....	90
Tabla 3 Tiempos de fabricación registrados.....	96
Tabla 4 Registro de volumen, peso y densidad	98
Tabla 5 Resultados de prueba de esfuerzos a tensión.....	101
Tabla 6 Resultados mediciones de rugosidad.....	103

Lista de ecuaciones

Ecuación 1	Ecuación paramétrica de la recta.....	45
Ecuación 2	Sustitución de la altura de corte en ecuación 1.....	45
Ecuación 3	Despeje de la variable independiente.....	45
Ecuación 4	Segunda condición de corte vector contorno con línea de corte.....	57
Ecuación 5	Cálculo de intersección entre línea de corte y vector contorno.....	57
Ecuación 6	Condición de superposición de vectores colineales.....	60
Ecuación 7	Superposición izquierda.....	61
Ecuación 8	Superposición derecha.....	61
Ecuación 9	Superposición completa.....	61
Ecuación 10	Superposición menor.....	61
Ecuación 11	Separación de rejilla en regiones de relleno interno.....	68

Glosario

3D. Tres dimensiones, se refiere a que un objeto debe de contar con un ancho, profundidad y altura.

Altura de capa. Es el grosor o la altura respecto del eje perpendicular a la base de construcción del modelo 3D segmentado, entre más pequeño sea este valor más tiempo será necesario para la fabricación del modelo, los valores típicos van de 0.1 a 0.4 mm.

Borde. Un borde o línea es un elemento de una dimensión que conecta dos vértices, de los cuales uno de estos es llamado cabeza y el otra llamado cola con el fin de asignar una dirección al borde descrito.

CAD (*Computer Aided Desing*). Diseño asistido por computadora, se refiere al uso de sistemas computacionales como apoyo en la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño para la fabricación de un producto. También apoya en la documentación del proceso de diseño.

Cara. Una cara es una superficie plana de dos dimensiones y es delimitada por al menos tres vértices. La parte externa de la cara puede ser especificada por medio de un vector normal perpendicular a la cara de la superficie en cuestión.

Capa. Sección horizontal bidimensional y paralela a la base de construcción del modelo 3D, tiene asociado un grosor o altura de capa, la cual es la base para la división del modelo 3D.

Contorno. Un contorno es una colección de bordes alineados, contiguos y que forman circuitos cerrados, sobre el plano descrito por una capa del modelo a segmentar.

Densidad de relleno. Factor que define el grado de relleno de una pieza, por medio de un porcentaje que se relaciona de manera directa al espacio libre dejado por el mallado interno del objeto fabricado.

Diámetro de filamento. Diámetro físico del filamento que se ingresa en el cabezal de la impresora 3D.

FDM (*Fused Deposition Modelling*). Modelado por Hilo Fundido. Técnica para la manufactura aditiva que consiste en el calentamiento de un material termoplástico y depósito de manera ordenada capa a capa, para la fabricación de un modelo CAD 3D.

FiveD. Estándar de códigos máquina para impresoras 3D que trata como dimensiones independientes las coordenadas en los ejes X, Y y Z, agregando a E, como la cantidad de material a depositar y F la velocidad a la que se realizará un movimiento dado.

Grosor de boquilla. Diámetro físico de la boquilla que deposita el plástico fundido durante la fabricación del modelo, el valor por *default* de la impresora 3D usada es de 0.4 mm.

Impresora 3D. Máquina que permite la fabricación de un objeto físico tridimensional, mediante alguna técnica de manufactura aditiva.

Impresión 3D. Sinónimo popular de un proceso de manufactura aditiva.

MA. Manufactura aditiva. Conjunto de técnicas para la fabricación de objetos físicos tridimensionales, mediante la agregación de material en capas sucesivas.

Segmentador. Es un algoritmo que se encarga de dividir un modelo 3D en capas. Las cuales son a su vez procesadas para el cálculo y generación de las rutas que debe de seguir una impresora 3D. El término se obtuvo de la traducción literal del inglés donde a este tipo de algoritmos se les conoce como *slicer algorithm*.

Termoplástico. Es un plástico que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente.

Temperatura de cabezal. Temperatura a la cual debe ser regulada la temperatura del cabezal de inyección de plástico para fundir correctamente el termoplástico a depositar mientras se fabrica el modelo, la temperatura de trabajo depende esencialmente del material con el cual se esté trabajando.

Triángulo. Plano delimitado por tres vértices, donde cada vértice contiene una componente en cada eje coordenado de un espacio tridimensional $[x, y, z]$.

Vectores de contorno. Son vectores que definen la periferia del modelo 3D sobre el plano de cada capa. Los conjuntos de vectores son acomodados de manera consecuyente uno detrás de otro, formando siempre circuitos cerrados.

Vectores de relleno. Los vectores de relleno definen las rutas a seguir para llenar el interior de la pieza a fabricar. La pieza se puede hacer de manera completamente solida o se puede modular por medio de una densidad de relleno si se desea ahorrar tiempo de fabricación y material.

Vectores de soporte. Los vectores de soporte definen las rutas de inyección de plástico en cada capa que se deben generar para soportar estructuras superiores, en caso de ser necesarias, pues dependiendo de la geometría del modelo, en ocasiones se requiere de estructuras que soporten partes del modelo que no tienen una base sobre la cual caer.

Vectores de superficie. Definen los vectores necesarios para la creación de una superficie cerrada, pues los vectores de contorno solo definen la periferia del modelo y existen secciones que se encuentran abiertas.

Velocidad de extrusión. Es la velocidad a la cual se desplazará el cabezal de inyección de plástico mientras se deposita material para la fabricación del modelo.

Velocidad de movimiento. Es la máxima a la cual se desplazará el cabezal de inyección de plástico mientras no se deposite material.

Vértice. Se refiere a una entidad de dimensión cero (Punto) en el espacio 3D y se encuentra definidos por tres coordenadas.

Abreviaturas

3D. Tres Dimensiones.

ABS. Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrilonitrilo butadieno estireno)

AM. Additive Manufacturing (manufactura aditiva).

CILC. Calculo de intersección línea-contorno.

CIPL. Calculo de intersección plano-línea .

CNC. Control Numerical Control (Control numérico por computadora)

DAI. Detección de Áreas Internas.

FDM. Fused Deposition Modeling (Modelado por hilo fundido).

LOM. Laminated Object Manufacturing (Fabricación por corte y laminado).

MA. Manufactura Aditiva.

OBVC. Operaciones booleanas entre vectores colineales.

OVC. Orientación de vectores de contorno.

PC. PolyCarbonate (Policarbonato)

PLA. PolyLactic Acid (Ácido poliláctico)

RP. Rapid Prototyping (Prototipado rápido).

SGC. Solid Ground Curing (Fotopolimerización por luz ultravioleta).

SLA. StereoLitogrAphy (Estereolitografía).

SLS. Selective Laser Sinterization (Sinterización selectiva láser).

Capítulo 1 Introducción

El **Prototipado Rápido** (*Rapid Prototyping*), es un término comúnmente usado en la industria para describir un conjunto de técnicas de fabricación de prototipos, maquetas o piezas por medio de la adición de material capa a capa, hasta obtener un objeto en 3 dimensiones. En este caso, el término enfatiza la rápida creación de algo que tiene el objetivo de ser un prototipo o modelo base, permitiendo efectuar en un tiempo corto pruebas de apariencia, ergonomía y validación de la geometría definitiva, a fin de acometer la producción de un producto de manera anticipada. Por otro lado cabe destacar, que el crecimiento y adopción de estas tecnologías a nivel doméstico ha hecho que en los últimos años se popularice el término de **impresión 3D**, un nombre más comercial y de fácil interpretación para el usuario común. Sin embargo, la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) acordó adoptar el término de **Manufactura aditiva (MA)**, como un nombre más adecuado para describir a los procesos de fabricación de objetos mediante la adición sucesiva de capas [1].

El principio base del proceso de manufactura aditiva (MA) [2] es la división de un modelo virtual 3D en capas, donde cada capa es una sección horizontal paralela a la base de construcción, con un grosor definido, así en cada capa se trazan rutas para el depósito o solidificación del material que formará la pieza a construir. La simplificación en la planeación de la fabricación del objeto es consecuencia del proceso de construcción por capas, pues a diferencia de métodos como son el maquinado CNC, aquí no se requiere de una cuidadosa planeación, selección de herramientas y materiales.

Aun cuando la fabricación de objetos por medio de la tecnologías de MA, son más sencillos que los procesos tradicionales de manufactura (como son la inyección de plástico o el mecanizado), las técnicas desarrolladas requieren de una serie de pasos los cuales deben ser cumplidos a fin de poder obtener un objeto palpable y con las características deseadas. A continuación se describen cada uno de los pasos:

1. **Generación del modelo virtual.** Para la generación de modelos en 3D existen básicamente dos opciones, la primera es la tradicional elaboración del modelo por

medio de un software de diseño 3D, como son SolidWorks, AutoCAD, Rhino, 3DMax, etcétera, donde mediante operaciones de extrusión, rotación, espejo, deformaciones, cortes, entre otras, es posible generar volúmenes.

La segunda forma de obtener un modelo 3D es mediante el escaneo de formas u objetos en 3 dimensiones, por medio del uso de equipo especializado que registra las medidas y coordenadas en el espacio de un objeto para generar un modelo 3D virtual.

- 2. Conversión al formato estándar del software de MA.** Mucho del software CAD maneja su propio formato que describe al modelo 3D, de manera tal que existe una gran cantidad de formatos, donde cada uno de estos puede contener más o menos características, como son colores, materiales o texturas. Sin embargo, desde ya hace varios años, el formato más comúnmente usado en máquinas de MA es el formato *.STL.
- 3. Configuraciones de la máquina.** Dependiendo del proceso de manufactura aditiva, es importante realizar las configuraciones de algunos parámetros asociados al método de fabricación, a fin de optimizar el material o mejorar el acabado de las piezas fabricadas. Sin embargo, uno de los parámetros más relevantes es la altura de capa, pues a una capa más fina, el modelo tendrá un mejor acabado, pero el tiempo de fabricación será mayor.
- 4. Segmentación del modelo.** Una vez que el modelo ha sido exportado al formato aceptado por el sistema de manufactura aditiva, este archivo debe ser convertido en las rutas que la máquina debe de seguir a fin de depositar el material capa a capa. Este paso es crucial en la fabricación del modelo, pues aquí es donde se divide el modelo por capas y se definen las rutas que la máquina debe de seguir a fin de obtener al modelo a fabricar.
- 5. Fabricación.** Es el proceso en el cual se fabrica el modelo, existe una gran diversidad de técnicas desarrolladas para la fabricación de modelos por medio de técnicas de manufactura aditiva, pero en general se pueden mencionar como principales las técnicas basadas en resinas fotosensibles, polvos, laminación y adición de material fundido. De acuerdo a la técnica utilizada, el modelo fabricado tendrá diferentes propiedades en apariencia, calidad, colores y porosidad.

6. **Extracción de la máquina.** En este paso se retira la pieza fabricada de la máquina, el proceso varía de acuerdo a la técnica usada en la fabricación del modelo, así como los métodos de extracción que en algunos casos es más complicado que en otros.
7. **Post-Procesamiento.** Es la etapa de limpieza y mejora de las propiedades de las piezas obtenidas, el objetivo en este paso es la mejora de las propiedades de la pieza obtenida, entre los tratamientos se pueden mencionar el tallado, cromado, tratamientos térmicos o pulidos.
8. **Aplicación.** En este paso el objeto fabricado es usado para lo cual fue destinado, prestando atención a las características para las cuales el objeto fue planteado, por ejemplo en arquitectura los modelos regularmente tienden a tener características más estéticas, sin embargo cuando se habla de prototipos funcionales la apariencia se deja un poco de lado pero se requiere de mayor durabilidad y resistencia.

En la Figura 1 se puede apreciar cada uno de los pasos antes mencionados.



Figura 1 Proceso genérico de la manufactura aditiva [1].

1.1 Aplicaciones de las tecnologías de manufactura aditiva

Existen diversas aplicaciones y usos para las tecnologías de manufactura aditiva (MA), pues la principal ventaja de su uso, es la relativa rapidez y facilidad para la construcción de estructuras y formas complejas, que además son fabricadas en horas o días a diferencia de los métodos tradicionales de fabricación como son la inyección de plástico (desde su planificación hasta que se realiza está) o el maquinado CNC, los cuales pueden llegar a tardar semanas o meses para la fabricación de un prototipo o producto. En este contexto, las tecnologías de MA, apoyan en la evaluación de tres aspectos fundamentales del diseño y fabricación de un nuevo producto: la forma, el ajuste y la función. La evaluación de la geometría, tamaño y apariencia de un prototipo son aspectos relativos a la evaluación de la forma. Los ajustes de tolerancias y precisión en ensambles corresponden a evaluaciones de ajuste. Finalmente la evaluación en aspectos relativos a la ergonomía y correcta manipulación del prototipo desarrollado corresponden a la evaluación de la función.

Decir que las aplicaciones de las tecnologías de MA, se limitan a la fabricación de modelos conceptuales y prototipos, resulta inadecuado, especialmente por las capacidades de esta tecnología y los usos que se le han concedido en últimos años, de esta manera una forma resumida para clasificar las aplicaciones de las tecnologías de MA es la siguiente:

Modelos conceptuales. Ayudan a evaluar, optimizar y comunicar el diseño de un prototipo en etapas tempranas del desarrollo de producto, reduciendo tiempo y costos de desarrollo.

Prototipos funcionales. Se puede hacer uso de la pieza o parte fabricada como un prototipo funcional, permitiendo hacer pruebas reales e identificando fallos o problemas en etapas tempranas del diseño.

Producción personalizada (*mass customization*). Se puede producir partes únicas o pequeños lotes de un producto prueba, sin tener que realizar una inversión considerable en moldes de inyección de plástico.

Sustitución de partes. Útil en reparaciones y recambio de partes en maquinaria, instrumentos y/o artículos personales de difícil acceso, evitando tiempos y costos de entrega.

Otra clasificación más específica de las aplicaciones y uso de las tecnologías de MA [3], es provista por Jarkko Moilanen en su encuesta hecha en septiembre del 2013 a los usuarios de tecnologías de MA; dicha clasificación puede ser vista en la Figura 2.

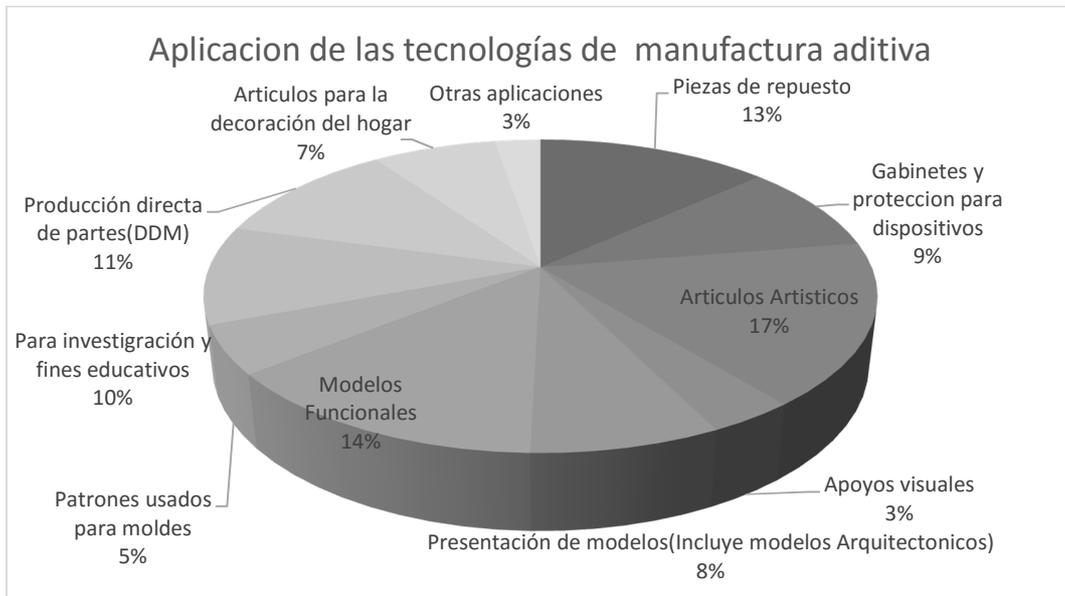


Figura 2 Aplicaciones de las técnicas de manufactura aditiva.

1.2 Técnicas de manufactura aditiva

Existen diversas técnicas de manufactura aditiva (cerca de 30 diferentes técnicas), cada una con características de acabados, texturas, resistencia y durabilidad, sin embargo, una de las clasificaciones más comunes es de acuerdo al principio base de la técnica de adición de material [4], donde las tecnologías más difundidas en la actualidad son:

SLA (Estereolitografía).- Emplea un láser UV que se proyecta sobre un baño de resina fotosensible líquida para polimerizarla. También la podemos encontrar con la denominación de STL.

SOLIFORM. Está basado esencialmente en los principios descritos para SLA, sin embargo se hace uso de una resina acrílica de uretano que presenta mejores propiedades. En esta adquiere mayor significancia la precisión del haz del láser y las propiedades de la resina.

SGC. Fotopolimerización por luz UV. Se basa en la solidificación de un fotopolímero o resina fotosensible, sin embargo, se irradia con una lámpara de UV de gran potencia todos los puntos de la sección simultáneamente.

FDM. Modelado por hilo fundido.- Una boquilla que se mueve en el plano X-Y horizontal y paralelo a la plataforma de construcción, depositando un hilo de material a algunos grados por debajo de su punto de fusión, de esta manera el hilo solidifica inmediatamente sobre la capa precedente.

SLS. Sinterización selectiva láser.- Se deposita una capa de polvo, de unas décimas de milímetro, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser CO² sinteriza el polvo en los puntos seleccionados.

LOM. Fabricación por corte y laminado.- Una hoja de papel recortado con la forma de la capa de interés se posiciona automáticamente sobre una plataforma y se prensa con un rodillo caliente que la adhiere a la hoja precedente.

DSPC. Proyección aglutinante.- Esta tecnología trabaja mediante la deposición de material en polvo en capas y la ligazón selectiva del mismo mediante la impresión de "chorro de tinta" de un material aglutinante.

PLT. Emplea el mismo enfoque básico de construcción que la utilizada para LOM, sin embargo la maquinaria de Kira Solid Center opera de una manera diferente. El proceso se basa en el principio de fotocopia. En una impresora láser típica se utiliza tóner, en PLT usa un polvo de resina en su lugar, aplicando la resina al papel en la posición exacta indicada por los datos de la sección para adherir las dos capas adyacentes de papel e imprimir el contorno de la sección transversal deseada.

3DP. Impresión 3D. Se extiende una capa de polvo sobre una plataforma en un pistón y acto seguido se realiza la impresión de una solución de aglutinante sobre el polvo suelto, formando

así las distintas secciones transversales que conforman el modelo. Este aglutinante mantendrá el polvo fijado mientras que el resto de polvo permanece suelto.

En la Figura 3 se muestra otra clasificación de las tecnologías de MA, en un arreglo de 2 dimensiones, donde se especifica la capacidad para solidificar cada capa del modelo y el principio base de la técnica de fabricación.

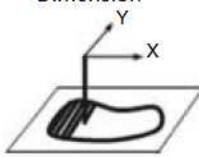
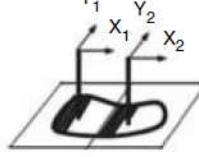
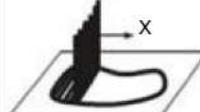
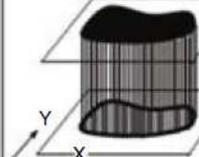
	Canal de 1 Dimensión 	2 Canales de 1 Dim 	Arreglo de canales de 1 Dimensión 	Canal de 2 Dimensiones 
Polímeros líquidos	SLA (3D Sys)	Dual beam SLA (3D Sys)	Objet	Envisiontech MicroTEC
Partículas discretas	SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM	LST (EOS)	3D Printing	DPS
Material Fundido	FDM, Solidscape		ThermoJet	
Hojas solidas	Solido PLT (KIRA)			

Figura 3 Clasificación de las técnicas de Manufactura aditiva [5].

1.3 Modelado por hilo fundido (FDM).

El modelado por hilo fundido o *Fused Deposition Modelling* (FDM), es una de las técnicas de manufactura aditiva basada en la extrusión de un material, proceso que fue desarrollado por S. Scott Crump a finales de los años 80 y a principios de los años 90 inició su comercialización por la compañía americana Stratasys Ltd, la cual lleva más de 20 años fabricando máquinas que trabajan este tipo de tecnología y cuenta con máquinas de gama baja con precios de alrededor de los 9000 dólares americanos en su serie “*Mojo*” hasta

máquinas producción de alto desempeño en su serie “Fortus” con precios superiores a los 100 000 dólares americanos [6].

El componente principal del FDM es la cámara de calentamiento (véase Figura 4), donde un filamento termoplástico es fundido a una temperatura controlada algunos grados debajo del punto de fusión del material que será inyectado, para después ser depositado por medio de una boquilla de un diámetro determinado. El cabezal de extrusión del filamento, es una unidad móvil que se desplaza de manera horizontal a la plataforma de construcción, y que deposita material de forma controlada en cada capa. El sistema completo es usualmente manejado por medio de un sistema embebido dentro de la máquina que controla los movimientos del cabezal en el plano X-Y, la velocidad a la que se inyecta el material, la temperatura de la cámara de calentamiento, así como elementos de interfaz con el usuario de la máquina, como son un teclado y una pantalla que despliega información de los avances y parámetros de fabricación de la pieza.

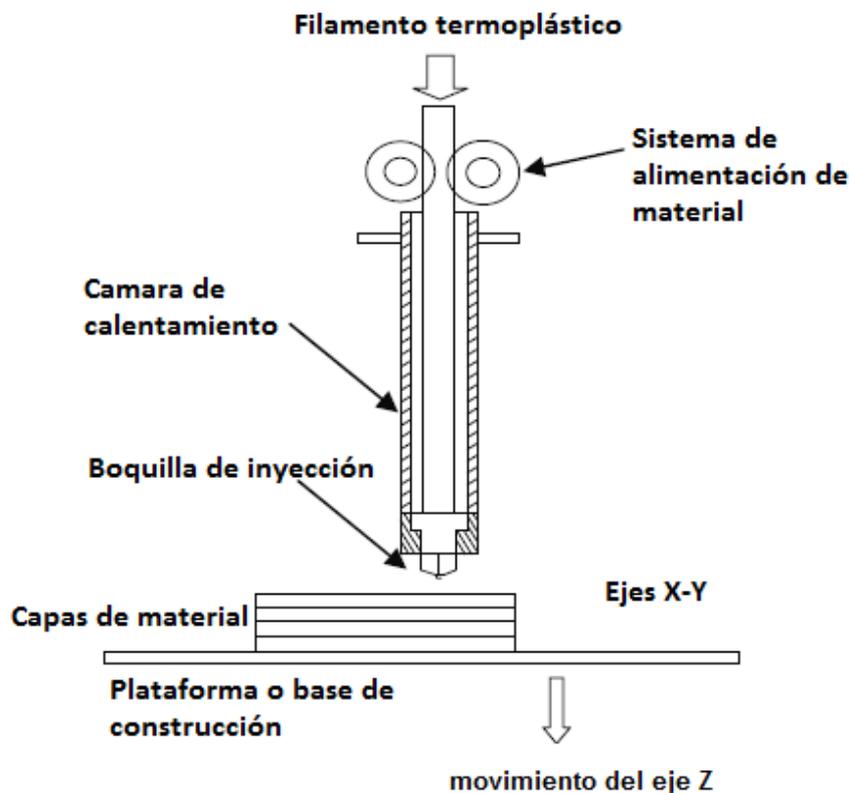


Figura 4 Esquema del cabezal de extrusión en un sistema FDM

Una de las partes de mayor importancia del sistema FDM es la boquilla de inyección, donde el diámetro de la misma está directamente relacionado con el diámetro del filamento que alimenta al cabezal de extrusión y la altura de capa que puede manejar el sistema. En otras palabras, si se cuenta con un mayor diámetro de boquilla es posible aumentar el flujo de depósito de material pero perdiendo precisión en la pieza fabricada y de manera inversa, con una boquilla pequeña se pueden manejar flujos de material más pequeños, alturas de capa más bajas y mejorar el acabado superficial de las piezas. Sin embargo, a la fecha la mayor parte de los sistemas FDM comerciales trabajan con diámetros de boquilla fijos de entre 0.3 y 0.7 milímetros.

Por otro lado las estrategias de segmentación de los sistemas FDM comerciales solo trabajan a una altura de capa, lo cual genera un compromiso entre piezas con acabados burdos, pero fabricadas rápidamente o piezas con acabados más lisos, pero con un tiempo de fabricación más extenso, que en algunos casos llega a ser impráctico e inaceptable. De manera que si se tiene una altura de capa relativamente grande (mayor a 0.3 mm), el tiempo de fabricación será corto, pero los acabados de las piezas serán burdos y rugosos; y en el caso opuesto si se tiene una altura de capa pequeña (entre 0.05 y 0.10 mm) los tiempos de fabricación se alargan de manera considerable, pero se logran acabados más lisos en la pieza a fabricar, como los que se aprecian en la Figura 5 donde se observan los efectos de la fabricación de la segmentación de un modelo a dos diferentes alturas de capa.

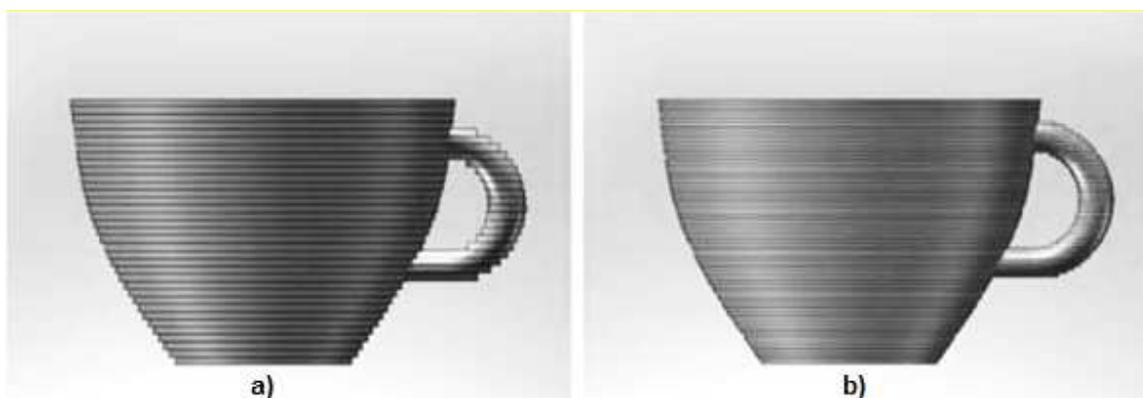


Figura 5 Compromiso del acabado superficial entre una altura de capa pequeña y grande. [1]

1.4 Planteamiento del problema.

Una de las consecuencias del proceso de construcción por capas del modelo, es que el objeto después de ser dividido en capas se convierte en una aproximación del modelo virtual, pues cada capa lleva asociada consigo una altura o grosor (véase Figura 6). Así de esta forma, el uso de capas más finas produce un objeto más cercano al modelo virtual, con terminados más suaves, pero que conlleva un mayor tiempo en su fabricación y de manera opuesta para mayores alturas de capa el tiempo de fabricación se reduce, a costa del terminado más burdo de la pieza, donde se tiene un acabado más irregular. El acabado de la superficie de una pieza fabricada por FDM, se relaciona con el tiempo de fabricación necesario para obtener la pieza, pues entre mejores terminados se deseen más es el tiempo necesario para la fabricación de los modelos, y viceversa. Por lo que el acabado superficial de un modelo está directamente relacionada a la altura de capa, donde si se desea mejorar el acabado de las piezas, es necesario reducir la altura de cada capa, generando más capas por consiguiente, pero incrementado el tiempo de fabricación, que puede llegar a niveles inaceptables.

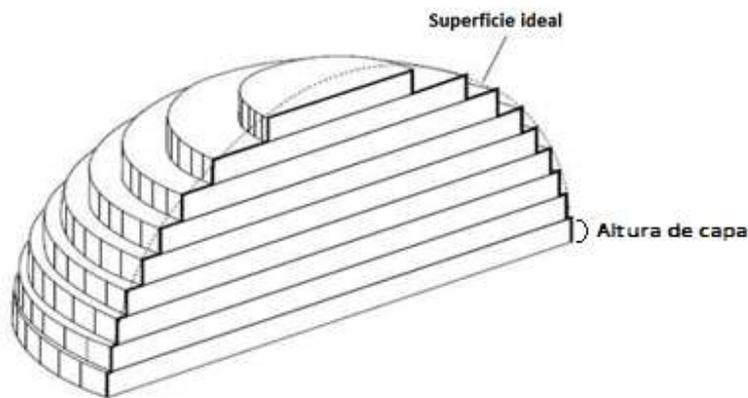


Figura 6 Proceso de aproximación entre objeto fabricado y superficie ideal.

En este contexto, la reducción de los tiempos de fabricación en sistemas FDM resulta relevante si se desean fabricar piezas con acabados superficiales más lisos, es decir con una altura de capa más pequeña. Uno de los métodos para reducir el tiempo de fabricación en particular, es incrementar la velocidad con la cual se deposita el material que forma cada capa, este incremento tiene límites físicos que determinan la máxima velocidad a la cual material puede ser depositado, dependientes principalmente de la viscosidad del material, la

temperatura de fusión del material y características de aceleración y desaceleración para lograr una correcta adhesión entre capas, que limitan la máxima velocidad de trabajo.

La segunda opción, es la mayormente aplicada por los sistemas comerciales donde la pieza a fabricar no se hace completamente sólida, generando una estructura interna hueca dentro de la pieza a fabricar por medio de un mallado que puede adoptar diferentes patrones entre estos los más comunes están el hexagonal y el cuadrangular. Las secciones huecas reducen de manera notable los tiempos de fabricación, pero a costa de la resistencia y densidad de las piezas, propiedades clave en muchas de las aplicaciones de las piezas fabricadas por FDM.

Finalmente, un método poco explorado por los sistemas comerciales (por la difícil correcta superposición de capas variables - [1] página 161) es reducir los tiempos de fabricación en los sistemas FDM por medio de dos flujos de inyección de material, con diferentes alturas de capa para la segmentación del modelo, es decir se requiere de un flujo de inyección burdo para las partes o volúmenes internos del modelo, donde no es requerido un acabado muy fino, y el segundo flujo de material más fino para las partes externas de la pieza a fabricar, donde se desean mejores acabados superficiales. Sin embargo, la estrategia de segmentación a la fecha adoptada por los fabricantes solo trabaja a una altura de capa fija, donde se tiene un compromiso entre una fabricación rápida pero burda o una fabricación más lenta pero con mejores acabados.

1.5 Justificación del trabajo.

El continuo crecimiento de las tecnologías de MA y su descenso de costos en los sistemas FDM en los últimos años, ha hecho que muchos usuarios hayan centrado su atención en las impresoras 3D domésticas, las cuales han tenido un periodo corto de desarrollo (respecto de las maquinas industriales) y en las cuales aún es necesario realizar mejoras como la reducción del tiempo de fabricación, factor que resulta de gran apoyo en tres usos particulares de esta tecnología, los cuales se detallan a continuación.

Servicios de impresión 3D. Muchos de los negocios dedicados a este rubro, basan su cotización en el tiempo necesario para imprimir un modelo 3D, pues los costos implicados en este tipo de negocios están directamente relacionados al tiempo operación de la máquina,

de manera tal que la reducción de tiempos en fabricación reduciría el precio de venta final de un modelo [7].

Manufactura digital directa (DDM-Direct Digital Manufacturing). Una aplicación relativamente nueva y muy útil en empresas que solo necesitan fabricar un pequeño lote de producción de un producto muy específico [8].

Impresión de modelos a gran volumen. Las dimensiones normales de una impresora 3D de arquitectura abierta no superan en la mayoría de los casos las 12 pulgadas cubicas de volumen, debido principalmente a la lentitud del proceso, para la fabricación de volúmenes grandes. El desarrollo de una técnica de impresión más rápida, permitiría tener maquinas que elaboren modelos impresos de mayor volumen [9].

1.6 Hipótesis

La propuesta a explorar en el presente trabajo, tiene como objetivo reducir los tiempos de fabricación de piezas impresas en 3D en una impresora domestica FDM de tipo *Open source* por medio del depósito dispar de material. Así a hipótesis que se propone establece que:

“Se puede reducir el tiempo de fabricación sin afectar la apariencia externa, por medio de la inyección dispar de material.”

Esto parte del hecho que en el proceso de fabricación por FDM se puede trabajar a diversos flujos de inyección de material variando la velocidad a la cual se presiona el material dentro de la cámara de calentamiento del extrusor del sistema. La intención es manejar un flujo de material fino para la parte externa de las piezas, donde se requiere una altura de capa pequeña, y un segundo flujo de depósito abundante o grueso para las secciones internas de las piezas a fabricar, donde se tendrá una mayor altura de capa respecto de las regiones externas.

El flujo de inyección abundante, permitiría la fabricación de los volúmenes de relleno, pues en estas estructuras es donde el proceso es más tardado y la principal causa del alargamiento de los tiempos de fabricación, mientras que los contornos y superficies del volumen a fabricar

se realizarían por medio del depósito de flujo fino, dando una apariencia externa más lisa pero manteniendo una estructura interna más burda.

Para lograr desarrollar la propuesta se hace necesario el desarrollar un algoritmo de segmentación que pueda de manera efectiva realizar la planificación de dos flujos de depósito de material, a fin de hacer uso de un flujo de depósito material de manera fina (véase Figura 7) en la superficie de la pieza fabricada, dando una apariencia detallada a los objetos; y un flujo abundante o burdo para el relleno interno del objeto a construir. El uso de dos flujos de depósito mantendría la apariencia externa detallada lograda por medio de alturas de capa pequeñas (que retardan los tiempos de fabricación), pero mejorando los tiempos de fabricación por medio de un depósito más abundante a una altura de capa más gruesa en la parte interna del objeto fabricado.

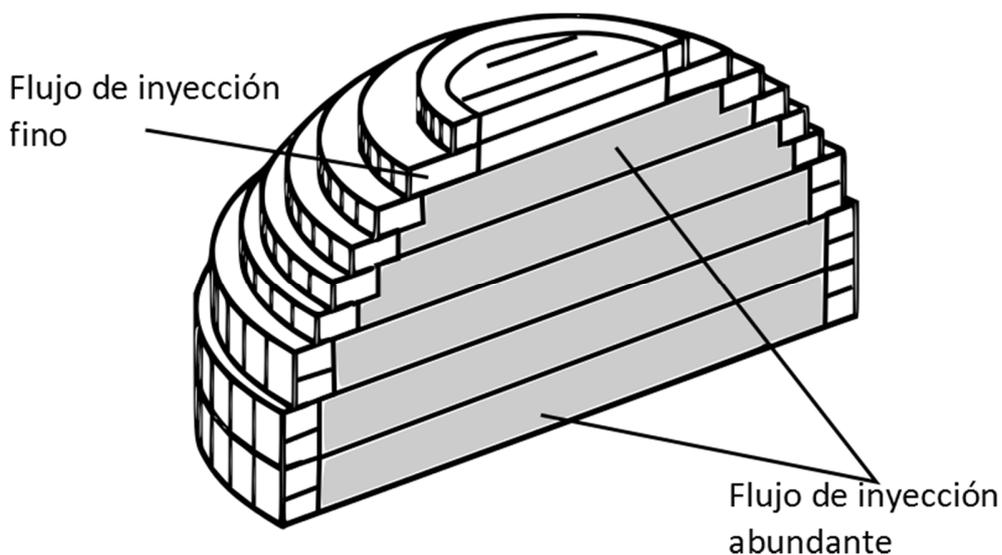


Figura 7 Inyección dispar de material.

El algoritmo de segmentación de modelos CAD 3D, tiene la tarea de identificar de manera automática las regiones del modelo donde se hace necesaria una inyección de material fina y otra abundante, manteniendo una relación correcta entre las alturas de capa internas y externas, independientemente de la geometría del volumen que se esté manejando.

A la entrada del proceso se tendrá un archivo en formato *STL*, el cual será segmentado de acuerdo a las consideraciones antes definidas, y posteriormente se definirán las rutas que la impresora 3D debe de seguir a fin de realizar la inyección dispar de material, entregándolas

en un formato de salida conocido como *GCODE*, que es una lista de coordenadas de movimientos e inyección de material a seguir por la máquina. Al final del proceso, los resultados de la planificación serán evaluados en una impresora 3D de arquitectura abierta, la cual fabricará un grupo de piezas por inyección dispar y que serán comparadas contra otra serie de piezas fabricadas mediante el proceso tradicional, en un conjunto de atributos objetivos (dimensiones, peso, densidad, rugosidad y resistencia mecánica) y otros subjetivos (aparición externa, cantidad de defectos y calidad visual).

1.7 Objetivos

1.7.1 *Objetivo general*

Reducir el tiempo de fabricación de piezas impresas en 3D en un sistema FDM de arquitectura abierta por medio de la inyección dispar del material.

1.7.2 *Objetivos particulares*

1. Desarrollar un algoritmo de segmentación de modelos CAD 3D que genere una división del modelo a dos alturas de capa diferentes, que permita la correcta relación entre capas finas externas y capas gruesas internas.
2. Evaluar los resultados de la generación automática de rutas dadas por el algoritmo de segmentación por inyección dispar, mediante la fabricación de un grupo de modelos prueba.
3. Registrar la reducción del tiempo de fabricación entre el método tradicional y la inyección dispar.
4. Realizar un estudio comparativo de atributos objetivos (dimensiones, peso, densidad y rugosidad) y subjetivos (imperfecciones y calidad visual) entre piezas fabricadas mediante inyección dispar y el proceso tradicional.

1.8 Alcances del trabajo

En el presente documento se establecen los elementos necesarios para el diseño y desarrollo de un algoritmo de segmentación para la fabricación de piezas y modelos mediante la inyección dispar del material, aplicable a sistemas FDM de arquitectura abierta.

El sistema desarrollado se encuentra acotado solo en la generación del código máquina a partir de un archivo CAD 3D en formato STL binario (véase Figura 8), dejando de lado las operaciones de escalamiento, movimiento o rotación del modelo CAD. El código máquina será interpretado por una impresora 3D de arquitectura abierta basada en las impresoras Replicator de segunda generación fabricada por la empresa Makerbot®.

La solución expuesta solo explora un flujo de inyección abundante al doble de velocidad respecto del flujo de inyección fino, el cual se realiza a una altura de capa de 0.2 mm, validando los resultados en un conjunto de piezas con geometrías complejas, donde la identificación de áreas internas y externas no se realiza de manera trivial.

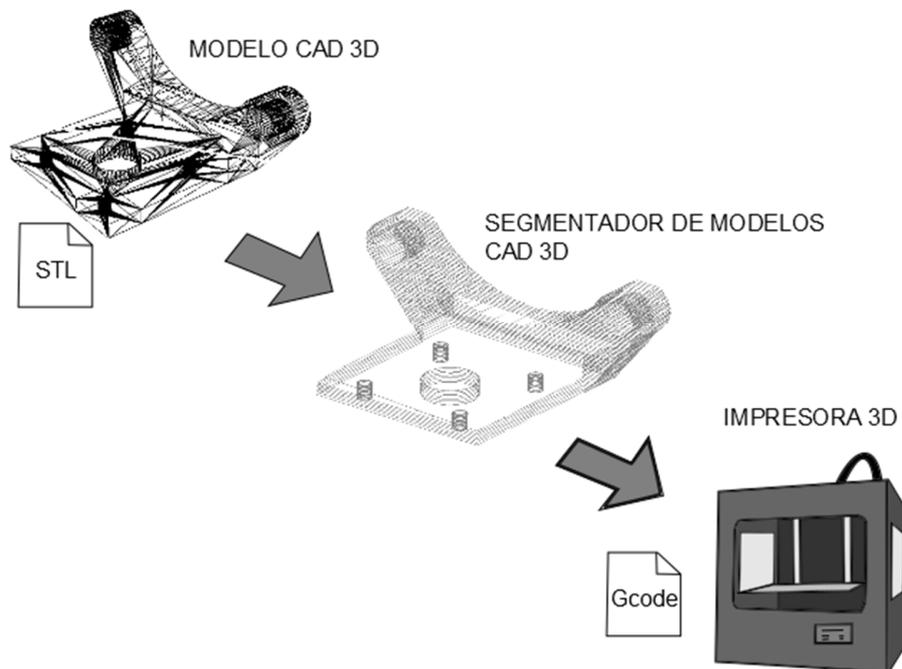


Figura 8 Propuesta de desarrollo de algoritmo de segmentación

1.9 Contribuciones

- Un algoritmo que permite identificar de manera automática las regiones internas y externas del modelo, manteniendo una relación correcta entre las alturas de capa internas con inyección abundante y externas con inyección fina, independientemente de la geometría del volumen que se esté manejando.
- Cuantificar la reducción de tiempo de fabricación respecto del proceso de fabricación tradicional, en un conjunto de modelos de geometría compleja.
- Un estudio que permita delimitar los factores geométricos que intervienen en el aumento de tiempo de fabricación de piezas.
- Demostrar la factibilidad de la fabricación por medio de inyección dispar, comparando las propiedades objetivas y subjetivas de las piezas.

1.10 Método de investigación y desarrollo utilizado

La metodología seguida en el presente proyecto se presenta a continuación, describiendo de manera breve los puntos esenciales en la investigación.

Revisión del estado del arte, en búsqueda de los principales trabajos relacionados a la reducción de tiempo de fabricación de piezas en sistemas FDM, haciendo especial énfasis en los diferentes procedimientos de segmentación de modelos.

Evaluación de las diferentes técnicas usadas para la reducción de tiempo de fabricación en sistemas FDM, comparando las opciones más adecuadas y viables para ser implementadas, de las cuales en un principio se consideraron modificaciones en el hardware de la máquina para realizar la inyección dispar de material mediante dos cabezales, sin embargo un estudio previo demostró que el proceso de intercambio de cabezales genera retrasos en el proceso de fabricación opacando la reducción de tiempo que podría ser generada, de esta manera es como se procedió a implementar un sistema de inyección dispar de material que trabajase con un solo cabezal.

Investigación y desarrollo de los algoritmos base geométricos necesarios en el desarrollo de un algoritmo de segmentación de modelos CAD 3D, superposición de áreas e identificación de áreas internas, externas y de soporte.

Desarrollo de un algoritmo base que mantenga de manera efectiva realizar la planificación de dos flujos de depósito de material, a fin de hacer uso de un flujo de depósito material de manera fina, que permita dar una apariencia detallada a los objetos en su apariencia externa y un flujo más abundante o burdo para el relleno interno del objeto a construir. El uso de dos flujos de depósito mantendría la apariencia externa detallada lograda por medio de alturas de capa pequeñas (que retardan los tiempos de fabricación), pero mejorando los tiempos de fabricación por medio de un depósito más abundante a una altura de capa más gruesa en la parte interna del objeto fabricado.

Realizar simulaciones de las rutas generadas por el algoritmo de segmentación con el fin de validar los resultados obtenidos por el algoritmo de segmentación, para que en un paso posterior se proceda a la fabricación de las piezas y modelos en la impresora 3D.

Cuantificar la reducción de tiempo de fabricación de las piezas fabricadas mediante inyección dispar respecto de las piezas fabricadas mediante el proceso tradicional, evaluando adicionalmente características objetivas y subjetivas de ambos grupos de piezas.

Reportar los resultados de dichos experimentos, indicando los factores o elementos que intervienen en las observaciones obtenidas de los experimentos.

Elaboración de conclusiones y establecer las posibles mejoras, líneas de investigación y trabajo futuro que pueden ser retomadas en base a la investigación en la presente tesis.

1.11 Organización del trabajo

En el capítulo 1 Introducción de manera breve se detalla que son y cómo trabajan las tecnologías de manufactura aditiva, enfocándonos en las características y propiedades del proceso conocido como modelado por hilo fundido (FDM). Adicional a esto se presenta la

descripción del problema y los detalles del mismo, así como la hipótesis, la propuesta de solución y los objetivos del trabajo aquí presente.

En el capítulo 2 Estado del arte se exponen los principales trabajos y publicaciones relacionadas a los métodos de segmentación desarrollados por la comunidad científica, cuáles fueron sus aportaciones y que impacto tuvieron los desarrollos presentados en cada caso.

En el capítulo 3 Marco teórico se detallan algunos conceptos base necesarios en el desarrollo de la tesis; se describen conceptos como son los códigos máquina, el formato STL, las regiones involucradas en el proceso de manufactura aditiva conocido como FDM y la descripción de la arquitectura y origen de las impresoras 3D de arquitectura abierta.

En el capítulo 4 Algoritmo de segmentación se describen los algoritmos base usados en el desarrollo en la segmentación de modelos CAD 3D usando inyección dispar de material, es también en este capítulo donde se presentan también los diagramas de flujo de los procesos principales del proceso de segmentación, así como la puntualización de las velocidades de trabajo y otros parámetros importantes.

En el capítulo 5 Pruebas y resultados, se realiza un pequeño estudio sobre algunos de los factores que intervienen y alargan los tiempos de fabricación de piezas por medio de FDM. El estudio se realiza con un grupo de piezas de geometrías sencillas y un grupo de geometrías complejas, en ambos casos se hace la comparativa de la reducción de tiempos entre un proceso de segmentación tradicional y la segmentación con inyección dispar obteniendo aventajamientos de entre 20 y 50% de tiempo respecto del proceso original. Así mismo, en este capítulo se reportan los experimentos y observaciones obtenidas de los estudios comparativos de características objetivas y subjetivas en ambos grupos de piezas.

En el capítulo 6 conclusiones, presenta y resumen los resultados obtenidos de la investigación en base a los objetivos, pero también sobre otros aspectos relevantes encontrados en el desarrollo del trabajo, así mismo al final se describen algunas propuestas y recomendaciones del trabajo futuro del proyecto.

Capítulo 2 Estado del arte

En todos los procesos de manufactura aditiva, se parte de una modelo 3D el cual puede ser generado por un sistema profesional de dibujo 3D o a partir de un sistemas de escaneo de modelos 3D, en ambos casos muy probable que el formato obtenido de tal proceso sea un archivo STL binario o ASCII, principalmente debido a su amplia adopción en sistemas de manufactura aditiva.

Tradicionalmente los sistemas comerciales de segmentación solo trabajan a una sola altura de capa, y en teoría si la altura de capa es lo suficientemente pequeña la pieza fabricada será idéntica al modelo 3D virtual, sin embargo en la realidad existen diversos factores relacionados al control del proceso de fabricación que impiden fabricar piezas con alturas de capa muy pequeñas, de manera que la fabricación de la piezas presenta un error de segmentación debido al proceso de fabricación por capas, como se puede observar en la Figura 9 (distancia d-c). Así mismo es de considerar que entre más pequeña es la altura de capa el tiempo de fabricación se extiende a periodos demasiado largos que resultan imprácticos. Adicional al error antes mencionado, el formato STL no define líneas curvas (error de aproximación STL, véase Figura 9), lo cual genera cierto error de aproximación con respecto del modelo original, pues las curvas son aproximadas como una sucesión de líneas rectas.

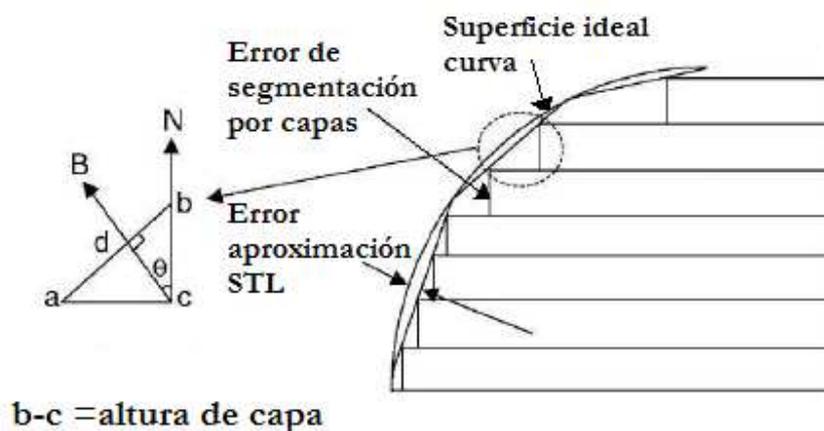


Figura 9 Errores presentes en el proceso de segmentación [10].

Una de las propuestas para evitar los errores generados por la aproximación de curvas es conocida como segmentación directa la cual parte de la representación del formato fuente de los sistemas de diseño CAD. Así mismo, existen otros esquemas de segmentación que no trabajan a una altura de capa fija, las cuales son englobadas como técnicas de segmentación adaptativa.

2.1 Segmentación adaptativa

La segmentación adaptativa basa su operación en la segmentación del modelo a alturas de capa variables, evaluando la geometría del modelo a fabricar, donde dicha evaluación puede ser hecha de forma manual indicando las áreas que deben cambiar la altura de capa o de manera automática, más sin embargo a la fecha no es usual que los sistemas FDM comerciales implementan técnicas de segmentación adaptativa. Los primeros antecedentes encontrados relacionados a la segmentación adaptativa fueron presentados por *Suh et al.* [11], quien presenta un método de segmentación adaptativa básica (véase Figura 10) en 1994, el cual realizaba cortes variables de acuerdo a la pendiente obtenida entre capas contiguas, delimitando cual era la altura de capa más adecuada para fabricar cierta parte de la pieza. Para 1997 *Sabourin et al.* [12] presentan un estudio que consideró tres casos de estudio, el primero de ellos fue la segmentación del modelo a una altura de capa fija, la segunda opción fue el desarrollo de método de segmentación variable que modifica la altura de la capa de acuerdo a la región que se está trabajando y finalmente la tercera opción (considerada segmentación adaptativa avanzada, véase Figura 10) es la fabricación de un exterior trabajado a la menor altura de capa que el sistema puede operar y una construcción del interior con una altura de capa mayor, resultado de lo anterior las regiones internas se construían 5.2 veces más rápido, resultando en un aventajamiento en tiempos de fabricación de entre 50 y 80%, sin afectar la integridad o apariencia externa de la pieza. Sin embargo, los modelos procesados *Sabourin* son modelos heterogéneos y no complejos geoméricamente, adicional a esto *Sabourin* no especifica de una manera clara del cómo identificar automáticamente las regiones de segmentación adaptativa, y los resultados presentados se realizan en modelos heterogeneos.

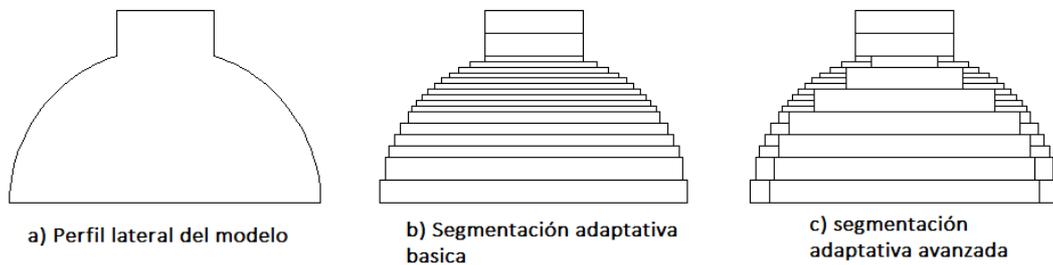


Figura 10 Ejemplos de segmentación adaptativa.

Por otro lado *Tyberg et al.* [13] encontraron que los sistemas tradicionales de segmentación adaptativa producían capas innecesarias que contribuían al incremento de los tiempos de fabricación, sin que realmente generaran una mejora en la calidad de la superficie de las piezas fabricadas por este método. De esta manera Tayberg desarrollo una nueva técnica que identificaba áreas y características individuales de las piezas por medio de la curvatura de la superficie y el ángulo del vector normal respecto de la plataforma de fabricación, consiguiendo un mejoramiento de entre 17% a 37% de reducción de tiempos de fabricación comparado con sistemas de segmentación adaptativa anteriores.

Thrimurthulu et al. [14] presentaron un esquema de optimización mono-objetivo la cual consideraba la rugosidad media y el tiempo de fabricación para determinar la orientación óptima de fabricación de la pieza en cuestión usando algoritmos genéticos. La rugosidad media de la pieza fue evaluada mediante la segmentación adaptativa del modelo y posteriormente se evaluaba de manera indirecta el tiempo de fabricación, por medio del número de capas generadas. Los resultados de los casos de estudio considerados concluyeron que la metodología podía ser usada para obtener la orientación de fabricación óptima en cualquier modelo complejo.

Zhou et al. [15] propusieron una técnica de segmentación adaptativa basada en el formato STEP (Standard for the Exchange of Product) la cual toma en cuenta la curvatura real de la superficie de los modelos CAD, pues a diferencia del formato STL el formato STEP describe de mejor manera los volúmenes. Por otro lado, *Zeng et al.* [16] desarrollaron otro algoritmo de segmentación adaptativo basado en la profundidad de capa de la imagen normal (*Layer*

Depth Normal Image LDNI), método que reduce el tamaño del almacenamiento e incrementan la eficiencia de la segmentación. Por otro lado, *Wang et al.* [17] usaron un análisis de método finito para dividir el objeto en un grupo de tetraedros que son usados para realizar la segmentación adaptativa.

2.2 Segmentación directa

La segmentación directa pretende solucionar los problemas de aproximación del formato STL y ser más adecuado a las necesidades de los usuarios de manufactura aditiva, describiendo un volumen por medio de una agrupación de capas y polígonos internos a la capa que definen los contornos del modelo. Sin embargo, la segmentación directa no está exenta de inconvenientes como son el hecho que la implementación de estructuras de soporte no se puede realizar de una manera sencilla, así mismo la facilidad para orientar el modelo en el espacio es mínima y requiere de diversas y complejas operaciones. Un ejemplo de un formato de segmentación directa es el formato abierto CLI (*Common Layer Interface*) el cual es un formato usado para segmentar y manejar volúmenes 3D con archivos relativamente más pequeños que los descritos por un archivo STL.

Entre los antecedentes de segmentación directa encontramos, *Chen et al.* [18] quienes presentan y comparan diversos métodos de segmentación fija, segmentación adaptativa y segmentación directa, con el fin de conocer y evaluar los requerimientos necesarios en diversas técnicas de manufactura aditiva, al final el propuso un método basado en líneas, arcos y curvas de Bezier que describirían los contornos de cada capa en un modelo 3D y que probablemente sea la solución para los problemas de segmentación antes mencionados.

Starly et al. [19] observan que dependiendo de la geometría de descripción usada para representar el modelo 3D, surgirían diversos problemas que afectan directamente la precisión y exactitud de las piezas fabricadas al final, de manera que el concluye que la representación de modelos 3D por medio del formato STL resulta inadecuada para la fabricación de piezas biomédicas de geometría compleja.

En la segmentación directa es usual que no existan conexiones entre los puntos se encuentran ausentes, dando lugar a la falta de estructura en figuras complejas con múltiples contornos en cada capa, lo cual puede conducir a errores. Para solucionar estos errores, *Qui et al.* [20] presentaron un método para obtener la topología del modelo de la nube de datos antes de generar los trazos de cada capa aplicando un algoritmo que calcula el error cuadrático medio en la superficie de cada capa. Una vez la información relativa a la topología del modelo, número de contornos y puntos iniciales es determinada, el proceso de segmentación se hace eficiente y confiable.

Zhao y Laperrie [15] desarrollaron un método de segmentación adaptativa a base de un formato de segmentación directa, abriendo el potencial de la segmentación directa a la fabricación de piezas con gran precisión y eficiencia en el proceso de fabricación. La estrategia de segmentación consiste en 2 etapas, determinar los cambios y características del modelo y dividir este en los correspondientes bloques, optimizando la altura de capa en cada bloque de construcción. Sin embargo, el algoritmo nunca fue probado en un sistema de manufactura aditiva y solo quedó en simulaciones.

Capítulo 3 Marco teórico

En este capítulo se describen los sistemas FDM de bajo costo, como es el caso de la impresora 3D modelo Zcube Dual, la cual fue usada para fabricar piezas por medio de inyección dispar, para después poder evaluar las características de dichas piezas y validar la reducción en el tiempo de fabricación.

Se habla también sobre el formato STL, el cual es un formato estándar para modelos CAD 3D ampliamente usado en sistemas de manufactura aditiva actuales; dicho formato es de donde parte el proceso de segmentación que en este documento se describe, razón por lo cual se describen sus características, ventajas y limitaciones.

Como producto de la segmentación, se obtendrá un archivo de texto con las rutinas y trazos que debe de seguir los sistemas FDM, en este caso una impresora ZCube Dual, la cual interpreta códigos máquina, los cuales son también descritos en este apartado.

En la última sección de este capítulo, se describen algunos conceptos, condiciones y la descripción de las regiones involucradas al momento de fabricar piezas por medio de un sistema FDM.

3.1 Sistemas FDM de bajo costo

El principio base de los sistemas FDM es en esencia sencillo y puede ser replicado con cierta simplicidad, como lo demostraron los proyectos de sistemas de arquitectura abierta REPRAP y Fab@home (véase Figura 11 y Figura 12), los cuales son iniciativas de fabricación a pequeña escala de sistemas FDM personales, donde el usuario final es quien fabrica a un bajo costo el sistema FDM, en comparativa con los precios de los sistemas FDM comerciales.

Tanto el proyecto Fab@home como REPRAP [21] tienen antecedentes desde el año 2005, sin embargo, el proyecto Fab@home se ha visto rezagado en los últimos años principalmente por su simplicidad y limitada capacidad para producir piezas y modelos, pues usa como actuador base una jeringa y un actuador lineal que controla la cantidad de material a depositar

mientras el robot cartesiano se mueve formando el modelo a construir. El sistema fue liberado en 2006 por Evan Malone de la Universidad en Cornell Nueva York, quien publicó los planos, lista de materiales e información necesaria para la fabricación de la *Model 1*, el primer sistema FDM personal de bajo costo de arquitectura abierta.

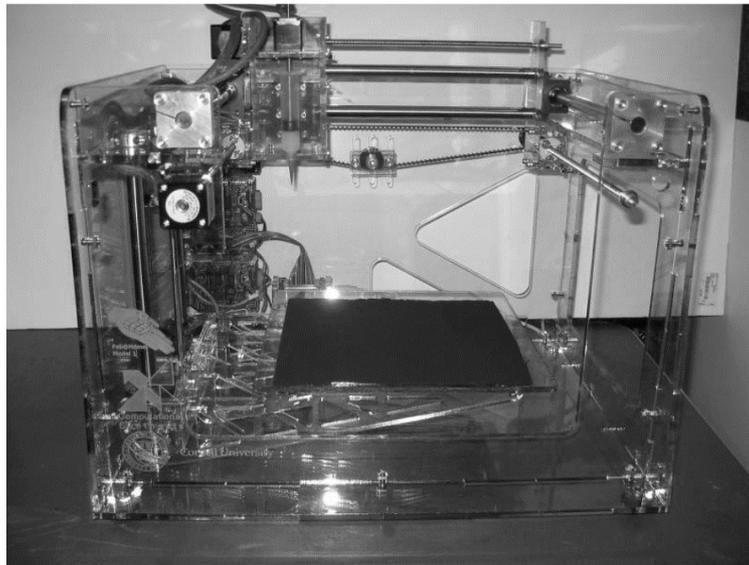


Figura 11 Fab@home Model 1.

A diferencia del proyecto Fab@home, el proyecto REPRAP liderado y liberado en 2008 por el Doctor Adrian Bowyer, profesor de ingeniería mecánica de la Universidad de Bath en Reino Unido, sentó las bases para los actuales sistemas FDM de bajo costo, como son los sistemas comercializados por Makerbot, Utimaker, Printrbot, entre otros. El proyecto usa una técnica de fabricación denominada Fabricación por Filamento Fundido (FFF), idéntico en operación al FDM, pero denominado de esa manera para evitar problemas de patente con Stratsys Inc. La distribución del proyecto REPRAP está disponible bajo una licencia GNU (General Public License), una licencia de software libre, que permite a otros investigadores trabajar en la misma idea y mejorarla. La principal meta del proyecto RepRap es producir un aparato auténtico autorreplicable no para sí mismo, si no, para ponerlo en las manos de individuos que en cualquier parte del planeta y con una mínima inversión de capital, permita a cualquier persona la fabricación de objetos para su vida cotidiana.

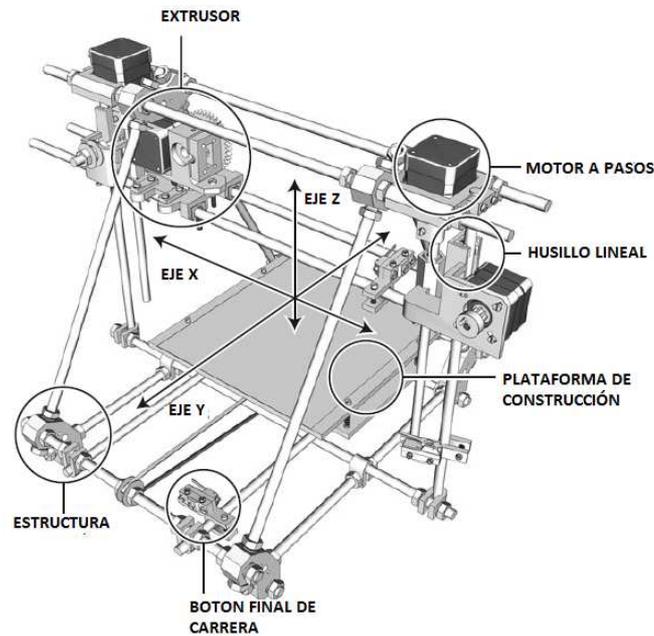


Figura 12 Reprap Mendel segunda generación. [22]

Las impresoras 3D de tipo REPRAP, son robots de tipo cartesiano con diferentes configuraciones en el acomodo de sus componentes y fabricados en diversos materiales que van desde madera a estructuras metálicas de aluminio. En la Figura 13 se observan los componentes esenciales de una máquina REPRAP, la cual consta de cuatro motores a pasos uno para cada uno de los ejes coordenados en el espacio (X , Y , Z) y el cuarto motor permite dosificar la cantidad de material que es depositada por el cabezal de impresión, comúnmente conocido como extrusor, así mismo se cuenta con un sensor de límite por cada eje coordenado que permite posicionar las coordenadas de origen de la máquina. El cabezal de inyección consiste en un bloque de aluminio o latón que funde el filamento a una temperatura controlada de entre 200°C y 260°C , dependiendo de si se usa PLA o ABS como material de fabricación. Opcionalmente se puede contar con una plataforma de fabricación con calentamiento pero esta no es indispensable si solo se desea trabajar con PLA. Todo el proceso es manejado por medio de una tarjeta de control Arduino que tiene como base microcontroladores ATMEL, por lo que el *firmware* está escrito en un dialecto de C. El *firmware* se encarga de controlar los procesos de movimiento entre puntos, la dosificación de material, el mantener estable la temperatura del extrusor y de la mesa de calentamiento,

así mismo se encarga de mostrar mensajes e información relevante por medio de un *display*. Los sistemas FDM de tipo REPRAP son manejados por medio una serie de instrucciones en código máquina, usualmente conocido como código G que es también usado por maquinas CNC, pero en este caso se hace uso de códigos específicos para el proceso de fabricación de piezas por medio de FDM.

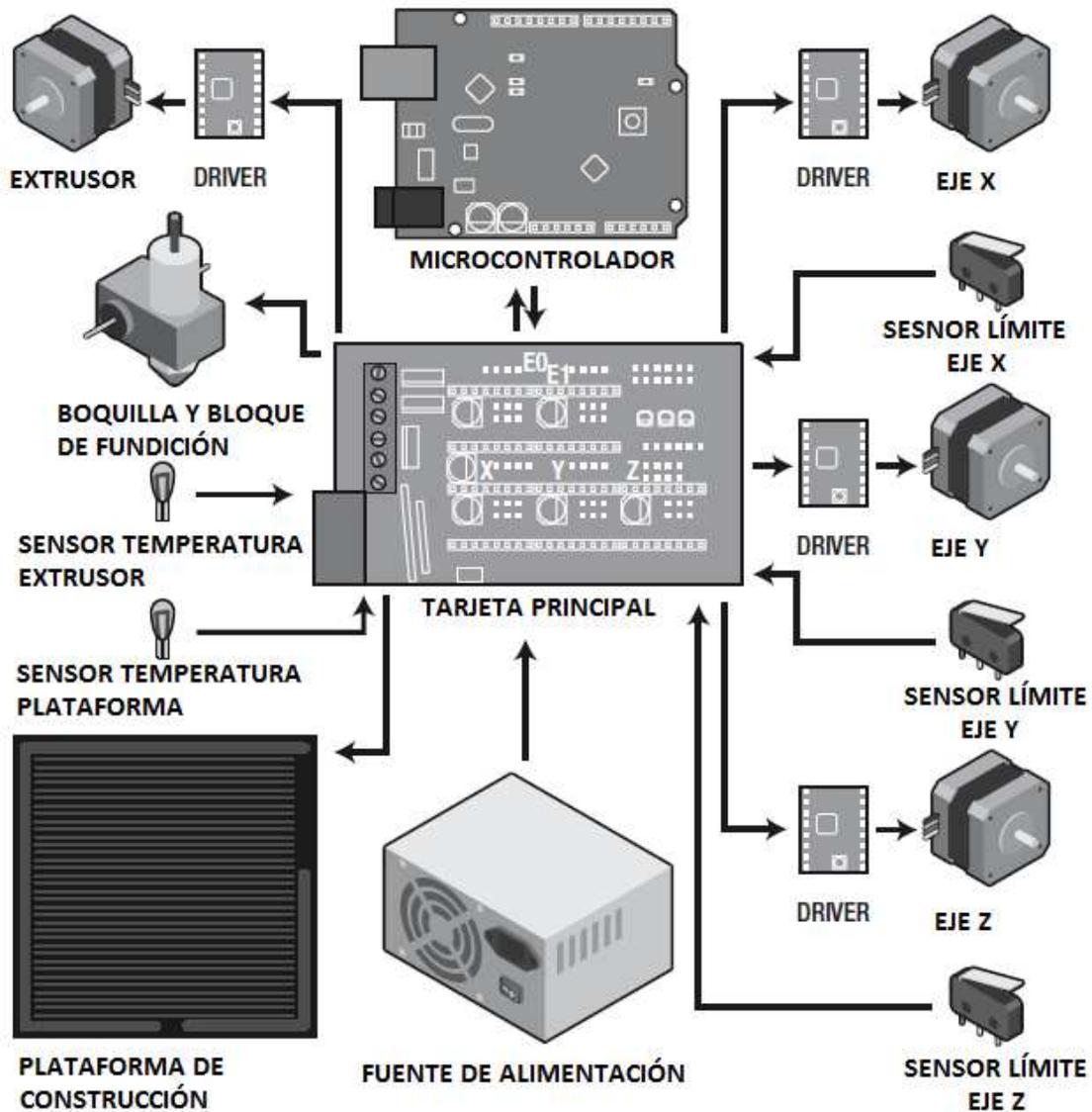


Figura 13 Elementos de un sistema FDM de tipo REPRAP. [22]

3.2 Códigos máquina.

El código máquina también conocido como código G o RS274 [23], tiene muchas variantes pero es el lenguaje de programación más ampliamente usado en equipos de control numérico. Se utiliza principalmente en la fabricación asistida por computadora para el control de máquinas herramientas automatizadas.

En términos fundamentales el código G, es el lenguaje en el que los usuarios les indican a las máquinas herramientas computarizadas cómo hacer algo, las instrucciones sobre donde están ubicadas en el espacio, qué tan rápido y a través de qué trayectoria debe moverse la herramienta de trabajo. La situación más común es que una herramienta de corte se mueve de acuerdo con estas instrucciones a través de una trayectoria para cortar el exceso de material y dejar sólo la pieza acabada. Sin embargo, el mismo concepto se extiende también a herramientas tales como las herramientas de corte por plasma, trazado fotográfico, manufactura aditiva e instrumentos de medición no cortante.

Los sistemas FDM tipo REPRAP se basan en el estándar de códigos G NIST RS274NGC, sin embargo en términos generales los códigos principales para estos sistemas pueden ser clasificados en 3 grandes grupos:

- Códigos de movimiento (G). Definen las trayectorias de movimiento, inyección de material, saltos y asignación de unidades.
- Códigos de máquina (M). Definen las temperaturas de trabajo, actualización de avance en pantalla y habilitación o inhabilitación de actuadores del sistema.
- Códigos de cambio de herramienta (T). Son usados para la selección de la herramienta principal.

A continuación se muestra de manera resumida algunas líneas de código máquina y su interpretación.

```
1 | G1 F1500.0
2 | G1 X21.4 Y73.8 E62.9
3 | G1 X20.7 Y77.6 E66.7 F3000.0
```

El segmento de código puede interpretarse como sigue (véase Figura 14):

1. Fijar la velocidad de inicio del cabezal a un avance de 1500 mm/s.
2. Iniciar el movimiento en las coordenadas $x=21.4$, $y=73.8$ e iniciar el depósito de material desde una longitud de 62.9 mm a una tasa sincronizada con el movimiento del cabezal.
3. Moverse a las coordenadas $x=20.7$, $y=77.6$, depositando material hasta la longitud de 66.7 mm (con un avance de 3.8 mm de material depositado) e incrementado la velocidad del cabezal a 3000 mm/min.

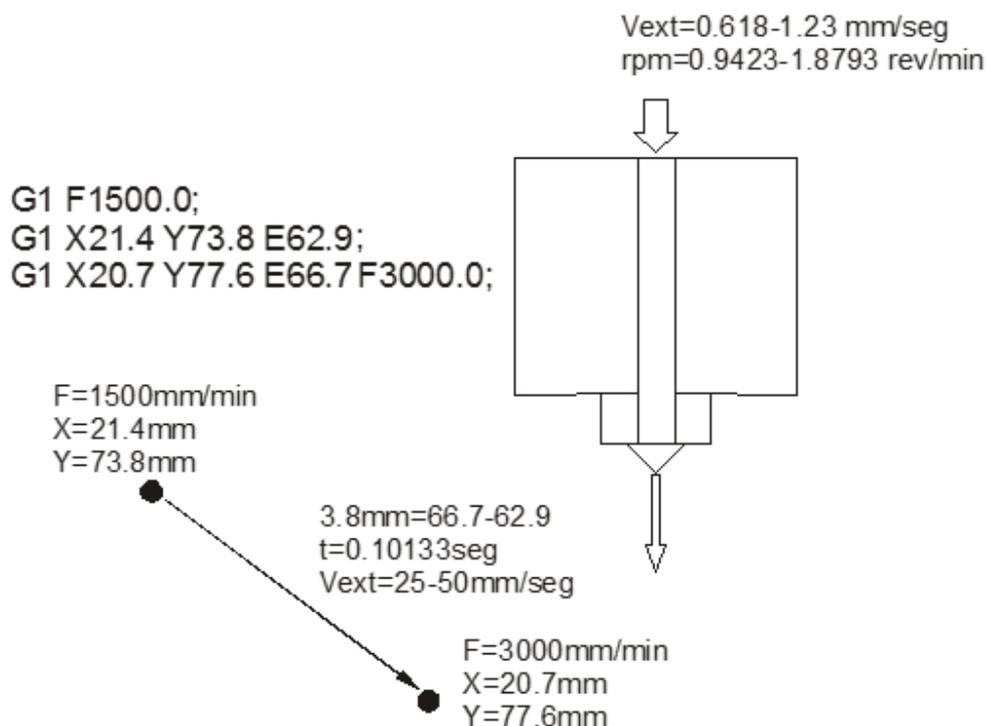


Figura 14 Ejemplo de traducción a códigos máquina. [24]

El código máquina puede ser creado manualmente o por un software especializado, pero al día de hoy no es común que la generación de dicho código se haga manualmente pues considerando la complejidad en algunas de las aplicaciones, las operaciones involucradas y cantidad de líneas que deben ser generadas, el proceso de generación de código máquina puede llevar meses, lo cual resulta impráctico e ineficiente [25].

En el caso de las impresoras 3D el software que se encargó de trazar las rutas por donde el material será depositado es comúnmente llamado segmentador (*slicer*) [22], de los cuales existen diversas opciones comerciales y no comerciales. Sin embargo en el caso de las impresoras 3D de arquitectura abierta es común que el segmentador sea gratuito, entre los cuales se pueden mencionar *Reprap*, *Slic3r*, *Skeinforge* y *Cura*, los cuales generan archivos de texto de tipo *ASCII*, usualmente con terminación **.gcode*, o en un formato binario con terminación **.x3g* o **.sg3*.

3.3 El formato STL

El formato STL deriva de la palabra Estereolitografía (*STereoLitography*), primer sistema comercial de manufactura aditiva, de la empresa 3D Systems y que a la fecha se ha convertido el formato estándar de entrada para muchos de los sistemas de manufactura aditiva, como son el FDM, 3DP, SLA, por mencionar algunos.

El formato STL, puede encontrarse en modo texto (*ASCII*) o binario, sin embargo el primero es menos usual debido a que genera archivos de una mayor longitud, pero que es usado principalmente para ilustración y enseñanza, por ser fácilmente entendible.

El modelo definido por medio del archivo STL, es una aproximación a la geometría de un volumen a partir de una superficie cerrada, la cual se encuentra formada por la unión de planos triangulares en el espacio tridimensional. De manera que la información relativa al color, tipo de materiales, texturas o líneas y puntos de referencia se pierden durante el proceso de conversión, pues estos datos serán ignorados.

Un archivo STL se tiene una lista de planos triangulares únicos definidos a partir de 3 vértices o esquinas del triángulo y un vector normal a la superficie del plano triangular y con longitud de la unidad apuntando a la parte externa del modelo. El formato tampoco cuenta con un elemento que defina las unidades, sin embargo estas usualmente se encuentran dadas en mm o en pulgadas. La Figura 15 muestra el ejemplo de un tetraedro descrito por un grupo de 4 planos triangulares, donde cada plano triangular se encuentra descrito por un vector normal (*facet normal*) y 3 vértices (*vertex*). Es importante notar que el orden para el acomodo de los triángulos dentro de la lista descrita por el archivo STL, así como el origen del vector

normal tampoco se define, pues este puede ser ubicado en cualquier punto dentro de la superficie delimitada por cada uno de los vértices del triángulo.

Para el caso de los archivos STL binarios, la definición del modelo sigue las mismas reglas que el formato de texto, sin embargo los datos se encuentran acomodados de acuerdo a:

- 80 bytes ASCII, que definen la cabecera del archivo.
- 4 bytes para un entero sin signo, que indica el número de triángulos dentro de un objeto.
- Lista de 50 bytes, para cada plano triangular definido, de la siguiente manera:
 - 12 bytes, para 3 números flotantes, que describen el vector normal.
 - 12 bytes, para 3 números flotantes, que describen el primer vértice.
 - 12 bytes, para 3 números flotantes, que describen el segundo vértice.
 - 12 bytes, para 3 números flotantes, que describen el tercer vértice.
 - 2 bytes, para un entero sin signo, el cual debe de ser cero.

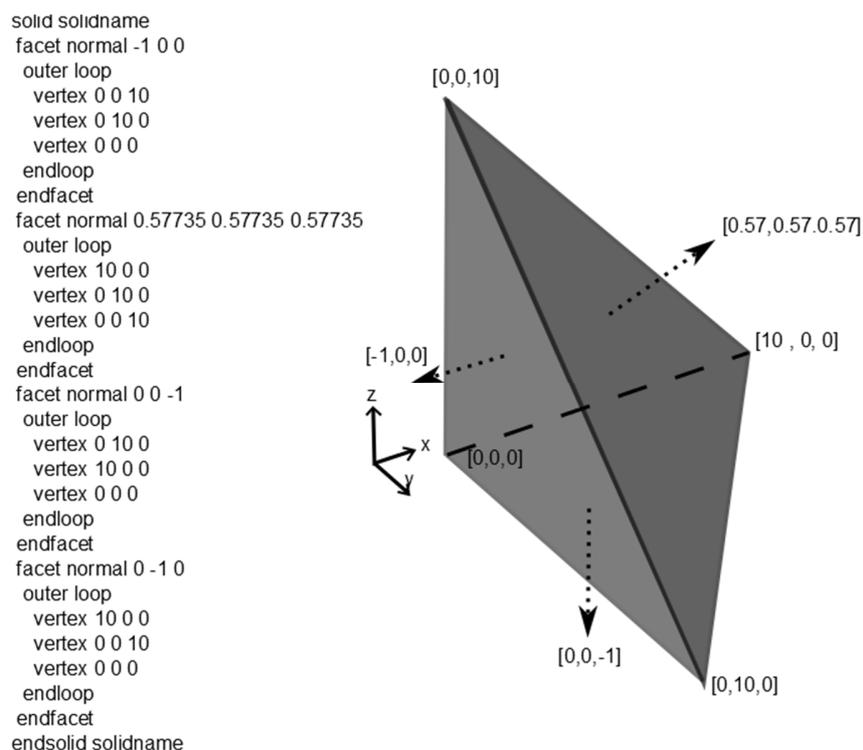


Figura 15 Ejemplo de tetraedro descrito por un archivo STL.

Aun cuando el formato STL tiene numerosas ventajas, también cuenta con ciertas limitaciones, entre las cuales se pueden mencionar la duplicidad y redundancia de información en cada uno de los bordes de los triángulos, lo cual genera que el tamaño del archivo sea más grande al estrictamente necesario. Otro limitante común también en este formato son los problemas de encaramientos, desfases e intervalos huecos, que se generan en el archivo por la inadecuada ubicación de los vértices que componen a los planos triangulares.

3.4 Modelado por hilo fundido, descripción del proceso y limitaciones.

Una de las ventajas notorias de las piezas fabricadas mediante FDM es el post-procesamiento, el cual es usualmente más sencillo en comparación con otras técnicas de MA desarrolladas en la industria, pues a diferencia de las técnicas como son SLA, 3DP o LOM (donde se requiere cortar el material sobrante), en el FDM las secciones que se generan para la fabricación de la pieza y no son requeridas al final, se retiran de manera fácil y sencilla.

Los materiales usados por sistemas FDM, mantienen una gran diversidad y usualmente el uso de cada uno se decide a partir de la aplicación final de la pieza, entre los principales materiales se pueden mencionar el ABS, PLA, PET, Nylon y el policarbonato, aunque se destaca el uso del ABS por sus características de durabilidad, estabilidad térmica y resistencia mecánica.

Las principales aplicaciones de las piezas fabricadas (véase Figura 16) por medio de esta técnica son la presentación de prototipos, producción de lotes muestras de un nuevo producto y pruebas destructivas, pues una de las ventajas de las partes fabricadas por medio de esta técnica, es la resistencia de las piezas pues usando ABS como material base, las piezas llegan tener el 85% de la resistencia de un producto real fabricado por medio de inyección de plástico, permitiendo hacer ensayos de destrucción, pruebas funcionales y montajes de prueba. Adicional a lo anterior, las piezas obtenidas por medio de FDM pueden ser lijadas, perforadas, pintadas o cromadas [4].

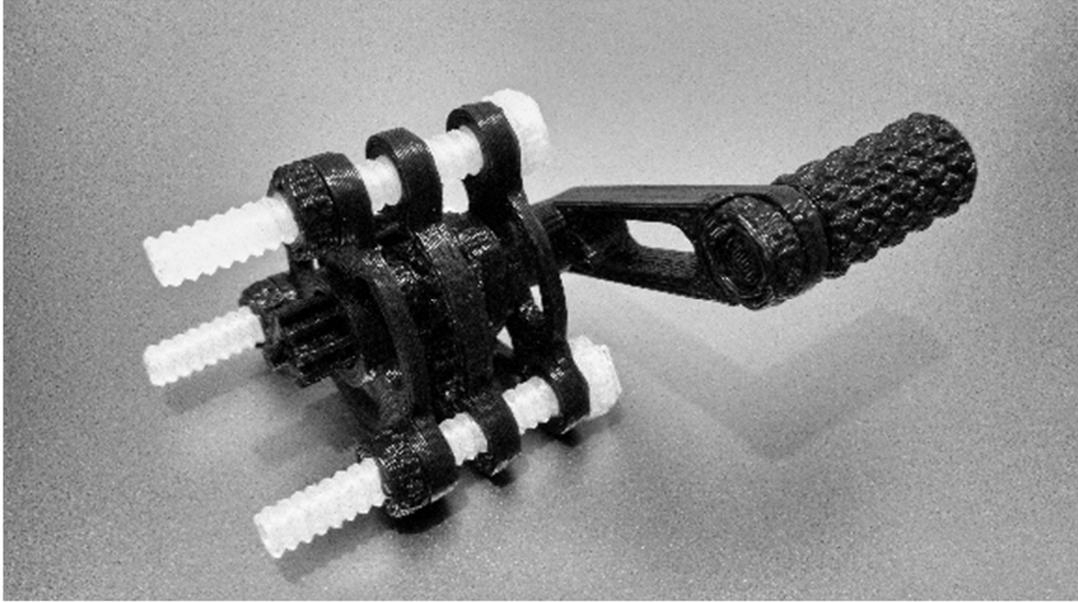


Figura 16 Piezas fabricadas por FDM.

Aun cuando existen múltiples ventajas en el uso del FDM como técnica de fabricación, la misma también tiene ciertas limitaciones en términos de tiempo de fabricación, precisión y densidad de los materiales. Como se menciona en el capítulo 1, la altura de capa es uno de los parámetros que más impacta en las piezas fabricadas por FDM, parámetro directamente relacionado con el diámetro de la boquilla de inyección de material, donde todas las boquillas de los sistemas FDM son circulares, lo que implica que no es posible fabricar esquinas filosas, pues los bordes filosos siempre tendrán como mínimo un radio equivalente al radio de la boquilla, de hecho en equipos de gama baja, es recomendable que los detalles no sean inferiores 1mm, pues sobrepasando esta barrera los resultados no son los óptimos.

En los sistemas FDM es común que el cabezal de depósito de material se encuentre montado en un sistema de trazado sobre un plano perpendicular a la base de construcción (véase Figura 4), donde el cabezal de inyección se encuentra en movimiento sobre el plano y dado que el filamento fundido depositado tiene cierta masa y por lo tanto inercia, esta debe ser tomada en cuenta, particularmente al momento de un cambio de dirección sobre el plano, pues la inercia del material en movimiento puede generar imperfecciones en la pieza final. Así la velocidad de inyección y la velocidad de movimiento del cabezal son dos factores

importantes que deben ser controlados de acuerdo a la región que se esté construyendo, dichas regiones se enumeran a continuación.

- Bases de fabricación
- Regiones internas o de relleno.
- Secciones externas o superficiales.
- Soportes.

Las bases de fabricación (véase Figura 17) son estructuras opcionales que no forman parte de la pieza a fabricar, se colocan al iniciarse el proceso de fabricación y permiten la correcta adhesión del material a la plataforma de fabricación. El depósito de estas estructuras se hace de manera abundante y pero lenta para permitir que el material se pegue a la plataforma. Entre los beneficios que se obtienen de hacer uso de estas estructuras es la prevención de levantamientos provocados por efectos de contracción y expansión por los cambios internos de temperatura en la pieza a fabricar. Además de lo anterior, también permiten que las capas sucesivas de material se depositen a una velocidad más rápida pues la adherencia entre capas del mismo material se realiza de forma más sencilla que entre capas de material distinto.

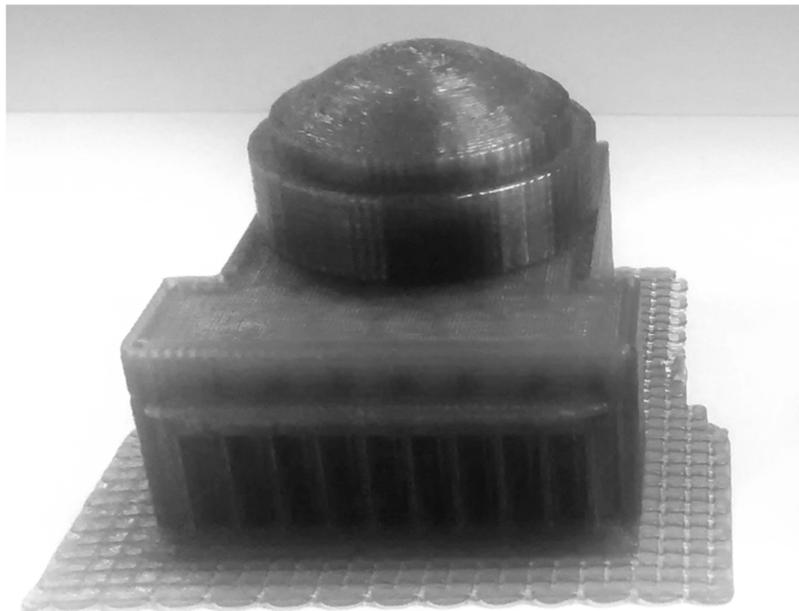


Figura 17 Pieza con base de fabricación

Es usual que las piezas fabricadas mediante FDM, no sean piezas completamente solidas con el fin de reducir el tiempo de fabricación, de manera tal que la pieza fabricada es básicamente un volumen hueco, cubierto por un caparazón cerrado que conforma la parte externa y visible. Dichas regiones internas al caparazón (véase Figura 20), las identificaremos como **regiones de relleno interno** y son comúnmente trazadas mediante un mallado interno en un patrón de red cuadriculada o en forma de panal de abeja. El mallado interno modifica la densidad de la pieza y reduce el tiempo de fabricación, pero al también resta resistencia a la pieza en general. En este caso las regiones internas o de relleno se caracterizan por un movimiento del cabezal de inyección más rápido que el resto de la pieza y un patrón de rejilla con una separación especificada por el usuario, usualmente dada por un porcentaje donde 100% es completamente sólido y 0% es una pieza completamente hueca.

Las regiones externas del modelo pueden ser clasificadas básicamente como contornos o superficies planas paralelas a la base de fabricación. Los contornos son generados al momento en que el modelo es dividido en capas, pero por si mismos no con capaces de cerrar la superficie completa de la pieza a fabricar, como se puede apreciar en la Figura 18, donde aparecen **regiones planas externas** y paralelas a la plataforma de fabricación que se encuentran abiertas.

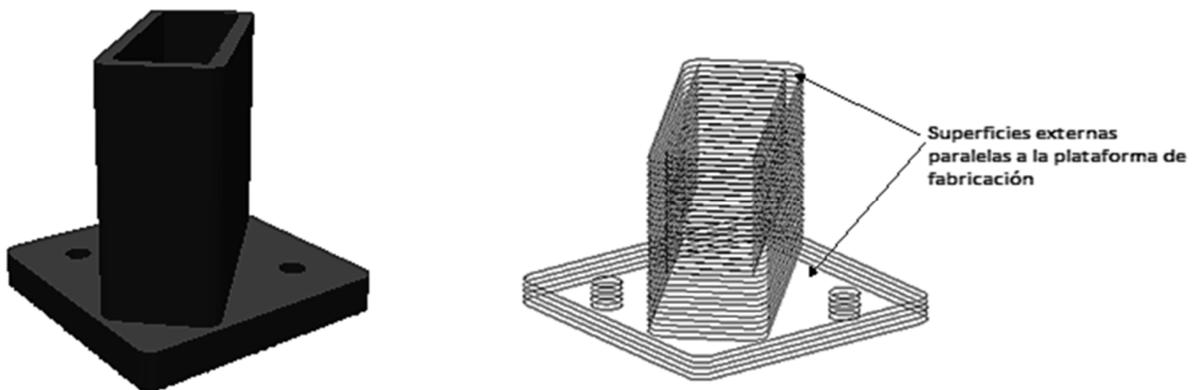


Figura 18 Contorno de generados por el proceso de segmentación.

Los **contornos de cada capa**, se depositan a una velocidad moderada con el fin de disminuir los efectos causados por los cambios bruscos de dirección en una forma de geometría compleja, especialmente donde se tienen bordes filosos. Una vez que el contorno es construido, las regiones internas a dichos contornos pueden ser depositadas a una velocidad más alta que la del depósito externo pues el contorno contiene el material que pudiese desviarse del trazado original.

Las **superficies planas externas** y paralelas a la plataforma de construcción, pueden ser fabricadas mediante un depósito de material rápido en un patrón de rejilla con una separación igual o ligeramente menor al diámetro de depósito de la boquilla del cabezal de extrusión de la máquina para cerrar el caparazón externo de la pieza a fabricar. En estas regiones de externas planas se presenta un efecto conocido como **flexionamiento**, donde el material depositado se escurre dentro de las secciones huecas del relleno interno por efecto de la gravedad, lo cual genera imperfecciones en la pieza a fabricar. Una solución al problema antes mencionado es que las secciones planas sean cerradas por medio del depósito de material en más de una capa, como se puede observar en la Figura 19, donde se aprecia que las imperfecciones que se generan se van desvaneciendo poco a poco.

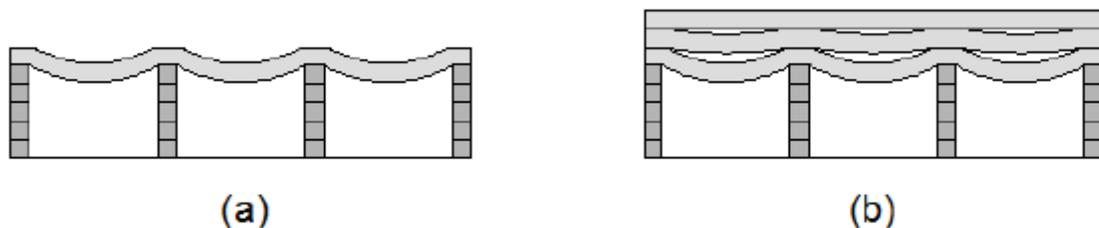


Figura 19 Flexionamiento en áreas de superficies planas. a) 1 sola capa b) múltiples capas de relleno solucionan el problema de flexionamiento.

La correcta identificación de las regiones de relleno, las regiones de superficies externas y los contornos resulta crucial, pues es posible que las tres estructuras se encuentren dentro de una misma capa, como se puede ver en la Figura 20, donde se aprecia una capa con contornos externos, una región de relleno interno y la región que corresponde la sección de la superficie externa paralela a la plataforma de fabricación. Así mismo es importante considerar que en

primera instancia se deposita el material para formar los contornos, posteriormente los trazos para la superficie externa y finalmente los trazos para el relleno interno de la pieza.

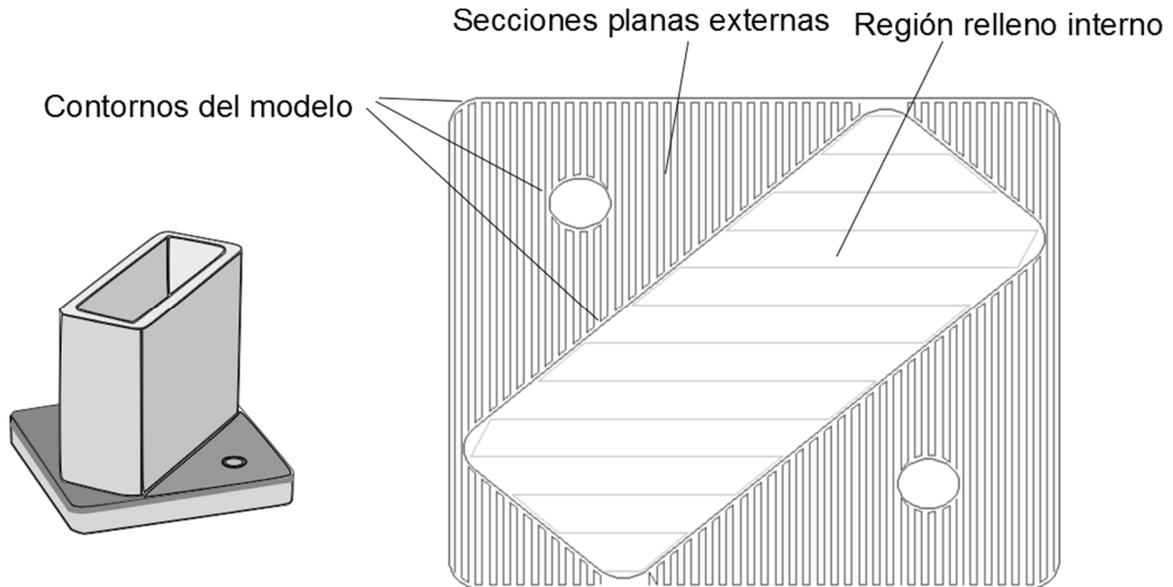


Figura 20 Regiones de proceso FDM de una capa.

Por último, los soportes son estructuras removibles, que no forman como tal parte de la pieza a fabricar, pero que son requeridas dependiendo de la geometría del modelo debido a que el plástico fundido necesita ser depositado sobre una estructura en la cual caer y sobre la cual empezar a construir parte de la pieza de interés (Véase Figura 21).

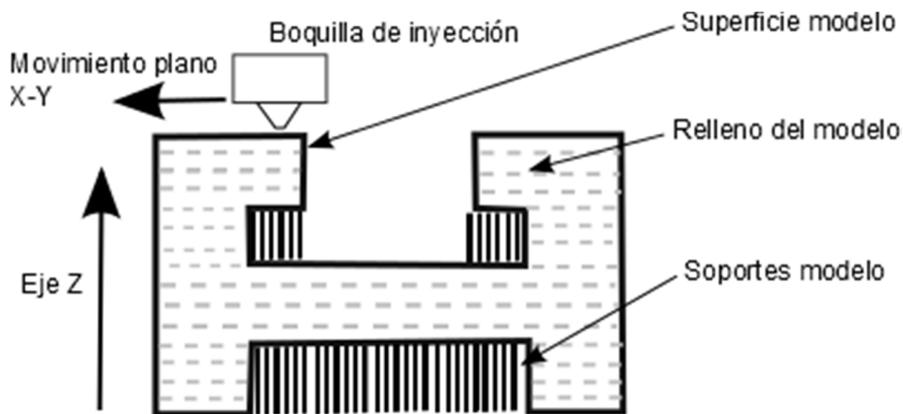


Figura 21 Corte lateral de una pieza fabricada por FDM

Dependiendo de la complejidad geométrica del modelo en ocasiones y de manera opcional, es necesario agregar estructuras de soporte en modelos que tienen secciones que se encuentran volando y no cuentan con una estructura inmediata inferior que soporte el material depositado (véase Figura 22). Dichas estructuras se general de manera automática y es el algoritmo de segmentación el que decide como colocar y en qué cantidad los soportes necesarios, usualmente solo en una sola dirección para todo el modelo, con el fin de que sean fácilmente removibles.

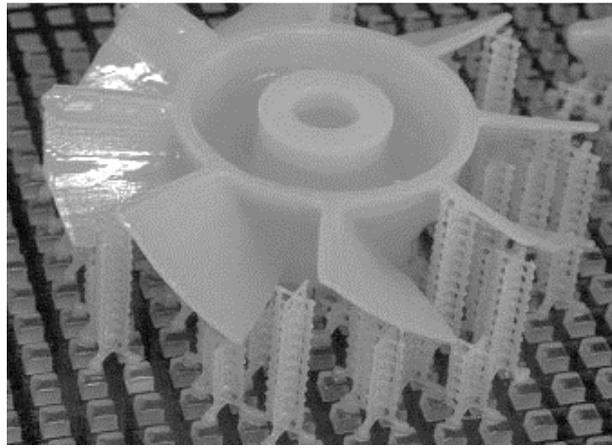


Figura 22 Ventilador con soportes.

Capítulo 4 Proceso de segmentación por inyección dispar.

El proceso de fabricación por medio de MA requiere de la división de modelo CAD 3D en secciones horizontales llamadas capas, las cuales son paralelas a la plataforma de fabricación del sistemas de MA. El desarrollo aquí presentado, está orientado al proceso de manufactura aditiva conocido como FDM, sin embargo, el proceso descrito aquí, también puede ser aplicable a otras técnicas de fabricación por un solo canal como son la estereolitografía (SLA) o la sinterización selectiva por láser (SLS).

En términos generales el proceso de segmentación requiere de diversas operaciones y cálculos a fin de poder generar correctamente las rutas y trazos para la fabricación de un modelo 3D, como se aprecia en el diagrama de la Figura 23, donde se resume el proceso propuesto de segmentación por inyección dispar, en la cual **se observa como cuarta etapa la selección de vectores para la inyección dispar, etapa que se ha adicionado al proceso genérico seguido por el proceso de segmentación tradicional donde se realizan cortes a una altura de capa fija para todo el volumen.** En este proceso de segmentación por inyección dispar permite una reducción de tiempo de fabricación al trabajar mediante flujos de inyección distintos y a alturas de capa distintas para regiones internas y externas del modelo 3D.

El diagrama de la Figura 23 muestra del lado derecho del diagrama los parámetros relacionados al proceso de fabricación por FDM y en el lado izquierdo se resumen la forma y tipos de datos obtenidos en cada una de las etapas correspondientes al proceso de segmentación, sin embargo los detalles específicos de cada una de las sub-etapas del proceso de segmentación serán discutidas a continuación.

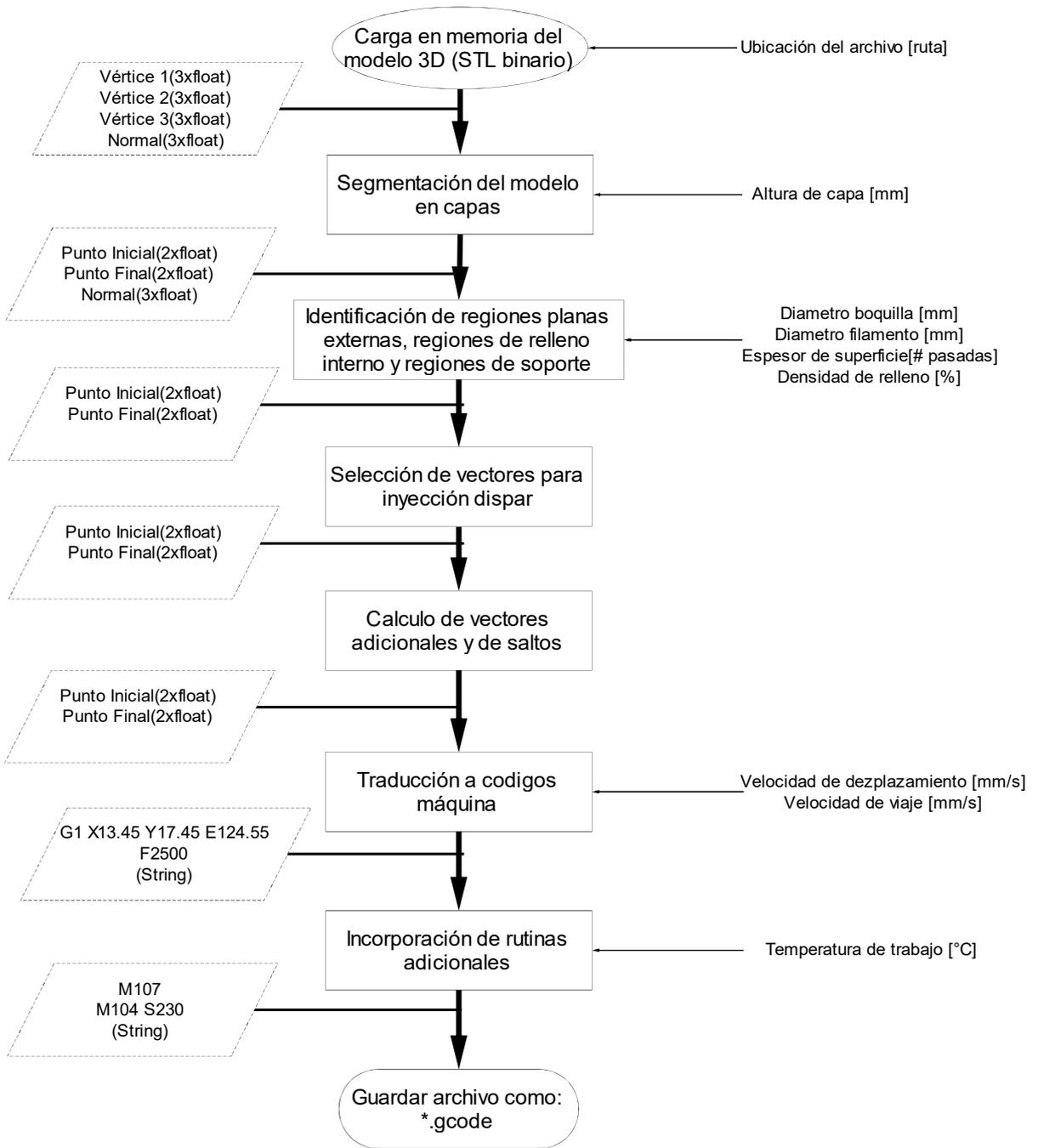


Figura 23 Diagrama de flujo del proceso de segmentación de un modelo 3D.

4.1 Carga en memoria del modelo 3D

El proceso de segmentación aquí descrito toma como base a el formato STL binario, donde un volumen es definido mediante una lista de planos triangulares únicos (véase Figura 24), definidos a partir de tres puntos sobre el espacio que corresponden a cada el vértice del plano triangular y un vector normal perpendicular a la superficie del plano triangular con longitud de una unidad. El vector normal y los vértices del plano triangular están expresados como coordenadas cartesianas, donde cada componente de las coordenadas está dada por un número flotante. Así el proceso de lectura de un archivo STL binario se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 25, donde se obtiene como información relevante:

- El número de triángulos modelo.
- Coordenadas de puntos máximos y mínimos del modelo 3D(xMax, yMax, zMax, xMin, yMin, zMin).
- Lista con las coordenadas de cada uno de los vértices y vectores normales de cada plano triangular del modelo 3D.

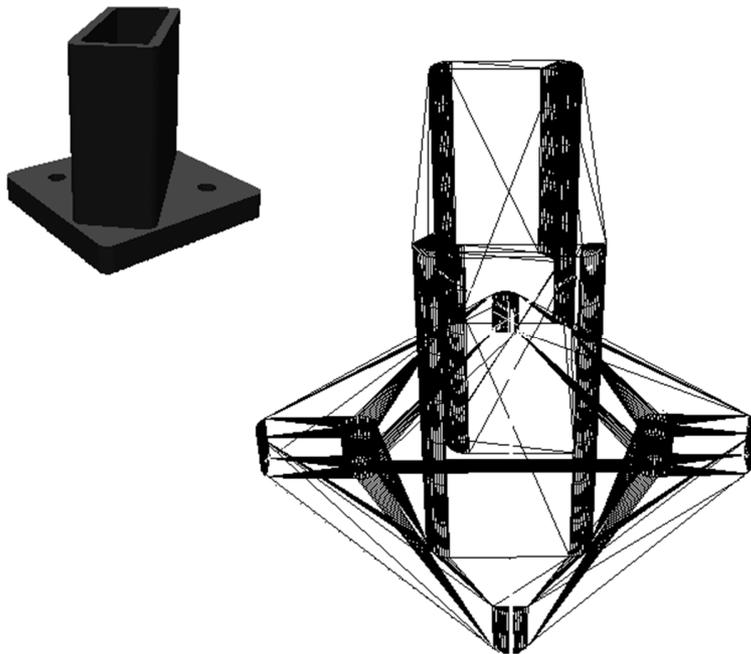


Figura 24 Modelo CAD descrito por triángulos

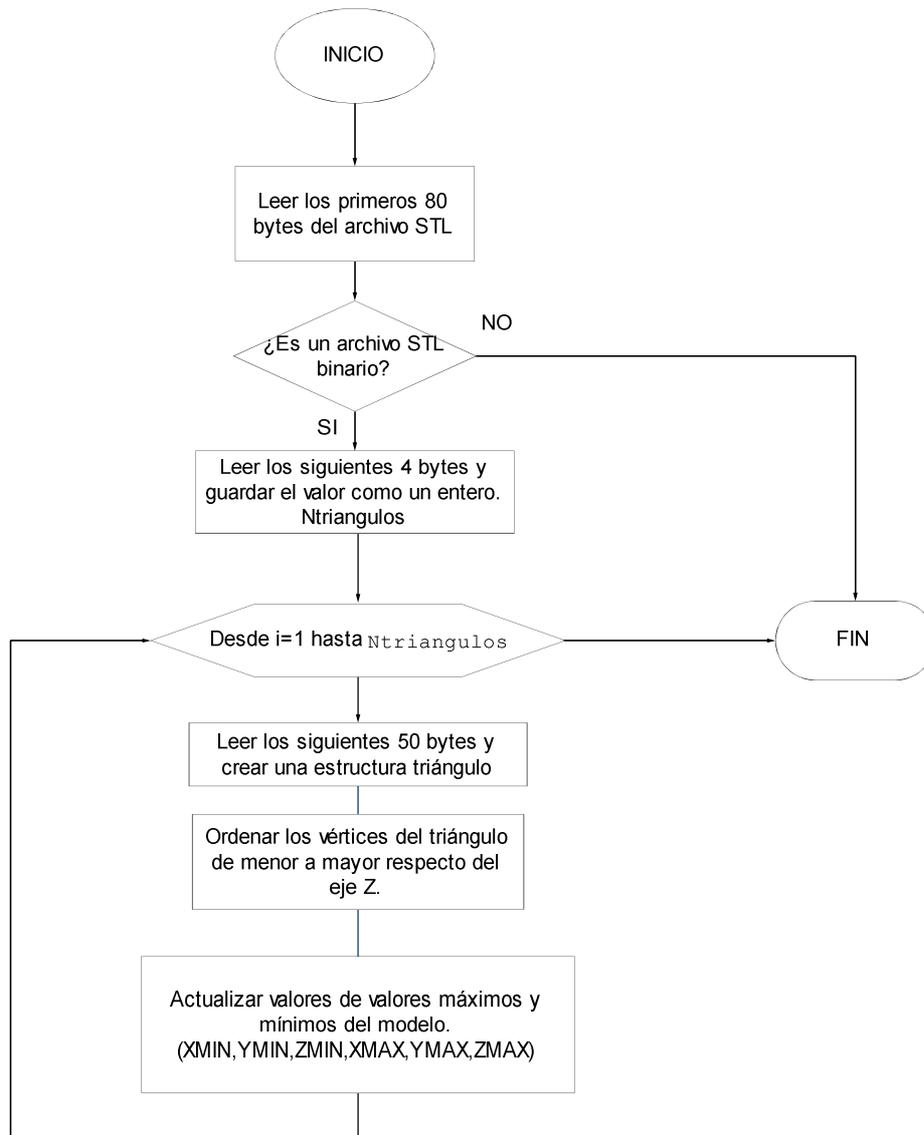


Figura 25 Diagrama de flujo de apertura de archivo STL binario.

4.2 Segmentación del modelo en capas

La segmentación del modelo en capas tiene como objetivo realizar cortes transversales y paralelos a la plataforma de fabricación, con el fin de obtener los perfiles que definen al modelo seccionado en capas, dichos cortes se realizan mediante el avance progresivo de un plano de corte desde la base del modelo a la parte superior del mismo, donde el avance del

plano de corte depende de un parámetro conocido como altura de capa, que en sistemas FDM es usual que tenga un valor entre 0.05 a 0.4 milímetros.

Existen diversos métodos propuestos para el corte de un modelo 3D, sin embargo *Zhengyan* y *Sanjay* [26] menciona que en esencia existen dos enfoques básicos usados en el corte de un volumen descrito por planos triangulares, dichos enfoques se enumeran a continuación:

- a. Dado un plano de corte, buscar los planos triangulares del modelo que se intersecan con el plano de corte.
- b. Dado un plano triangular, buscar los planos de corte que intersecan al triángulo.

En ambos enfoques el cálculo de los puntos de corte, se toma como base la ecuación paramétrica de la recta (ecuación 1) donde P_1 y P_2 , son dos puntos cualesquiera y t es la variable independiente.

$$P(t) = P_1 + (P_2 - P_1) * t \quad (1)$$

De esta manera en la Figura 26 se muestra un plano triangular cualquiera definido dentro del archivo STL y se asume que los cortes se harán paralelamente al plano X-Y a una altura Z dada (z_{corte}), por lo que la ecuación 1 puede ser expresada de la siguiente forma.

$$\begin{bmatrix} p_{corte_x} \\ p_{corte_y} \\ z_{corte} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1_x} \\ p_{1_y} \\ p_{1_z} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} p_{2_x} \\ p_{2_y} \\ p_{2_z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_{1_x} \\ p_{1_y} \\ p_{1_z} \end{bmatrix} \right) * t \quad (2)$$

Por lo que si solo se toma en cuenta la sola la tercera componente de la ecuación 2, t puede ser despejada fácilmente como se muestra a en la ecuación 3.

$$t = \frac{z_{corte} - p_{1_z}}{p_{2_z} - p_{1_z}} \quad (3)$$

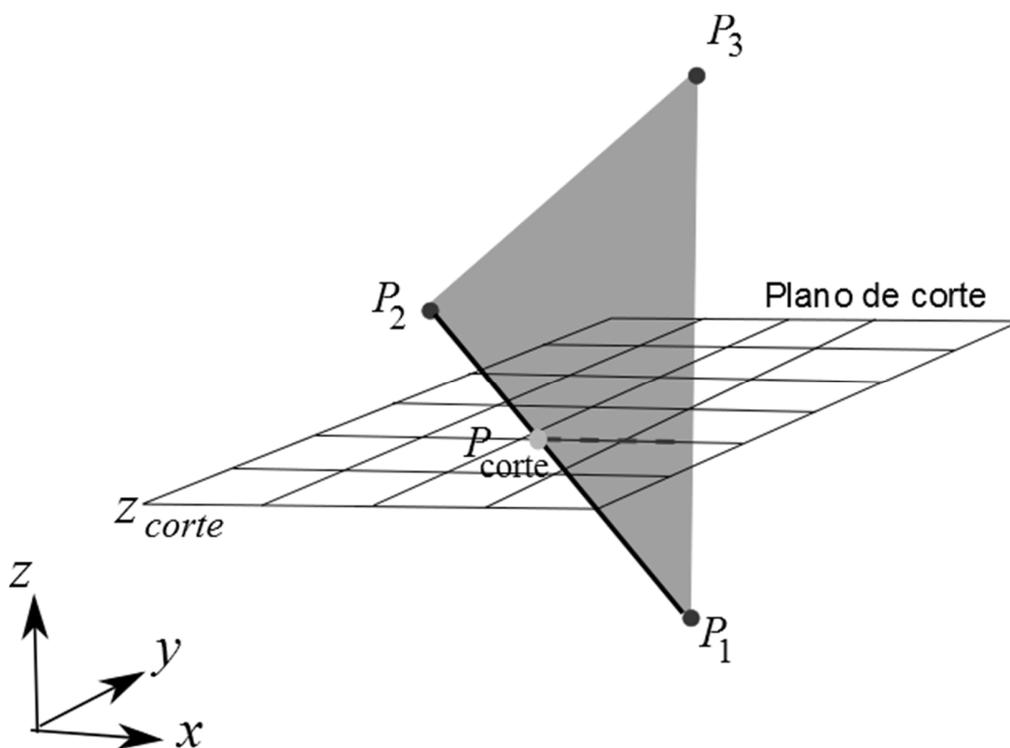


Figura 26 Cálculo de intersección entre plano de corte y plano triangular a una altura Z dada.

De esta forma el valor de t puede ser sustituido ahora en la primera y segunda componente de la ecuación 2, para poder calcular los valores de las coordenadas X-Y del punto de corte. Sin embargo como se aprecia en la Figura 26, la intersección de un plano de corte y un plano triangular genera al menos dos puntos de corte, los cuales definirán en este caso un vector que llamaremos **vector de contorno**, el cual se encuentra definido por un punto inicial y un punto final, y al mismo se le ha asociado el vector normal del plano triangular a partir del cual fue calculado. Los vectores de contorno se agrupan y se encadenan uno con su consecutivo de forma que se generen circuitos cerrados en la capa que se realiza el corte generándose polígonos cerrados como los que se pueden apreciar en la Figura 27.

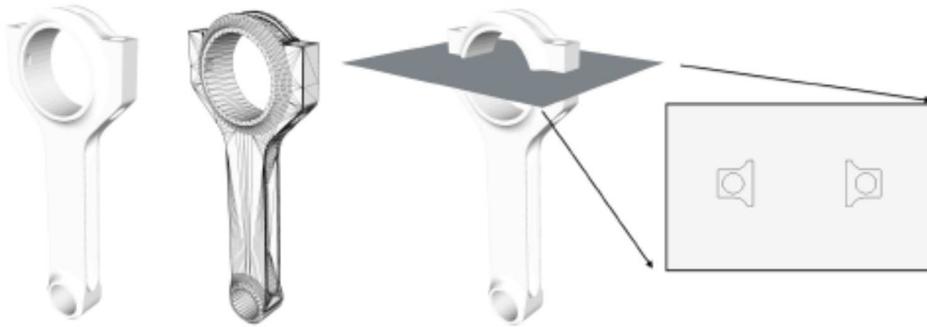


Figura 27 Principio de corte en modelo 3D [27]

Sin embargo, el acomodo de los vectores de contorno lleva una serie de pasos que se resumen en el diagrama de flujo de la Figura 28 y se explican a continuación.

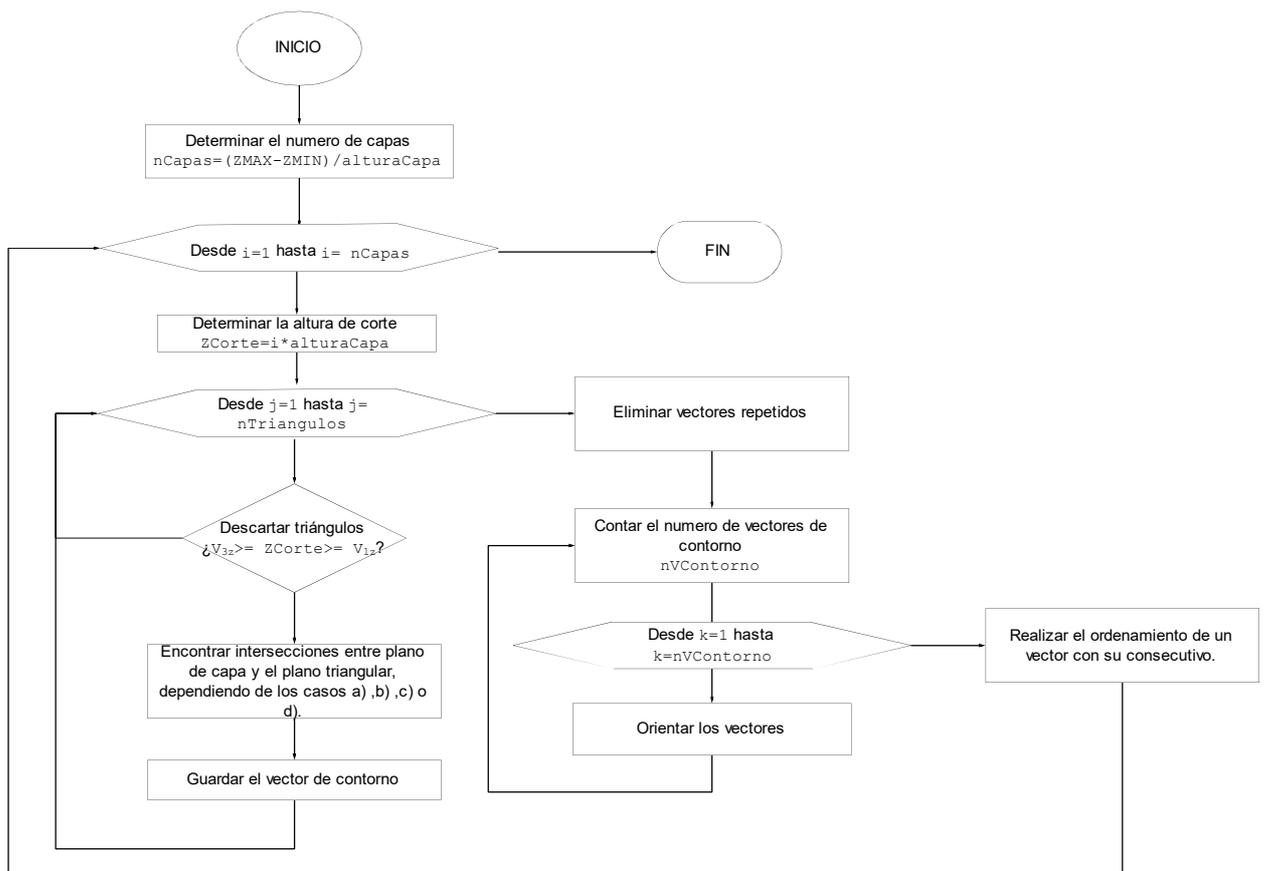


Figura 28 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores de contorno.

El proceso inicia determinando el número de capas del modelo, lo cual se puede hacer por medio de la resta del límite superior menos el límite inferior del modelo (respecto del eje Z) y dividiendo el valor obtenido entre la altura de capa designada. El valor obtenido se redondeará al entero siguiente, la altura Z quedará expresada por un número de capa, iniciando en 1.

A continuación se realiza el recorrido desde el límite inferior hasta el límite superior del modelo respecto del eje Z, incrementado el valor de Z de acuerdo a la altura de capa especificada.

En cada una de las capas o cortes se realiza una iteración en todos los planos triangulares del modelo, seleccionando los planos donde existe intersección con el plano de corte. En cada intersección se definirá el trazo de un vector de contorno al cual se le asignará el vector normal del plano triangular del cual procede y almacenando el vector generado. Existen 4 casos posibles de intersección entre el plano de corte y el plano del triangular, los cuales de se describen a continuación.

- a) Tres vértices del triángulo se encuentran sobre el plano. Para este caso, cada uno de los lados del triángulo genera un vector de contorno, sin embargo, estos vectores, se ignoran pues los vectores generados siempre se repiten con vectores generados por el caso b. (véase Figura 29).

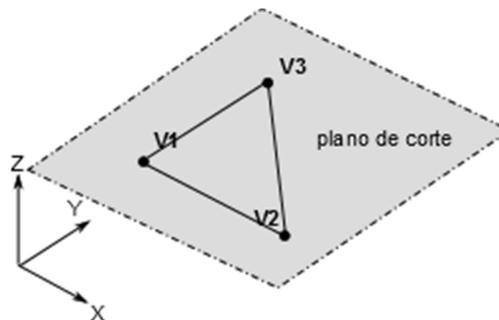


Figura 29 Tres vértices sobre el plano de corte.

- b) Solo dos vértices del triángulo se encuentran sobre el plano. Aquí el lado definido entre los vértices del triángulo corresponde a un vector de contorno (véase figuras 30 a y 30 bFigura 30), asignado a cualquiera de los dos vértices como punto inicial y el otro como el punto final.

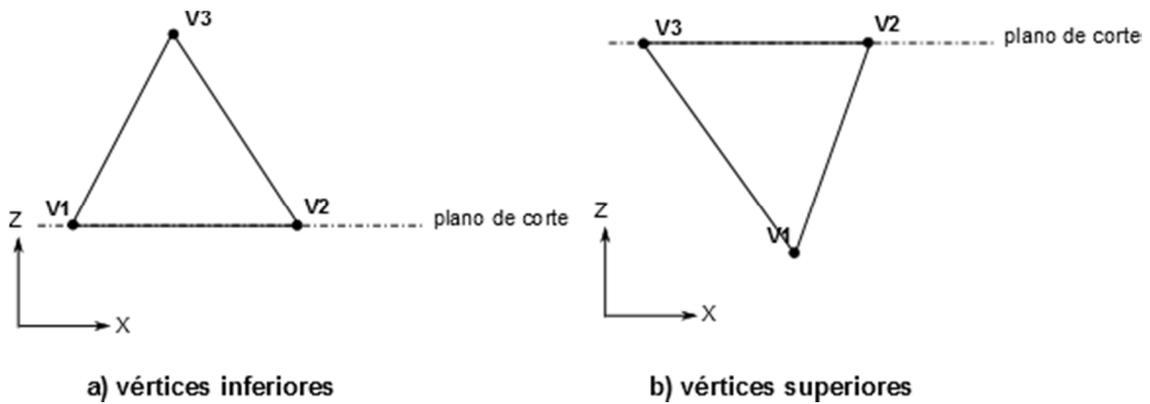


Figura 30 Dos vértices sobre el plano de corte.

- c) Solo un vértice se encuentra sobre el plano. Aquí tenemos 2 subcasos:
- i) El vértice que se interseca es el más alto o más bajo del triángulo respecto de Z, para lo cual en este caso no se genera ningún vector de contorno, pues la longitud del mismo sería nula (figuras 31 a y 31 b).
 - ii) El vértice medio del triángulo respecto de Z, se encuentra sobre el plano. Entonces el vector de contorno puede ser definido con el punto inicial desde el vértice medio al punto de corte que se encuentra entre los otros dos vértices (figura 31 c).

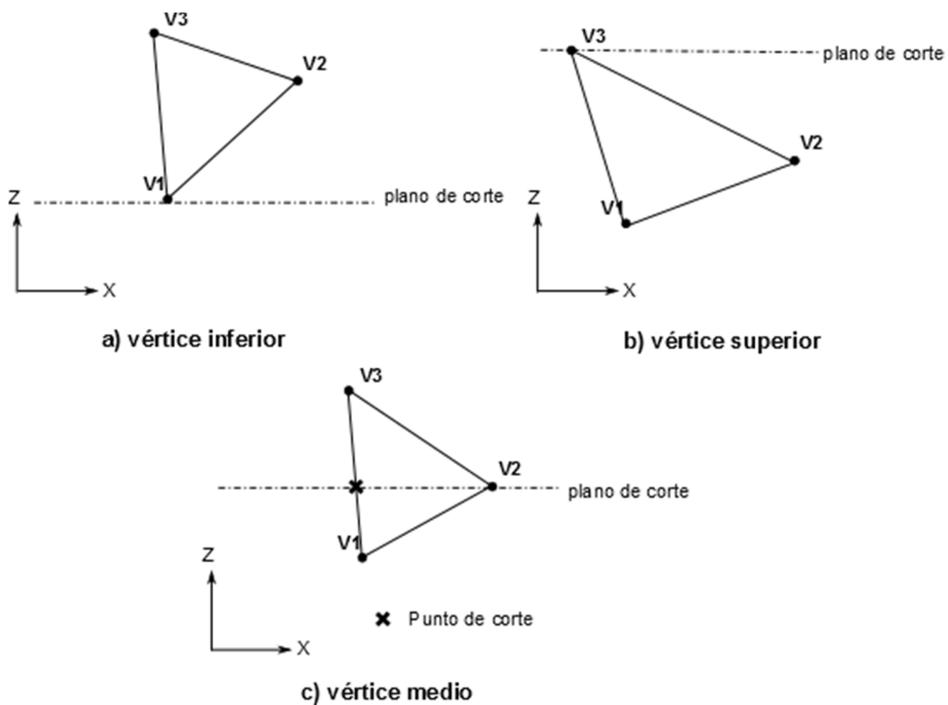


Figura 31 Un vértice sobre el plano.

- d) El plano de corte está dentro de los límites definidos por los vértices superior e inferior del triángulo y ningún vértice se encuentra sobre el plano de corte (véase figuras 32 a y 32 b). En este caso se generan dos puntos de corte y cualquiera de estos puede ser definido como el punto inicial del vector de contorno y el punto de corte restante será el punto final del vector de contorno.

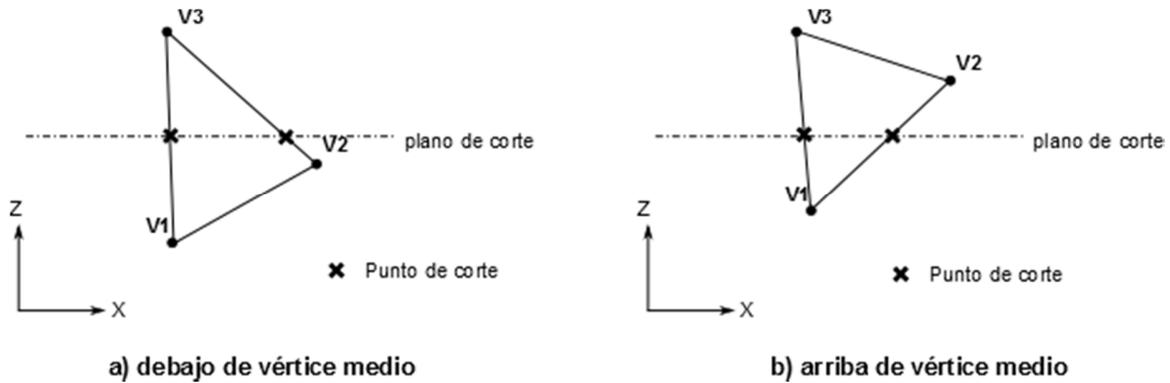


Figura 32 Ningún vértice sobre el plano.

En los casos c-ii y d son de especial atención pues en estos las intersecciones no se obtienen de manera explícita y es necesario hacer uso de la ecuación paramétrica de la recta para poder calcular los puntos de intersección.

Una vez realizada la iteración sobre todos los planos triangulares, se debe de tener un conjunto de vectores que definen el contorno del modelo a la altura de corte realizada, sin embargo es de notar que el caso b, puede generar más de un vector repetido producto de dos planos triangulares contiguos, por lo que estos vectores deben ser eliminados¹.

Una vez los vectores repetidos sean eliminados, se procede a la orientación de cada uno de los vectores de contorno, donde la orientación del vector se realiza por medio de la comparación de la dirección a la que apunta el vector de contorno calculado y la dirección a la cual apunta el producto cruz entre el vector normal del triángulo de interés y un vector auxiliar paralelo al eje Z, como puede apreciarse en la Figura 33. El producto cruz del vector Z con el vector normal, siempre genera un vector paralelo al vector de contorno del triángulo de interés, por lo que el ángulo entre ambos vectores siempre será de 0 grados cuando los

¹ Hyung-Jung et. al. [38] proponen otro método de corte por medio del desplazamiento de vértices con el cual se evitan los vectores repetidos.

vectores apunten en la misma dirección y 180 grados cuando los vectores apunten en dirección contraria. De manera que si un vector apunta en la dirección contraria este es reorientado intercambiando el punto final con el punto inicial del vector.

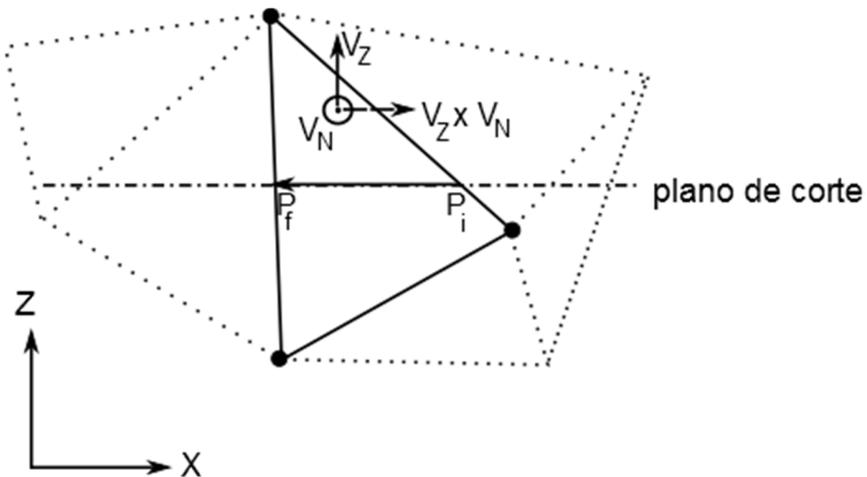


Figura 33 Ejemplo de vector orientado en dirección incorrecta.

Como producto de la orientación de los vectores de contorno, se tiene que los contornos externos al modelo deben de estar dirigidos en la dirección contraria a las manecillas del reloj (CCW) y los contornos internos de la pieza deben de estar orientados en dirección de las manecillas del reloj (CW) (véase Figura 34).

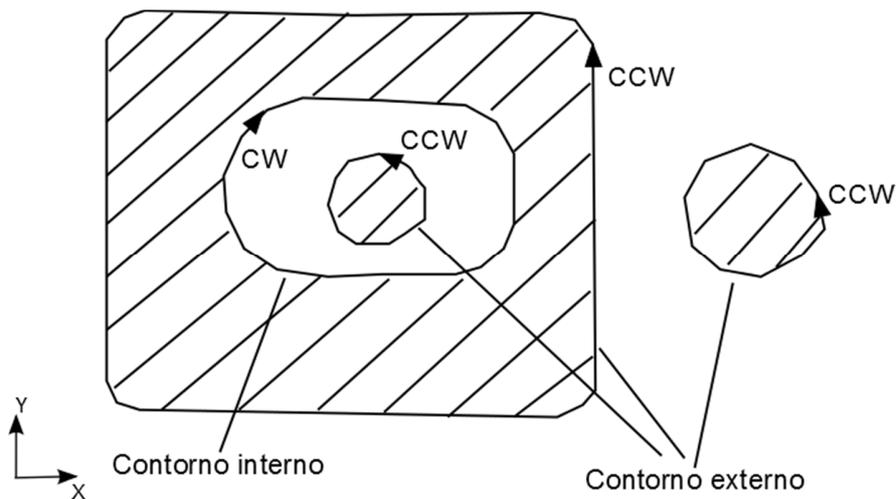


Figura 34 Orientación de contornos.

Una vez que los vectores se encuentran orientados, se procede a encadenar cada vector con su consecutivo, esto se realiza tomando un vector y buscando el consecutivo en el cual el punto final del vector coincida con el punto inicial del vector siguiente, el proceso se repite hasta que todos los vectores han sido encadenados.

El proceso de corte, eliminación de vectores repetidos, orientación y encadenamiento se repite en cada una de las capas hasta haber procesado el modelo completo, generando un resultado similar al que se observa en la Figura 35.

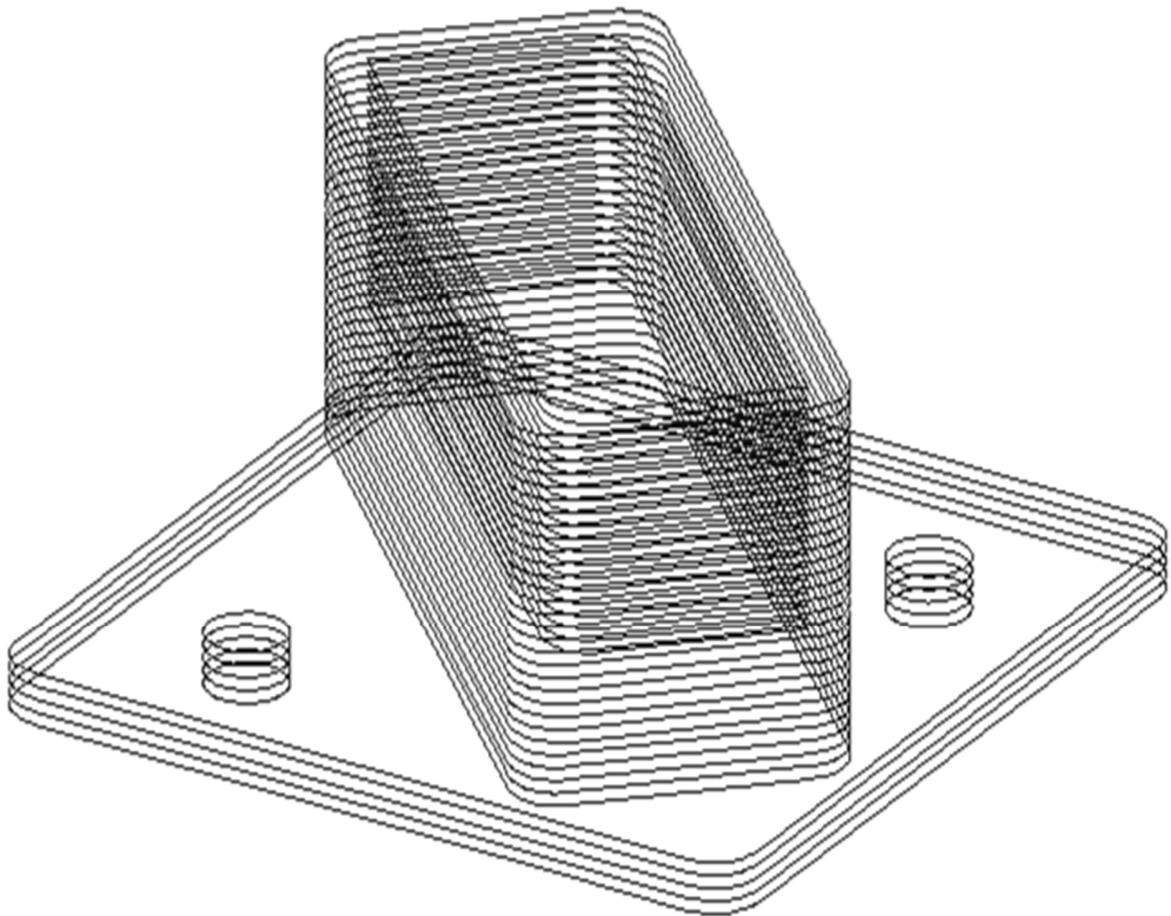


Figura 35 Modelo 3D segmentado por capas (contornos)

4.3 Identificación de regiones de superficie externas, internas y soportes

Parte esencial de la fabricación mediante FDM es la correcta identificación de las regiones externas planas, regiones internas del modelo y regiones de soportes, pues dichas regiones determinan comportamientos diferentes para la inyección de material².

Existen diversos métodos para identificar y definir las regiones de fabricación dentro de cada una de las capas del proceso FDM, sin embargo el proceso que principalmente es usado engloba tres etapas básicas, que a continuación se describen:

- **Corrimiento de contornos.** El corrimiento de los contornos de cada capa se realiza con el objetivo de no superponer la inyección de material que forma los contornos externos de la pieza, con el patrón de depósito interno a los contornos (véase Figura 36). Dicho corrimiento depende en esencia del diámetro de la boquilla de inyección, sin embargo es usual que este valor sea de la mitad o un poco más del diámetro de dicha boquilla de inyección.

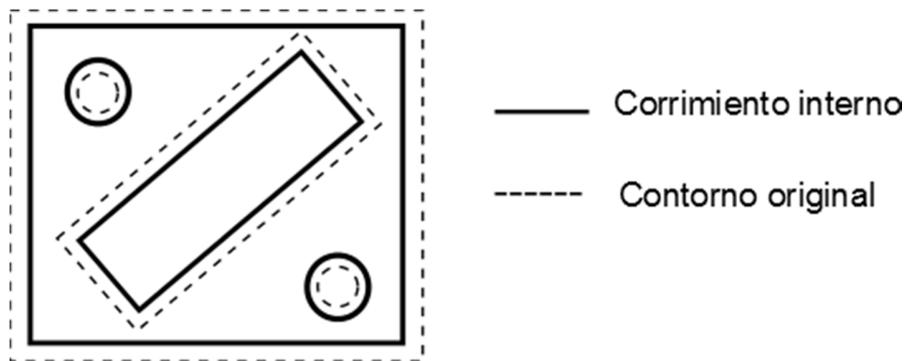


Figura 36 Ejemplo de corrimiento de contornos.

- **Operaciones booleanas entre contornos.** Para poder identificar las regiones de superficies planas externas, regiones de relleno interno y de soportes se realizan comparativas entre los contornos superiores e inferiores de la capa de interés (véase

² Los comportamientos particulares de cada una de las regiones se explican en la sección 3.4 Modelado por hilo fundido, descripción del proceso y limitaciones.

Figura 37). Dichas comparaciones hacen uso de algoritmos de superposición de polígonos como los propuestos por *Vatti* [28], *Puri* [29], *Matinez et. al.* [30] y *Greiner* [31].

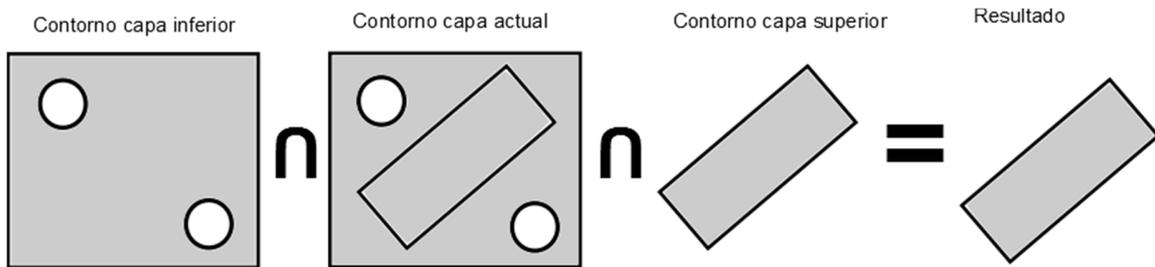


Figura 37 Ejemplo de intersección en 3 polígonos compuestos.

- **Trazado de patrón de rejilla.** Una vez identificada la región, los contornos resultantes de las operaciones booleanas, son cortados mediante un patrón de rejilla en *zig-zag* (véase Figura 38). Las rejillas de cada capa se entrecruzan a fin de dar mayor rigidez a la pieza a fabricar.

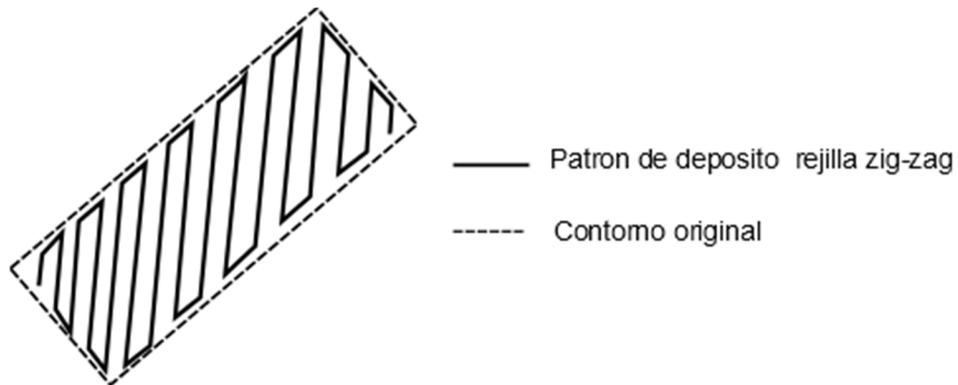


Figura 38 Ejemplo de trazo rejilla *zig-zag*.

Los tres procesos antes mencionados es común que se realicen por separado, es decir, el corrimiento interno del contorno se realiza como una operación donde se itera sobre todos los vectores que componen el contorno de la capa, para después ser procesado por algún algoritmo de superposición de polígonos, proceso que nuevamente itera sobre todos los vectores que componen el contorno con corrimiento. El resultado de la superposición de los

contornos de capas inmediatas superiores e inferiores es otro polígono o grupo de polígonos que determinan cierta región de trabajo; dichos polígonos son finalmente divididos mediante un patrón de rejilla el cual será la base del trazado para la deposición del material inyectado en la capa de interés, y donde nuevamente se itera sobre todos los vectores que componen el resultado de la operación de superposición de polígonos.

El enfoque que en este trabajo se presenta, cambia el orden de dichas operaciones pues se vale del hecho de que en muchas de las regiones de fabricación se requieren patrones de rejilla; así el procedimiento propuesto en este trabajo el corrimiento y las operaciones booleanas son realizados mientras es trazado el patrón de rejilla, es decir, en cada corte del patrón de rejilla se realiza el corrimiento del contorno y las operaciones booleanas correspondientes para la identificación de la región a tratar. El proceso que aquí se describe tiene la ventaja de reducir el tiempo de procesamiento del modelo 3D, pues por cada capa a procesar se realiza un solo ciclo en el cual se realizan los cortes del patrón de rejilla.

Por otro lado, es importante hacer notar que el patrón de rejilla es usado en las regiones planas externas, las regiones de relleno interno y las estructuras de soporte (véase Figura 39), por lo que el procedimiento de cálculo e identificación de cada una de estas regiones es similar, así a continuación los procesos de trazado del patrón de rejilla, corrimiento y operaciones booleanas serán descritos de forma genérica y más adelante se darán los detalles de su uso específico en la identificación de cada una de las regiones antes descritas.

4.3.1 Trazado de patrón de rejilla y corrimiento

El trazado de rejilla en cada una de las capas de manera que se obtiene un patrón cuadrículado que le da mayor rigidez al modelo, de esta forma para el trazado del patrón de rejilla se realiza un barrido progresivo en el eje X o eje Y según corresponda el caso, donde los incrementos de barrido estarán dados por el diámetro de la boquilla para las regiones planas externas, por la densidad de relleno para las regiones de relleno interno o un valor de entre tres a cinco milímetros para las regiones de soportes. En cada incremento del barrido se buscan los

segmentos del contorno de la capa que intersecan con la línea de corte del barrido como se aprecia en la Figura 40.

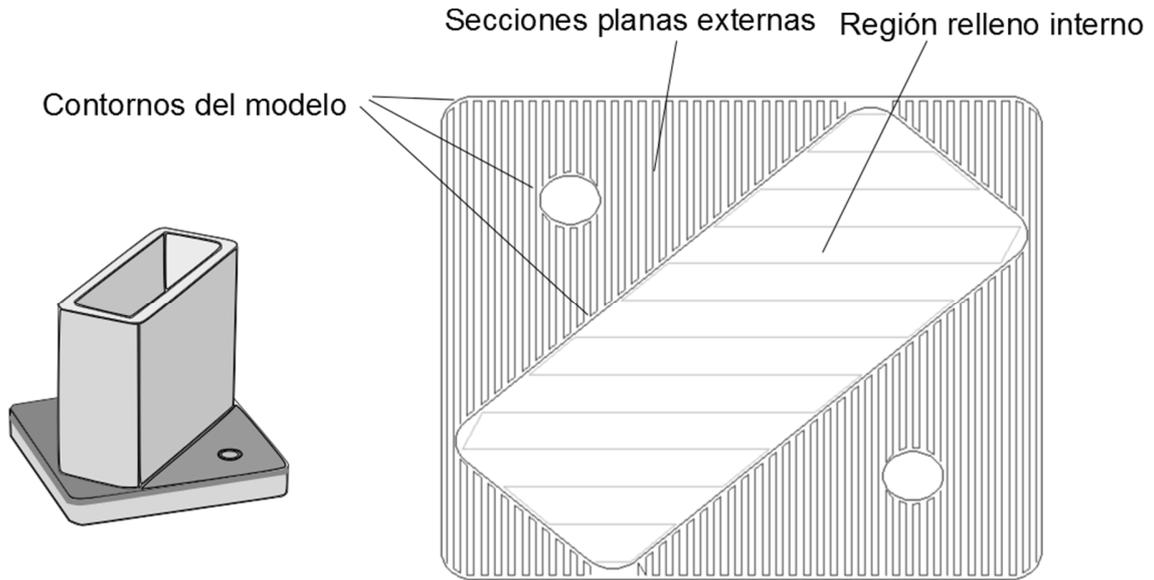


Figura 39 Ejemplo de patrones de rejilla en regiones planas externas y regiones internas en una capa.

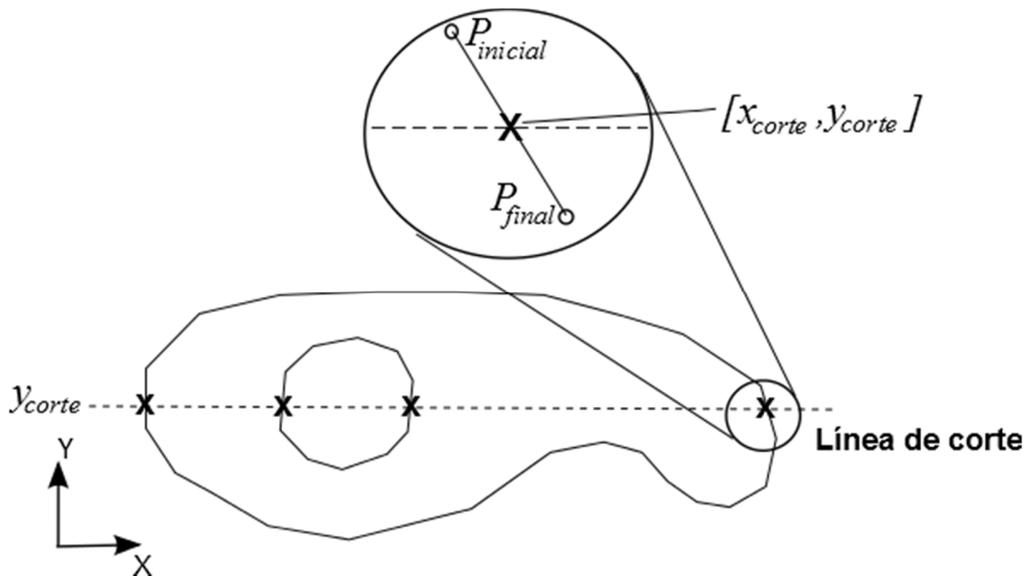


Figura 40 Búsqueda de segmentos que intersecan la línea de corte.

El proceso de cálculo de la intersección tiene dos restricciones, la primera restricción sólo considera a los vectores de contorno que pueden generar una intersección, es decir la línea de corte debe estar dentro de los puntos inicial y final del vector de contorno. La segunda restricción considera sólo los vectores de contorno que no son paralelos al eje X (para una rejilla paralela al eje X), es decir que su pendiente debe ser diferente de cero (ver ecuación 4).

$$m = \frac{P_{final_y} - P_{inicial_y}}{P_{final_x} - P_{inicial_x}} \neq 0 \quad (4)$$

Para los vectores de contorno que cumplen ambas restricciones se puede obtener el punto de corte de manera sencilla por medio de la ecuación de la recta, pues se conoce el corte sobre el eje Y (para un patrón de rejilla paralelo al eje X), de manera que solo se hace necesario calcular el punto de corte en la coordenada x, por medio de la ecuación 5.

$$x_{corte} = \frac{y_{corte} - P_{inicial_y}}{m} + P_{inicial_x} \quad (5)$$

Una vez se encuentran los puntos de corte, es necesario determinar los segmentos que corresponden a la sección internas del contorno, para lo cual existen diversos métodos, sin embargo uno de los métodos más populares es el método conocido como regla impar-par [32], la cual consiste en numerar los puntos de intersección de izquierda a derecha, trazando los segmentos internos desde cortes impares a pares, como se aprecia en la Figura 41.

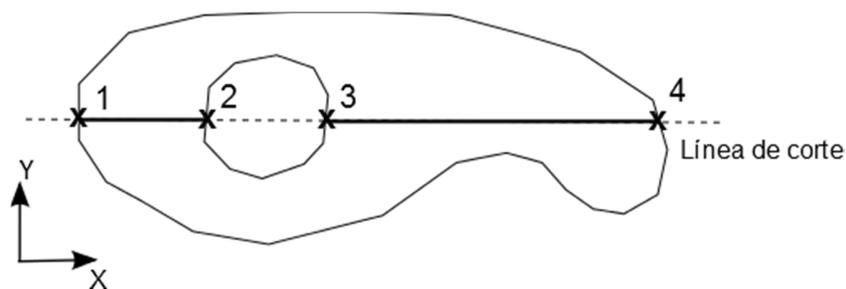


Figura 41 Ejemplo de regla impar-par

Sin embargo, la regla impar-par puede presentar problemas en contornos cóncavos o convexos, donde el valle o el pico de los contornos coincidan con la línea de corte provocando la pérdida de segmentos internos del contorno como puede apreciarse en la Figura 42.

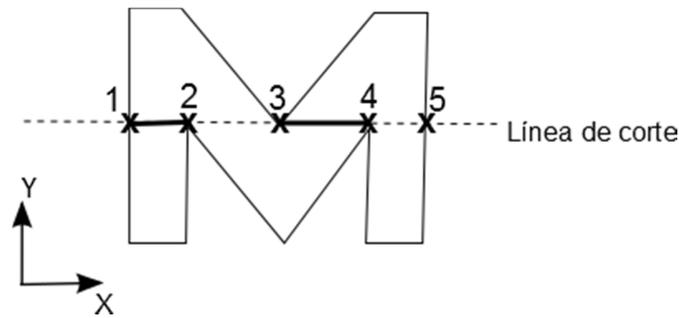


Figura 42 Errores en la regla impar-par

Otra opción para el trazado de las regiones internas es la propuesta de *Xiaomao et. al.* [33], quienes hacen uso del sentido del contorno, donde los contornos externos fueron trazados en contra de las manecillas del reloj y los internos en el sentido de las manecillas del reloj, sin embargo la propuesta es muy elaborada y no especifican si se obtienen mejores resultados en la identificación de las regiones externas planas y regiones de relleno interno.

El método implementado aquí, presenta un procedimiento alternativo similar a la regla impar-par, pero que hace uso del vector normal asociado al vector de contorno, recordando que dicho vector normal proviene del plano triangular del cual fue generado el vector de contorno.

El proceso de cálculo mediante el uso del vector normal es sencillo y se ilustra en la Figura 43, una vez que se encuentran las intersecciones entre el contorno de la capa y la línea de corte, se procede al ordenamiento de izquierda a derecha de los puntos de corte, para posteriormente trazar un vector del primer corte al segundo corte, y a continuación se verifica que el ángulo entre el vector normal y el vector trazado sea mayor a 90 grados, pues si el ángulo es menor significa que el vector trazado no describe un área interna del contorno y por lo tanto este vector es descartado. El proceso continúa de la misma forma con el segundo y tercer punto de corte, hasta que todos los puntos de corte sean verificados.

Otra de las ventajas de uso del vector normal es que facilita corrimientos externos e internos al contorno que se está segmentando, pues en el caso de una rejilla paralela al eje X, la primera componente del vector normal indica claramente la parte externa de la pieza, lo que

permite fácilmente saber si se debe sumar o restar el valor del corrimiento a la coordenada del punto de corte, como se puede apreciar en la Figura 44.

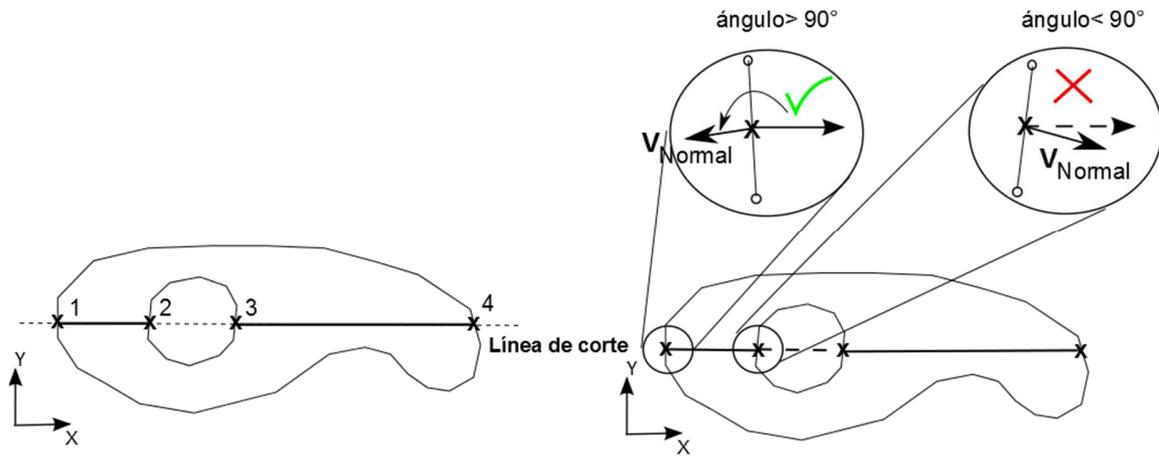


Figura 43 Detección de áreas internas usando vector normal.

Una vez se termina de realizar el barrido de las líneas de corte y se han identificado las secciones internas al contorno, el resultado debe apreciarse como lo que se observa en la Figura 45.

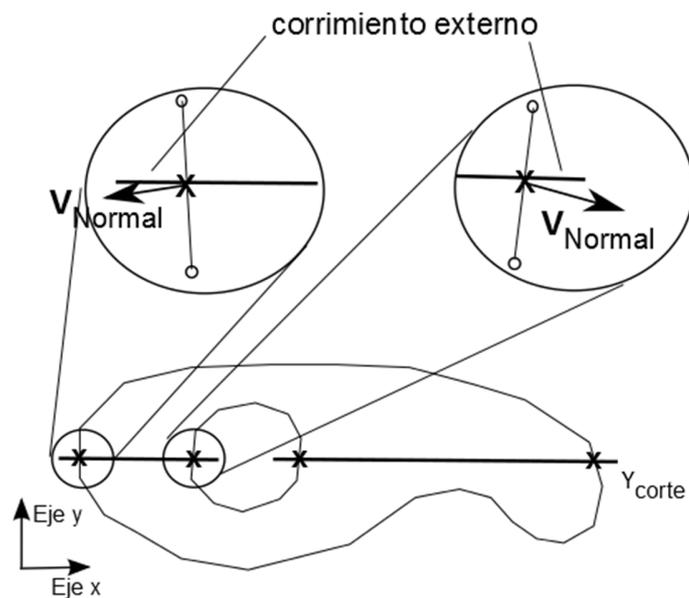


Figura 44 Ejemplo de corrimiento externo.

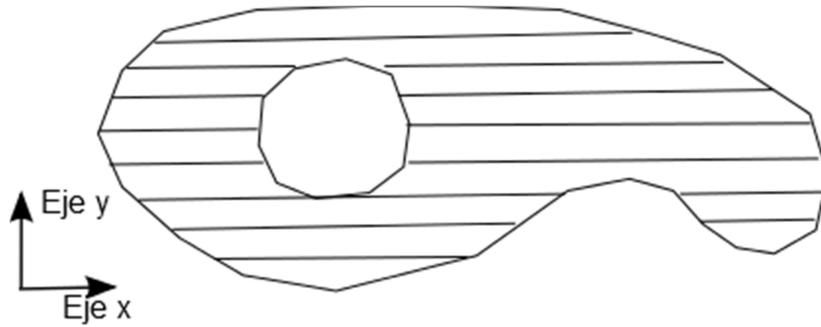


Figura 45 Ejemplo de patrón de rejilla paralelo al eje X.

4.3.2 Operaciones booleanas entre vectores colineales (OBVC).

El cálculo de operaciones booleanas que a continuación se describe es sólo aplicable para vectores colineales paralelos al eje X, sin embargo los principios del mismo pueden ser extrapolados a vectores colineales con una alineación diferente, realizando la correspondiente rotación de coordenadas.

El proceso toma como base dos vectores colineales superpuestos (véase Figura 46), que por el momento llamaremos vector A y vector B; el resultado de la operación booleana será almacenado en el vector R, en todos los casos los puntos iniciales son definidos del lado izquierdo del vector y el punto final del lado derecho del vector. La primer restricción necesaria para aplicar el proceso es asegurar la superposición de dos vectores colineales, dicha restricción está dada por la ecuación 6.

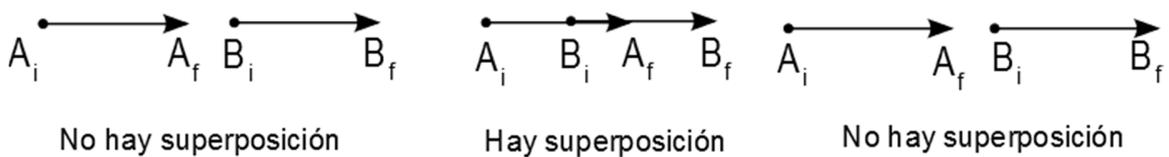


Figura 46 Ejemplo de superposición entre vectores colineales.

$$A_{inicial_x} < B_{final_x} \cap A_{final_x} > B_{inicial_x} \quad (6)$$

Una vez que se tienen los vectores donde existe superposición, la comparación de dichos vectores superpuestos se reduce a 4 casos base:

- Superposición izquierda (véase ecuación 7).
- Superposición derecha (véase ecuación 8).
- Superposición completa (véase ecuación 9).
- Superposición menor (véase ecuación 10).

$$A_{inicial_x} > B_{inicial_x} \cap A_{final_x} > B_{inicial_x} \quad (7)$$

$$A_{inicial_x} < B_{inicial_x} \cap A_{final_x} < B_{inicial_x} \quad (8)$$

$$A_{inicial_x} > B_{inicial_x} \cap P_{final_{A_x}} < B_{inicial_x} \quad (9)$$

$$A_{inicial_x} < B_{inicial_x} \cap A_{final_x} > B_{inicial_x} \quad (10)$$

De manera que en el caso de la unión entre dos vectores (véase Figura 47), el resultado de dicha operación estará dado por:

- Superposición izquierda. $R_{inicial} = B_{inicial_x}$ $R_{final} = A_{final_x}$
- Superposición derecha. $R_{inicial} = A_{inicial_x}$ $R_{final} = B_{final_x}$
- Superposición completa. $R_{inicial} = B_{inicial_x}$ $R_{final} = P_{final_{B_x}}$
- Superposición menor. $R_{inicial} = A_{inicial_x}$ $R_{final} = A_{final_x}$

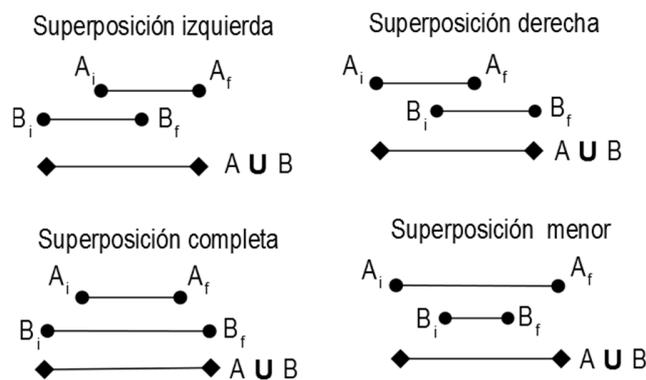


Figura 47 Cálculo de la unión entre dos vectores superpuestos.

El proceso es similar para el caso de la intersección entre dos vectores superpuestos (véase Figura 48).

- Superposición izquierda. $R_{inicial} = A_{inicial_x}$ $R_{final} = B_{final_x}$
- Superposición derecha. $R_{inicial} = B_{inicial_x}$ $R_{final} = A_{final_x}$
- Superposición completa. $R_{inicial} = A_{inicial_x}$ $R_{final} = A_{final_x}$
- Superposición menor. $R_{inicial} = B_{inicial_x}$ $R_{final} = B_{final_x}$

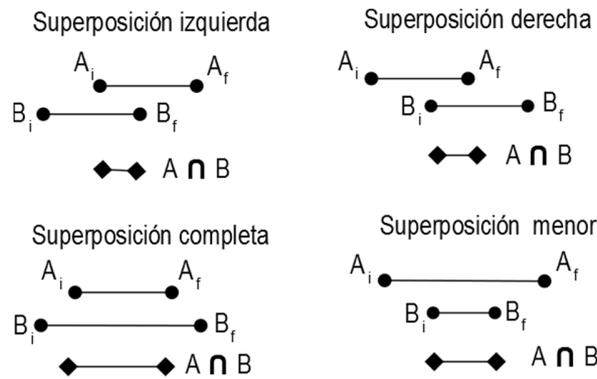


Figura 48 Cálculo de la intersección entre dos vectores superpuestos.

Finalmente, el proceso de diferencia entre dos vectores superpuestos (véase Figura 49), está dado por:

- Superposición izquierda. $R_{inicial} = B_{final_x}$ $R_{final} = A_{final_x}$
- Superposición derecha. $R_{inicial} = A_{inicial_x}$ $R_{final} = B_{inicial_x}$
- Superposición completa. En este caso no hay vector resultado.
- Superposición menor. En este caso se generan dos vectores dados por:

$$R_{1_inicial} = A_{inicial_Ax} \quad R_{1_final} = B_{inicial_x}$$

$$R_{2_inicial} = B_{final_Bx} \quad R_{2_final} = A_{final_x}$$

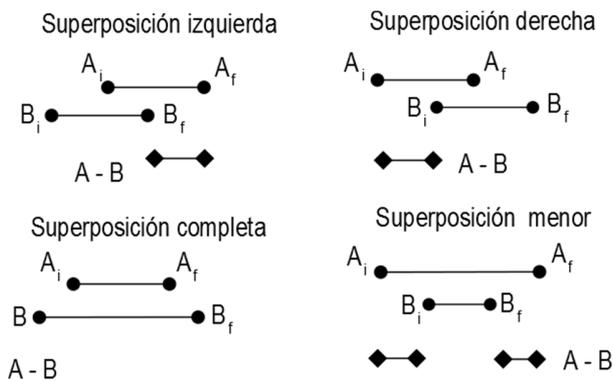


Figura 49 Cálculo de diferencia entre dos vectores superpuestos.

4.3.3 Identificación de regiones externas planas

El patrón de rejilla de las regiones externas planas está delimitado por el diámetro de la boquilla de inyección y el espesor de la superficie que se encuentra expresado como un número de capas superpuestas con el fin de reducir el efecto de flexionamiento presente en las piezas fabricadas por FDM. Las capas superpuestas deben de mantener patrones de rejilla entrecruzados, que reducen el efecto de flexionamiento y son especificadas mediante un parámetro conocido como número de pasadas.

El desarrollo que a continuación se muestra solo toma en cuenta (por fines de simplicidad) una capa inmediata superior y una capa inmediata inferior, sin embargo las piezas fabricadas en la sección de pruebas toman en cuenta hasta tres capas inmediatas superiores e inferiores.

El proceso de identificación de las regiones externas planas se realiza por cada segmento de corte del patrón de rejilla en cada una de las capas del modelo, el trazado de la rejilla debe de quedar ligeramente dentro del contorno trazado pues la inyección del material no puede quedar exactamente sobre el contorno, lo que provocaría imperfecciones al fabricar la pieza; para las piezas fabricadas el corrimiento hacia dentro del modelo delimitado fue de 0.3 milímetros.

En el diagrama de flujo de la Figura 51 muestra el proceso de identificación de regiones planas externas y se describe a continuación.

- 1) Excluir la primera y última capa del modelo.
- 2) Iniciar el recorrido desde la segunda capa hasta la penúltima capa del modelo.
- 3) Por cada una de las capas, determinar la dirección del patrón de rejilla, en las capas pares la rejilla puede ser paralela al eje X y en capas impares la rejilla paralela al eje Y.
- 4) Generar el patrón de rejilla con la dirección determinada, donde se realizarán cortes desde del valor mínimo en la coordenada Y al valor máximo en la coordenada Y de los puntos descritos por el contorno de la capa que se está procesando (valido para un patrón de rejilla paralelo al eje X).
- 5) Por cada corte del patrón de rejilla, es necesario calcular segmentos a la altura de la línea de corte del patrón de rejilla, en la capa actual, la inmediata superior y la inmediata inferior (véase Figura 50). Los segmentos son calculados con un corrimiento interno de 0.3mm, mediante el proceso descrito en secciones anteriores que hace uso del vector normal.
- 6) Se procede a calcular la diferencia del segmento de la capa actual menos el segmento de la capa superior, así como la diferencia del segmento de la capa actual menos el segmento de la capa inferior (véase Figura 50).
- 7) Las diferencias calculadas en el paso anterior, describen dos nuevos segmentos los cuales se les aplicara la operación de unión (véase Figura 50).
- 8) Realizar un incremento en la línea de corte del patrón de rejilla igual al valor del diámetro de la boquilla.
- 9) Los pasos 5, 6, 7 y 8 se repiten hasta terminan de general el patrón de rejilla en la capa de interés.
- 10) Los procesos descritos del punto 3 al 9 son repetidos en cada una de las capas del modelo salvo la primera y última capas.

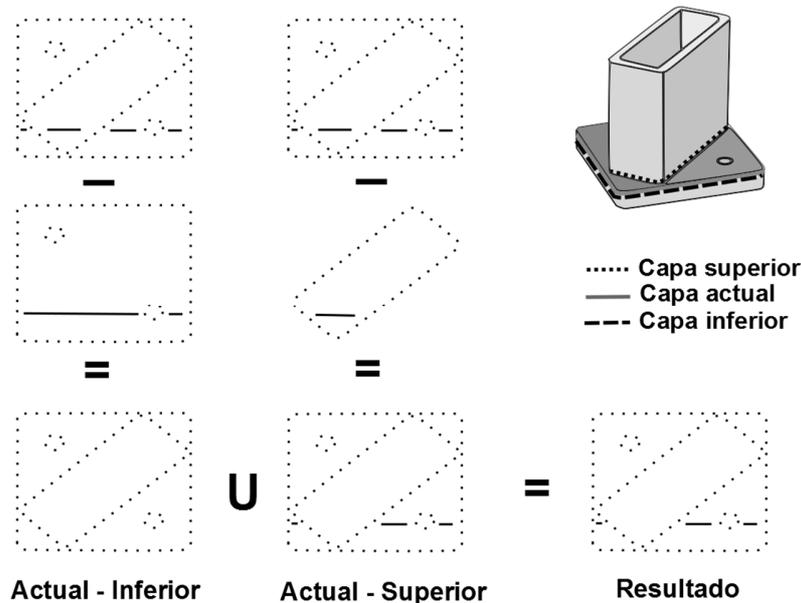


Figura 50 Ejemplo de cálculo de un segmento del patrón de rejilla para regiones externas planas

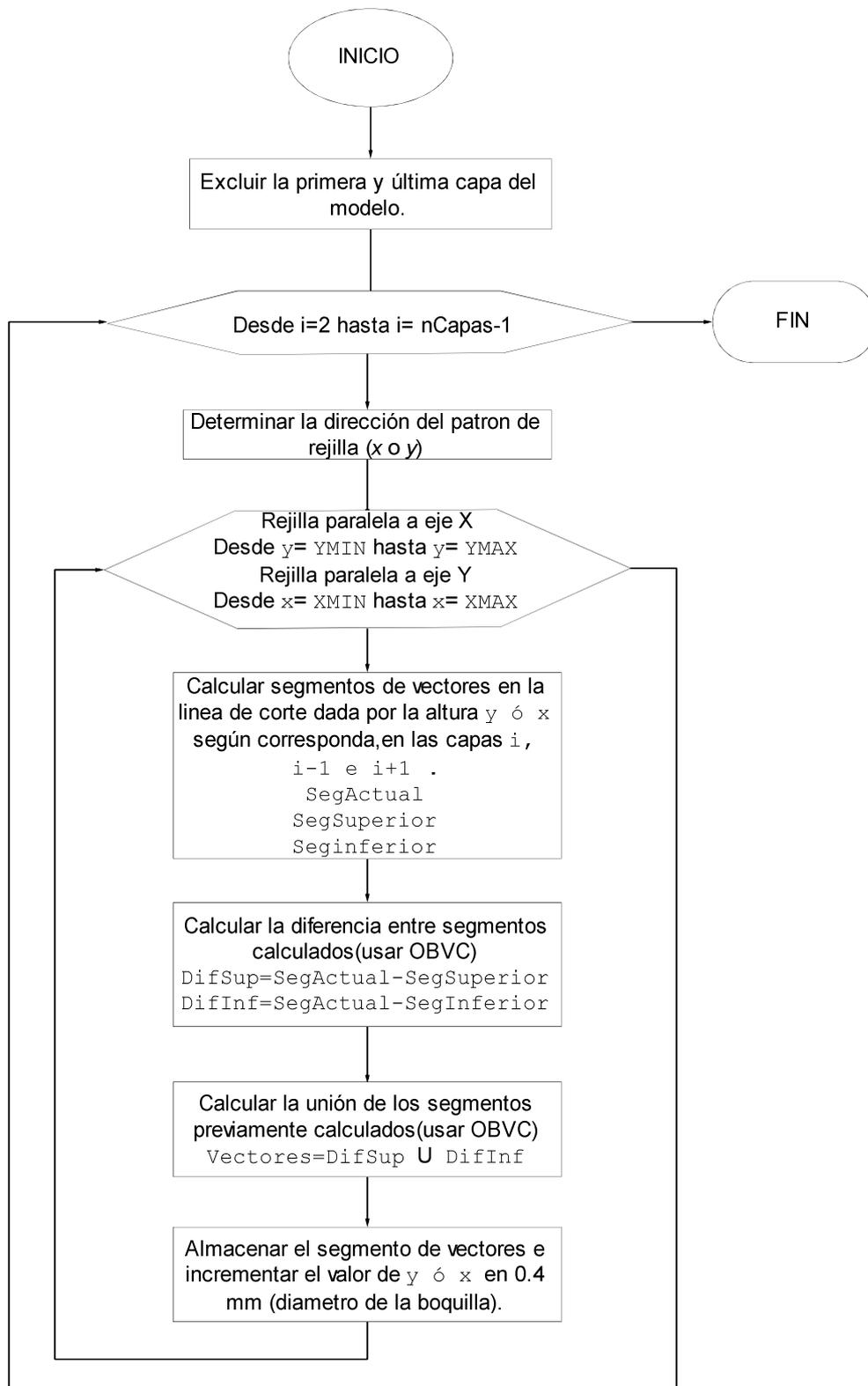


Figura 51 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores para regiones externas planas.

4.3.4 Identificación de regiones de relleno interno

El patrón de rejilla de las regiones internas de relleno del modelo está delimitado por un parámetro conocido como densidad de relleno expresado en porcentaje, el cual básicamente define que tan cerrado o abierto se traza el patrón de rejilla por medio de un valor porcentual, que al final se traduce como una distancia típicamente dada por el diámetro de la boquilla a 10 mm de separación entre los segmentos del patrón de rejilla, pues para una densidad de relleno del 100% la separación del patrón de rejilla corresponde con el diámetro de la boquilla de inyección de material, lo cual forma una pieza completamente sólida internamente, es decir sin huecos.

El proceso de identificación de las regiones de relleno interno es similar al descrito anteriormente y también se realiza por cada segmento de corte del patrón de rejilla en cada una de las capas del modelo, el trazado de la rejilla debe de quedar ligeramente dentro del contorno trazado pues la inyección del material no puede quedar exactamente sobre el contorno, lo que provocaría imperfecciones al fabricar la pieza; para las piezas fabricadas el corrimiento hacia dentro del modelo delimitado fue de 0.3 milímetros.

En el diagrama de flujo de la Figura 52 muestra el proceso de identificación de regiones de relleno interno y se describe a continuación.

- 1) Excluir la primera y última capa del modelo.
- 2) Iniciar el recorrido desde la segunda capa hasta la penúltima capa del modelo.
- 3) Por cada una de las capas, determinar la dirección del patrón de rejilla, de manera que los patrones de rejilla de las capas se entrecrucen 90° entre cada patrón.
- 4) Generar el patrón de rejilla con la dirección determinada, se realizarán cortes desde el valor mínimo en la coordenada Y al valor máximo en la coordenada Y de los puntos descritos por el contorno de la capa que se está procesando (válido para un patrón de rejilla paralelo al eje X).
- 5) Por cada corte del patrón de rejilla, es necesario calcular segmentos a la altura de la línea de corte del patrón de rejilla, en la capa actual, la inmediata superior y la inmediata inferior (véase Figura 53). Los segmentos son calculados con un corrimiento interno de 0.3mm, mediante el proceso descrito en secciones anteriores el cual hace uso del vector normal.
- 6) Se procede a calcular la intersección del segmento de la capa actual con el segmento de la capa superior, así como la intersección del segmento de la capa actual con el segmento de la capa inferior (véase Figura 53).

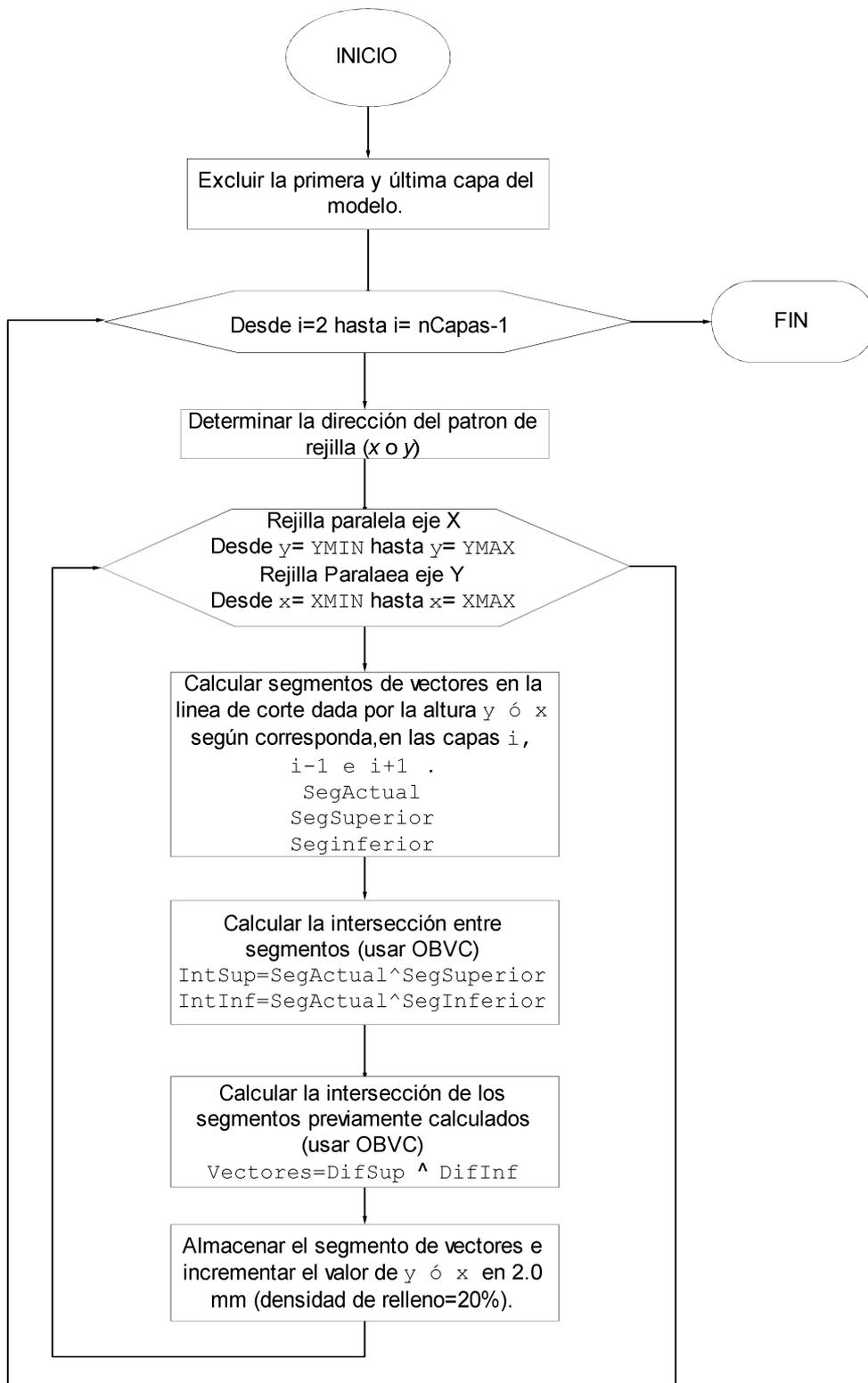


Figura 52 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores de las regiones internas de relleno.

- 7) Las intersecciones calculadas en el paso anterior, describen dos nuevos segmentos los cuales se les aplicara la operación de intersección nuevamente (véase Figura 53).
- 8) Realizar un incremento en la línea de corte del patrón de rejilla con el valor calculado a partir de la ecuación 11.
- 9) Los pasos 5, 6, 7 y 8 se repiten hasta terminan de general el patrón de rejilla en la capa de interés.
- 10) Los procesos descritos del punto 3 al 9 son repetidos en cada una de las capas del modelo salvo la primera y última capas.

$$separación = \frac{diámetro\ boquilla + 100}{densidad\ de\ relleno} \quad (11)$$

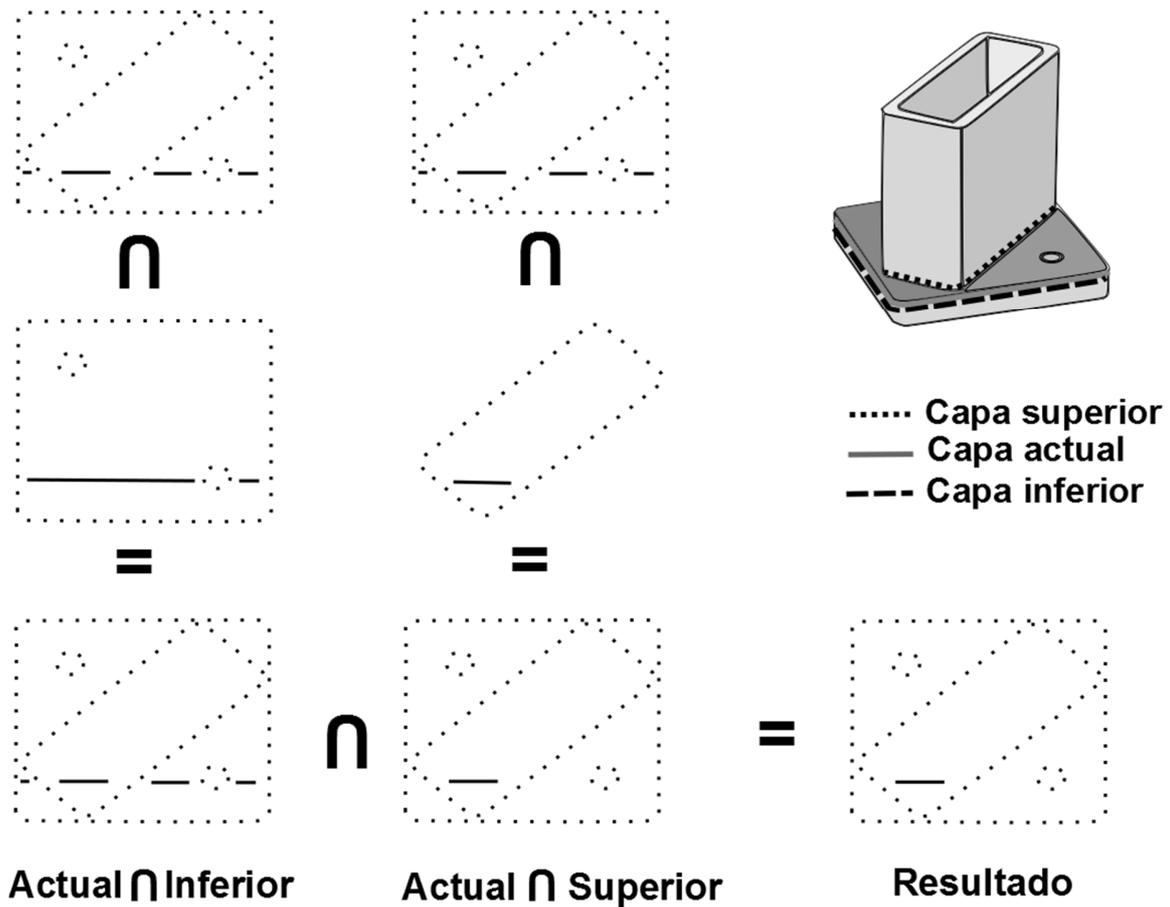


Figura 53 Ejemplo de cálculo de un segmento del patrón de rejilla para regiones de relleno interno.

4.3.5 Identificación de regiones de soporte

El cálculo de los vectores para la región de soporte es opcional y es el usuario quien determina si es necesario realizar su generación de acuerdo a las características geométricas del modelo 3D a construir. En este caso la apertura del patrón de rejilla es determinada experimentalmente, sin embargo dicha separación de patrón se encuentra relacionada con factores del proceso, como son la velocidad de movimiento del cabezal de inyección mientras se deposita material y la temperatura a la cual el material es depositado. Es común que en los sistemas FDM, que la separación del patrón de rejilla tenga de tres a cinco milímetros de separación, lo cual asegura que las capas superiores a la que se está fabricando se superpongan correctamente.

En esencia el cálculo de los vectores de la región de soporte es similar al del cálculo de las regiones de relleno internas o las regiones externas planas, sin embargo existen diferencias marcadas, pues en este caso los patrones de rejilla no se entrecruzan con el fin de que los soportes sean una estructura débil que pueda ser retirada fácilmente, la segunda diferencia importante es que el cálculo de las regiones de soporte se realiza desde la capa superior a la inferior respecto de la plataforma de construcción.

El diagrama de flujo de la Figura 54 muestra el proceso para el cálculo de los vectores de las regiones de soporte y se describe a continuación:

- 1) Excluir la última capa del modelo.
- 2) Iniciar el recorrido desde la última capa del modelo uno hasta la primera capa del modelo.
- 3) Fijar una dirección para el patrón de rejilla para todo el modelo.
- 4) Generar el patrón de rejilla con la dirección determinada, se realizarán cortes desde el valor mínimo en la coordenada Y al valor máximo en la coordenada Y de los puntos descritos por el contorno de la capa que se está procesando (válido para un patrón de rejilla paralelo al eje X).
- 5) Por cada corte del patrón de rejilla, es necesario calcular segmentos a la altura de la línea de corte del patrón de rejilla, en la capa actual y la inmediata superior, además de recuperar el segmento correspondiente de soportes de la capa superior (véase Figura 55). Todos segmentos son calculados con un corrimiento externo de 1.5 mm, mediante el proceso descrito en secciones anteriores el cual hace uso del vector normal.

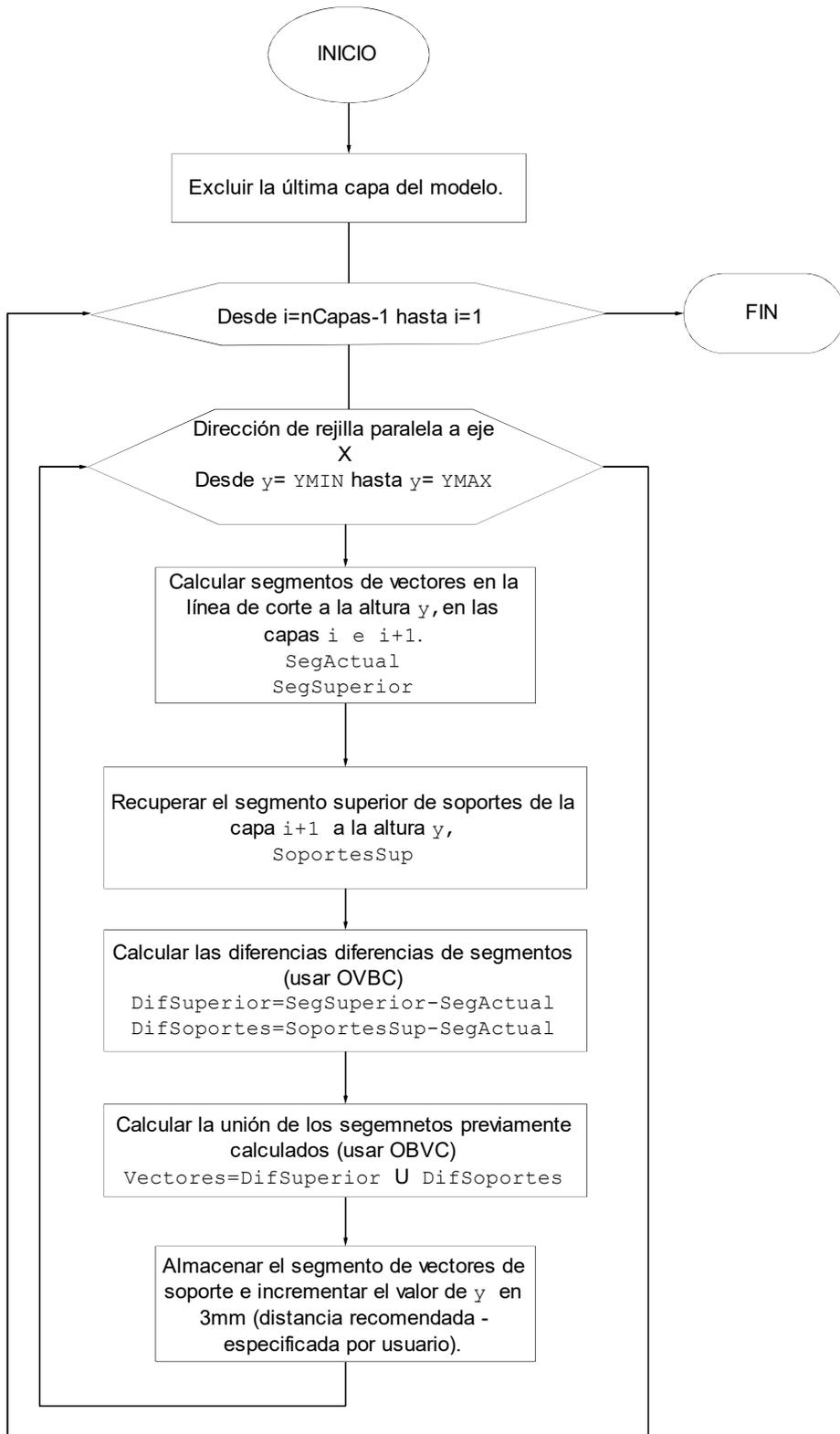


Figura 54 Diagrama de flujo para cálculo de vectores de las regiones de soporte.

- 6) Se procede a calcular la diferencia de los segmentos de la capa inmediata superior menos los segmentos de la capa actual, así como la diferencia del segmento de soportes de la capa superior menos los segmentos de la capa actual (véase Figura 55).
- 7) Las diferencias calculadas en el paso anterior, describen dos nuevos segmentos los cuales se les aplicara la operación de unión, para determinan un segmento de soportes de la capa actual (véase Figura 55).
- 8) Realizar un incremento en la línea de corte del patrón de rejilla de entre tres y cinco milímetros.
- 9) Los pasos 5, 6, 7 y 8 se repiten hasta terminan de general el patrón de rejilla en la capa de interés.
- 10) Los procesos descritos del punto 3 al 9 son repetidos en cada una de las capas del modelo salvo la primera y última capas.

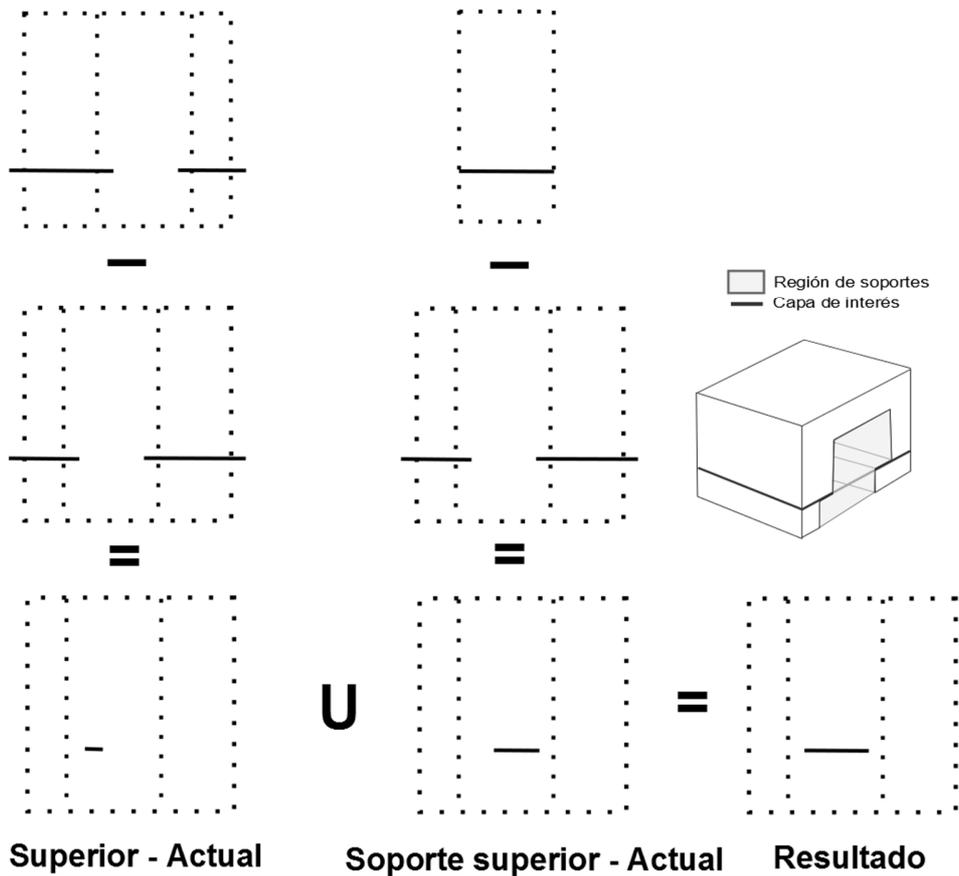


Figura 55 Ejemplo del cálculo de un segmento del patrón de rejilla de las región de soportes.

4.4 Selección de capas para relleno dispar

Posterior a la identificación de regiones de relleno interno, las regiones planas externas y regiones de soporte se realiza la selección de los vectores para inyección dispar, dichos vectores definirán rutas donde se realizará una **inyección de material superior a la de las regiones externas, con el fin de compensar el uso de una altura de capa más grande a la usada en las regiones externas.**

La selección de los vectores de las regiones internas toma como elemento decisorio **la comparación entre la suma de la longitud de los vectores de las regiones de relleno interno de capas contiguas, donde los vectores seleccionados serán los que correspondan al recorrido más corto**, esta forma de selección de los vectores asegura que se pueda realizar un análisis simplificado de cada una de las capas y permite que se puedan procesar volúmenes de geometría compleja; sin embargo la selección de los vectores de relleno interno por el recorrido más corto puede generar secciones huecas dentro de la pieza.

En el caso el algoritmo implementado toma la comparativa cada dos capas entre los patrones de rejilla de secciones internas de cada capa con su inmediata inferior, seleccionando sólo uno de ambos patrones para la inyección dispar de material y eliminando el trazo de vectores restante. Sin embargo, es de notar que la selección de los vectores de las capas internas puede realizarse con más de dos capas contiguas, pero a costa de que se presenten secciones huecas al interior del modelo lo cual puede generar imperfecciones en la superficie de la pieza.

El proceso de selección de vectores por inyección dispar usando dos capas contiguas se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 56, donde se la selección de los vectores se realiza solo en capas impares, comparando la longitud del recorrido de la capa impar y la capa inmediata inferior, de las cuales se calcula la longitud del recorrido de los vectores de cada una de las capas antes descritas, y se selecciona el recorrido más corto, así los vectores con el recorrido más largo serán eliminados, solo dejando en esa capa en particular los vectores que definen los contornos del modelo como se puede apreciar en la Figura 57, donde se aprecian los vectores de las regiones de relleno interno con un patrón de rejilla más amplio al de las regiones externas planas con un patrón de rejilla más cerrado, el cual ocultara los huecos generados en la selección de vectores para la inyección dispar.

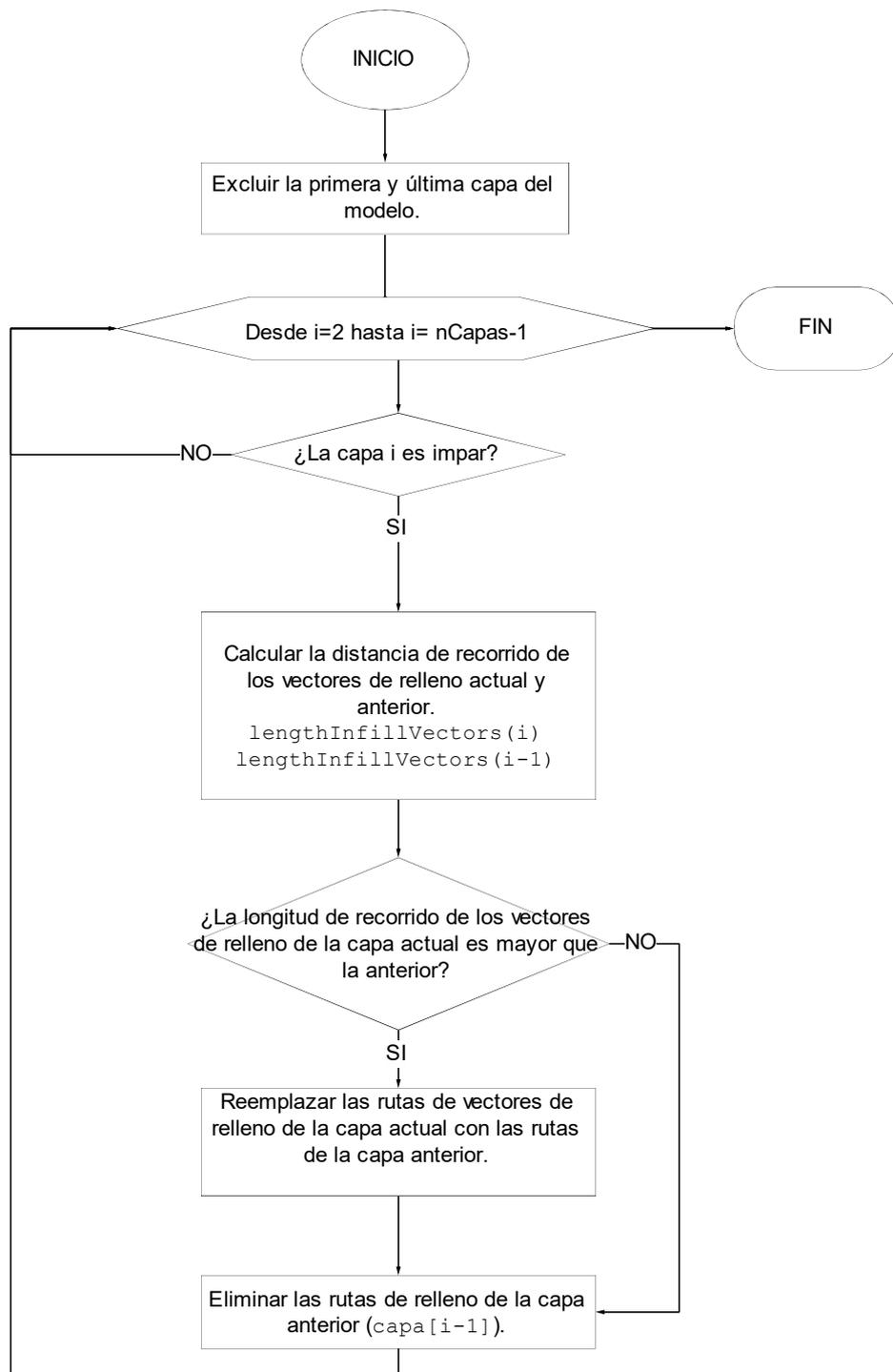


Figura 56 Diagrama de flujo para la selección de capas de relleno dispar

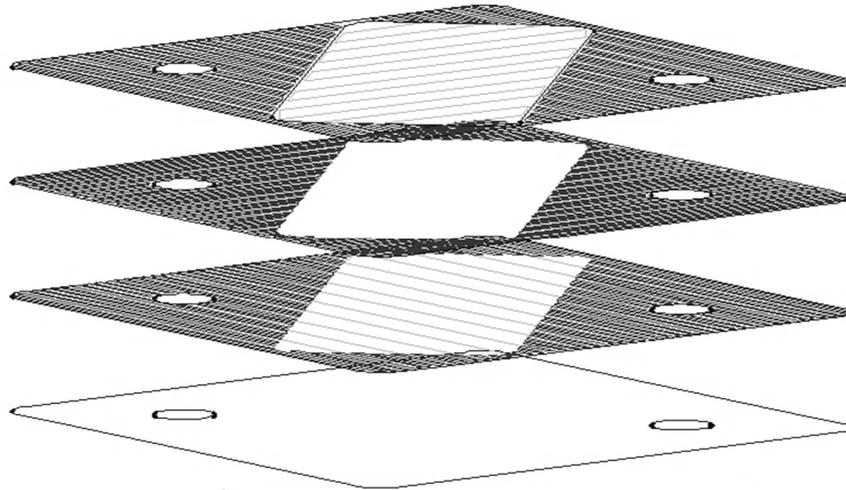


Figura 57 Resultado de la selección de vectores por inyección dispar.

4.5 Cálculo de saltos y vectores adicionales

Una vez se han calculado los vectores para las regiones planas externas, las regiones internas de relleno y las regiones de soporte, es necesario realizar un acomodo de los vectores en patrones de relleno de *zig-zag* y completar las secciones de vectores que no se encuentran consecutivos mediante vectores de salto, los cuales definen el movimiento del cabezal sin inyección de material.

El diagrama de flujo de la Figura 58, muestra el proceso de cálculo de vectores adicionales para el patrón de *zig-zag* y los saltos. El proceso comienza en el último punto del plano X-Y de la capa inmediata anterior, es decir, si se está construyendo la capa 5 es necesario ubicar el último punto del trazado en el plano de la capa 4 y generar un vector de salto entre dicho punto y el punto inicial de los vectores de contorno, los cuales son los primeros en ser procesados. Es común que los vectores de contorno describan circuitos cerrados e independientes, por lo que estos circuitos independientes deben ser enlazados mediante un vector de salto. No es recomendable trazar demasiados vectores de salto y en la medida de lo posible evitar este tipo de vectores, pues tienden a generar imperfecciones en la pieza final.

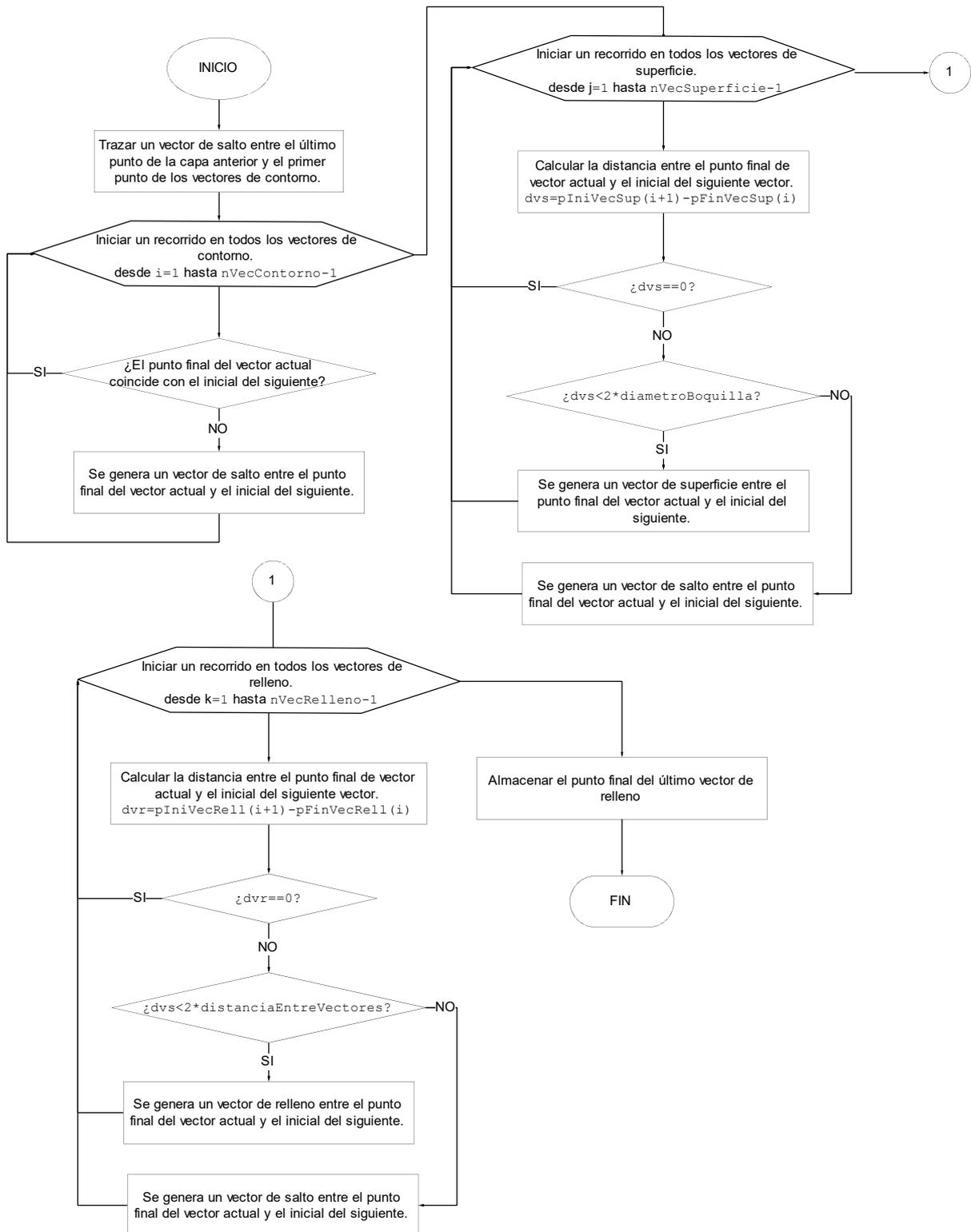


Figura 58 Diagrama de flujo para el cálculo de vectores de salto y vectores adicionales.

Enlazados los vectores de contorno por saltos, se procede al procesamiento de los vectores de las regiones externas planas, las regiones de relleno interno y las regiones de soporte, en el orden antes especificado. En estas regiones el patrón de trazado se completa con un patrón de rejilla en *zig-zag* y se generan saltos en los patrones que no pueden ser enlazados mediante el *zigzag*, como se puede apreciar en la Figura 59.

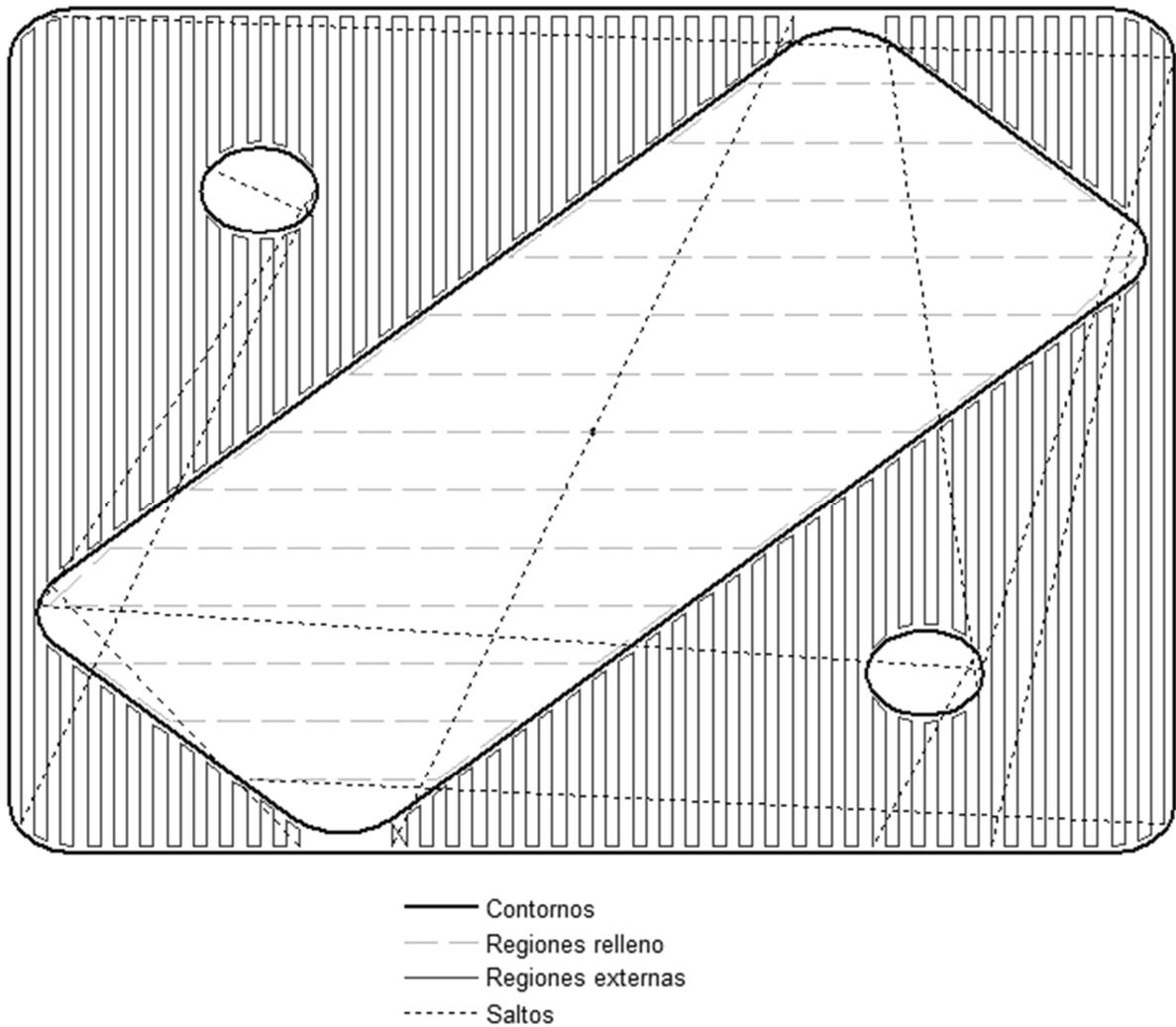


Figura 59 Resultado del trazado de vectores adicionales y saltos en una capa.

4.6 Traducción a códigos máquina

Una vez todos los vectores de las diferentes regiones ha sido enlazados, mediante saltos o el patrón de *zig-zag* se hace necesario realizar la conversión de las coordenadas de los puntos iniciales y finales de cada uno de los vectores en códigos de movimiento controlado, tomando en cuenta las consideraciones establecidas para la fabricación de la distintas regiones involucradas en el proceso FDM, pues es de vital importancia controlar de manera adecuada la cantidad y velocidad de inyección del material, así como la velocidad a la que el cabezal se desplaza dentro del plano.

El desplazamiento del cabezal, la velocidad de movimiento y la cantidad de material a depositar, son especificados por el código máquina conocido como movimiento controlado y etiquetado como “*G1*”. Dicho comando establece el desplazamiento del cabezal mediante coordenadas relativas *X-Y-Z* dadas en milímetros (el origen es establecido usualmente en el centro de la mesa de trabajo), el depósito de material se establece en coordenadas absolutas especificadas por un parámetro *E* dado en milímetros y finalmente la velocidad es expresada en *mm/s* y se especifica mediante el parámetro *F*, como se muestra en la Figura 60.

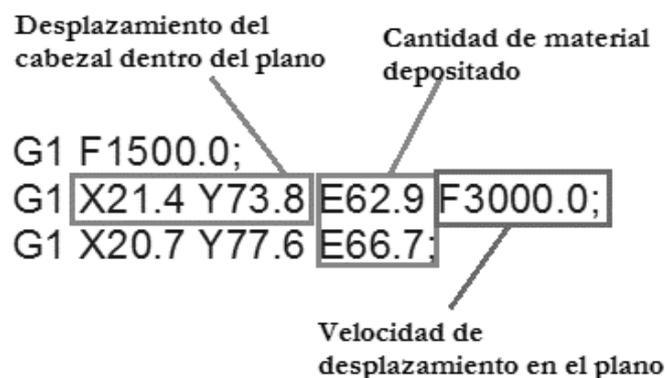


Figura 60 Descripción de movimiento controlado

Un punto importante a notar es que la cantidad de material depositado se expresa como el avance en milímetros del de filamento que alimenta al cabezal, y que dicho avance es calculado mediante la multiplicación de un *factor de depósito* por la longitud del vector (distancia euclidiana entre el punto inicial y final) que se está traduciendo a código G. Dicho

factor de depósito controla la cantidad de material que se inyecta por cada trazo y es diferente para cada uno de los vectores, dependiendo de la región que se esté fabricando.

En la Tabla 1 se presenta de manera resumida los valores de los factores de depósito usados en las pruebas realizadas que se presentan más adelante. Es de notar que el factor de depósito para los vectores de las regiones de relleno interno corresponde con el doble de los vectores de las superficies externas planas.

Tipo de vector	Velocidad	Factor de depósito	Ejemplo
Contorno	1620 mm/min	0.05	G1 X10.1 Y11.35 F1620 E67.34
Superficie	3000 mm/min	0.04	G1 X8.1 Y4.35 F3000 E97.34
Relleno	3600 mm/min	0.08	G1 X-2.1 Y0.35 F3600 E125.34
Salto	5400 mm/min	N/A	G1 F1200 G1 E124.56 G1 X12.34 Y5.4 Z1.6 F5400//Salto G1 F1200 G1 E125.56

Tabla 1 Valores usados en la traducción de los vectores a códigos de movimiento controlado³.

Como se puede observar en la tabla 1, la traducción de un vector de salto es un poco más complicada que el resto de los vectores, pues como se aprecia un salto se compone de un conjunto de instrucciones, donde el primer paso es reducir la velocidad de movimiento del cabezal a 1200 mm/min, después se retrocede 1 mm el carrete a fin de evitar escurrimientos durante el traslado del cabezal, a continuación se realiza el movimiento del cabezal a velocidad plena sin realizar inyección alguna de material, nuevamente se reduce la velocidad de desplazamiento a 1200 mm/min y finalmente se avanza el carrete un milímetro más para recuperar el avance que se tenía antes del salto realizado.

³ Los valores mostrados en la tabla fueron propuestos de manera que correspondieran a las velocidades usadas en la fabricación de piezas por medio del proceso tradicional; sin embargo estos valores no son únicos y es el usuario quien especifica las velocidades manteniéndose dentro de un rango en el que el proceso permita su uso, para una descripción más detallada de las velocidades de impresión consulte *Practical 3D printers* [22].

El proceso de traducción a código máquina genera como resultado un archivo de texto tipo *ASCII* en el cual se ha agregado todos los comandos correspondientes para el trazado y depósito de material de la pieza a fabricar.

4.7 Incorporación de rutinas adicionales.

Una vez se han generado todas las trayectorias es la adición de algunos comandos adicionales en el archivo de texto generado en la sección anterior, dichos comandos adicionales describen parámetros esenciales en el proceso de fabricación⁴ y que son directamente dependientes de la máquina a usar; usualmente las directivas son agregadas al inicio y al final. Entre estos parámetros que deben ser establecidos al inicio del proceso están:

- Fijar las unidades a trabajar.
- Establecer el sistema de referencia.
- Establecer la temperatura de trabajo del núcleo de calentamiento del cabezal.
- Establecer las coordenadas iniciales.
- Declarar el punto inicial de trabajo.
- Realizar una rutina de purga de la boquilla.
- Esperar que la boquilla llegue a la temperatura adecuada.
- Seleccionar el cabezal con el cual se está trabajando.

La Figura 61 muestra las directivas iniciales que debe de agregarse antes de las trayectorias generadas en la etapa anterior, cabe destacar que dichos parámetros mostrados en la figura son sólo aplicables a la impresora Zcube, en la que se realizaron la pruebas, de las cuales se discutirán en el siguiente capítulo.

De igual forma una vez se han procesado todas las trayectorias para la fabricación de la pieza se hace necesario contar con algunas rutinas de finalización, donde se realizarán operaciones como son:

⁴ Una descripción detallada de los parámetros a configurar se puede encontrar en el capítulo 3 de *Practical 3D printers* [22].

```

M73 P0 (enable build progress)
G21 (set units to mm)
G90 (set positioning to absolute)
M104 S230 T1 (set extruder temperature) (temp updated by printOMATIC)
(**** begin homing ****)
G162 X Y F2500 (home XY axes maximum)
G161 Z F1100 (home Z axis minimum)
G92 Z-5 (set Z to -5)
G1 Z0.0 (move Z to 0)
G161 Z F100 (home Z axis minimum)
M132 X Y Z A B (Recall stored home offsets for XYZAB axis)
(end homing )
G1 X0 Y-74 Z50 F3300.0 (move to waiting position)
G130 X20 Y20 A20 B20 (Lower stepper Vrefs while heating)
M6 T1 (wait for toolhead, and HBP to reach temperature)
G130 X127 Y127 A127 B127 (Set Stepper motor Vref to defaults)
M108 T1
G0 X0 Y-74 (Position Nozzle)
G0 Z0.6 (Position Height)
G92 E0 (Set E to 0)
G1 E4 F300 (Extrude 4mm of filament)
G92 E0 (Set E to 0 again)
M105

```

Figura 61 Directivas iniciales para impresora 3D Zcube⁵

- Bajar la mesa de fabricación.
- Apagar del calentamiento del cabezal.
- Enviar el cabezal a la posición de origen.
- Activación de un mensaje sonoro al usuario para avisar que la fabricación de la pieza ha culminado.

De esta manera es como en la Figura 62 se presentan las directivas de finalización de la fabricación de un modelo.

```

M104 S0 T0 ( Cool down the Right Extruder )
M104 S0 T1 ( Cool down the Left Extruder )
M73 P100 ( End build progress )
G0 Z180 ( Send Z axis to bottom of machine )
M18 ( Disable steppers )
G162 X Y F2500 ( Home XY endstops )
M18 ( Disable stepper motors )
M70 P5 ( We <3 Making Things!)
M72 P1 ( Play Ta-Da song )
M73 P100 (end build progress )
M137 (build end notification)

```

Figura 62 Código G adicional al final del archivo para impresora 3D Zcube⁵.

⁵ La descripción completa de las directivas puede ser encontrada en <http://replicat.org/>.

Capítulo 5 Pruebas y Resultados

En este capítulo se describen las pruebas realizadas al algoritmo de segmentación así como los resultados de piezas obtenidas mediante el mismo. El capítulo inicia con gráficos donde se presentan las simulaciones de los vectores generados para la inyección del material capa a capa, discutiendo especialmente la capacidad del algoritmo para poder generar rutas independientemente de la complejidad geométrica del modelo 3D que se tenga a la entrada.

A continuación, se describen una serie de experimentos con el objetivo de esclarecer cuales son los factores geométricos que influyen en el incremento de fabricación de las piezas y modelos, para después realizar un estudio comparativo entre los tiempos de fabricación originales dados por el proceso tradicional y los obtenidos mediante la inyección dispar, con el fin de cuantificar la reducción de tiempos de fabricación.

Así mismo en este capítulo, se detallan los resultados de experimentos comparativos de las piezas fabricadas mediante ambos algoritmos, comparando peso, densidad, rugosidad externa y resistencia mecánica.

Finalmente, el capítulo cierra con las observaciones obtenidas de una encuesta, donde se evalúan las características apreciativas visuales que se tienen de ambos grupos de piezas fabricadas mediante la metodología aquí propuesta y el sistema de segmentación del fabricante.

5.1 Resultados de la segmentación.

En esta sección se presentan los resultados observados en cada una de las sub-etapas del proceso de segmentación de un modelo CAD 3D, el algoritmo desarrollado fue implementado en el lenguaje de programación Java mediante el IDE de Eclipse en su versión LUNA, la documentación del mismo se adjunta en el CD del documento y el diagrama de clases se puede consultar en los anexos del presente documento.

Los resultados del proceso de segmentación se basan en tres etapas claves, las cuales son la segmentación en capas del modelo, la identificación de regiones internas y externas del modelo, el cálculo de saltos y vectores adicionales.

5.2.1 Resultados de la segmentación por capas del modelo

La segmentación del modelo en capas es fundamental, pues los vectores calculados en esta etapa están directamente relacionados con la apariencia final de la pieza fabricada; adicional a esto es de vital importancia cuidar que los contornos generados sean cerrados, pues si existiese un contorno abierto el algoritmo DAI puede presentar problemas en el cálculo de áreas internas como se observa en la Figura 63, donde se aprecia un vector fuera de los contornos de la capa en cuestión.

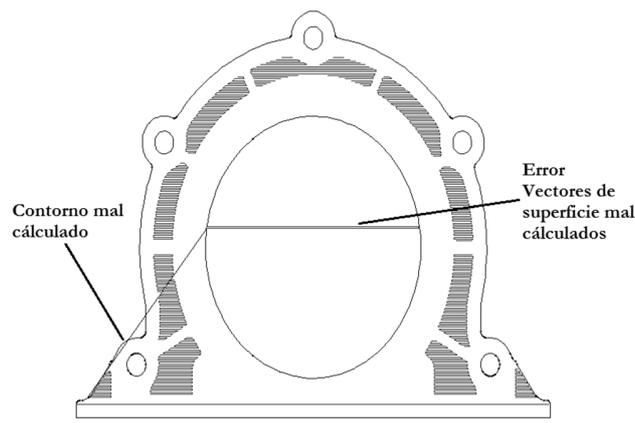


Figura 63 Error en cálculo de áreas internas (corte transversal).

De esta manera el correcto cálculo de cada uno de los contornos de las capas es un paso crucial en el proceso de segmentación, pues de este depende que las etapas posteriores de desarrollen correctamente, especialmente para modelos complejos con geometrías complicadas, donde se presentan una gran cantidad de planos triangulares, realizándose pruebas en el desarrollo aquí presentado con geometrías descritas por hasta 50000 planos triangulares, sin presentar problemas y en un tiempo de procesamiento menor a los 10 segundos⁶.

⁶ Las pruebas fueron realizadas en una PC con 4 Gb de memoria RAM y un procesador AMD A6 a 2.10GHz.

Las pruebas finales del proceso de segmentación se desarrollaron con una altura de capa de 0.2 mm, sin embargo el algoritmo puede realizar segmentación de modelos a diferentes alturas de capa sin mayor problema, pues el algoritmo fue probado correctamente para realizar segmentación en resoluciones de 0.1 a 2 milímetros de altura de capa. La limitante en la menor altura de capa a procesar en este caso está dada por las capacidades de posicionamiento de la *impresora 3D Zcube Dual*, la cual tiene una capacidad de posicionamiento en el eje Z de 0.011 milímetros.

Los resultados de la segmentación en un conjunto de modelos con geometrías complejas, se muestran en la Figura 64, donde se aprecian resultados positivos en este paso del proceso de segmentación.

5.2.2 *Resultados en la identificación de regiones de relleno y superficie.*

Las regiones de superficie⁷ describen áreas del modelo cuya función es cerrar las superficies planas y externas al modelo que no fueron completadas por los contornos de cada capa, donde la separación de los trazos de esta región está dado por el diámetro de la boquilla; así mismo es en estas regiones donde se hace presente el efecto del flexionamiento, que es un efecto de escurrimiento del material depositado hacia dentro de la pieza fabricada y provocado por el peso del material, pero que puede ser corregido por la sucesión de capas cruzadas.

En el desarrollo particular de los trazos descritos en este documento para la separación de los trazos en el patrón de rejilla de los vectores de superficie fue de 0.4 mm, equivalente al diámetro de la boquilla del cabezal de inyección de plástico de la impresora 3D en la que se realizaron pruebas. En cuanto a la profundidad con la que se calculan las capas de vectores de superficie para evitar los efectos superficiales del flexionamiento, el algoritmo desarrollado realiza el cálculo con una profundidad de tres capas.

⁷ Descritas al final del capítulo 3

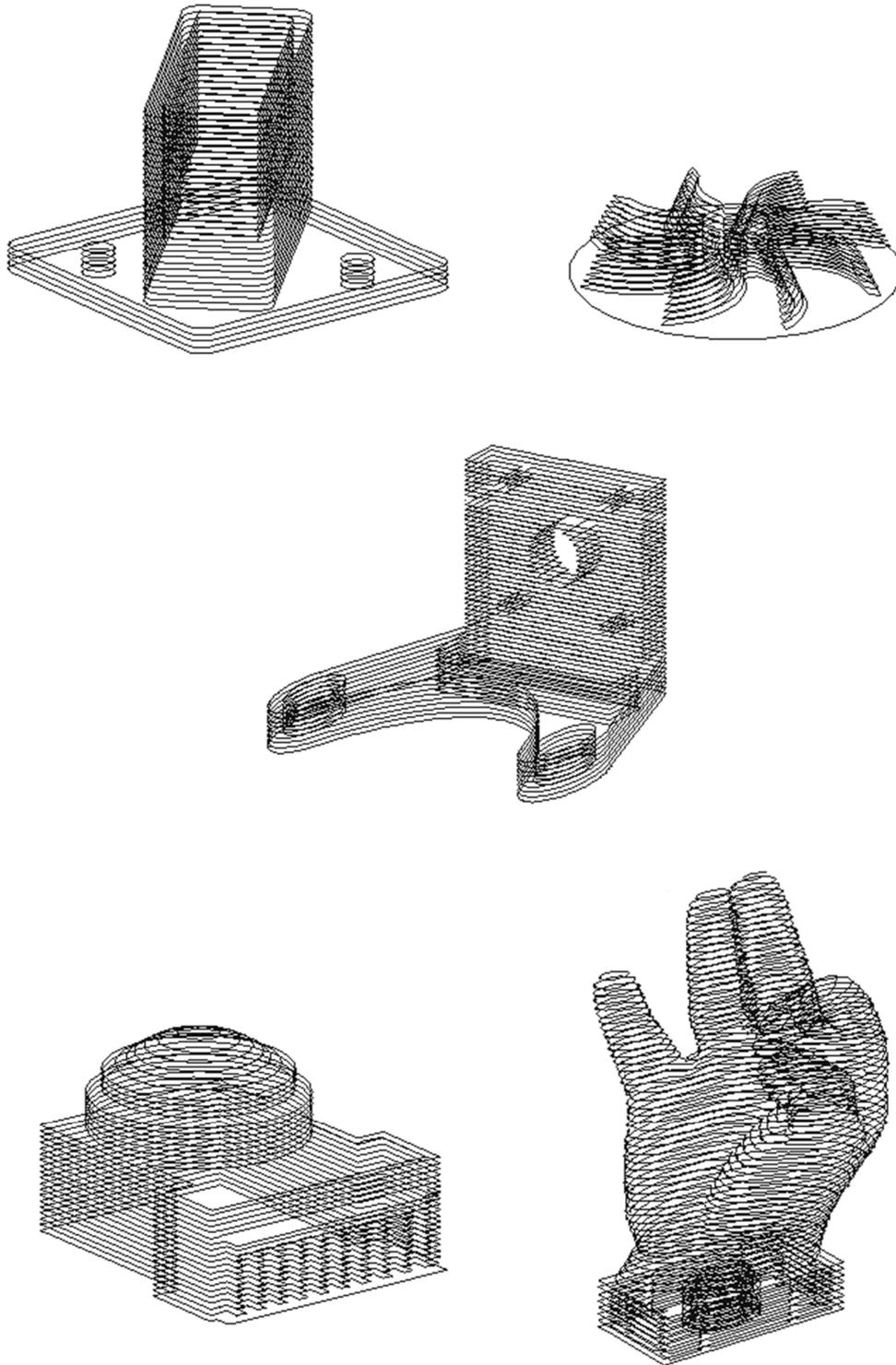


Figura 64 Modelos prueba complejos segmentados en capas de 1mm.

Por otro lado las regiones de relleno, describen las regiones del modelo donde se puede realizar una inyección de material más rápida y burda, y es donde se puede aventajar en cuanto a tiempos de fabricación, ya sea haciendo que el patrón de rejilla sea más amplio o realizando una inyección de material dispar, la cual consiste en la inyección de material cada dos capas pero con un flujo más abundante en comparación del proceso tradicional, donde la inyección se realiza capa a capa en un flujo de inyección de material similar al realizado en las regiones externas.

La Figura 65 muestra los trazos calculados por el algoritmo de segmentación desarrollado en el presente trabajo, donde se observa que para regiones de superficie el cálculo de los vectores para esta región se hace con un patrón de relleno cerrado y en capas continuas. Por otro lado para las regiones de relleno, se realiza cada dos capas a fin de realizar el relleno al doble de velocidad que las regiones externas de la pieza en cuestión, también en la misma imagen es posible apreciar que el cálculo de los vectores de relleno se hace en patrones cruzados con la intención de aumentar la resistencia mecánica de la pieza a fabricar.

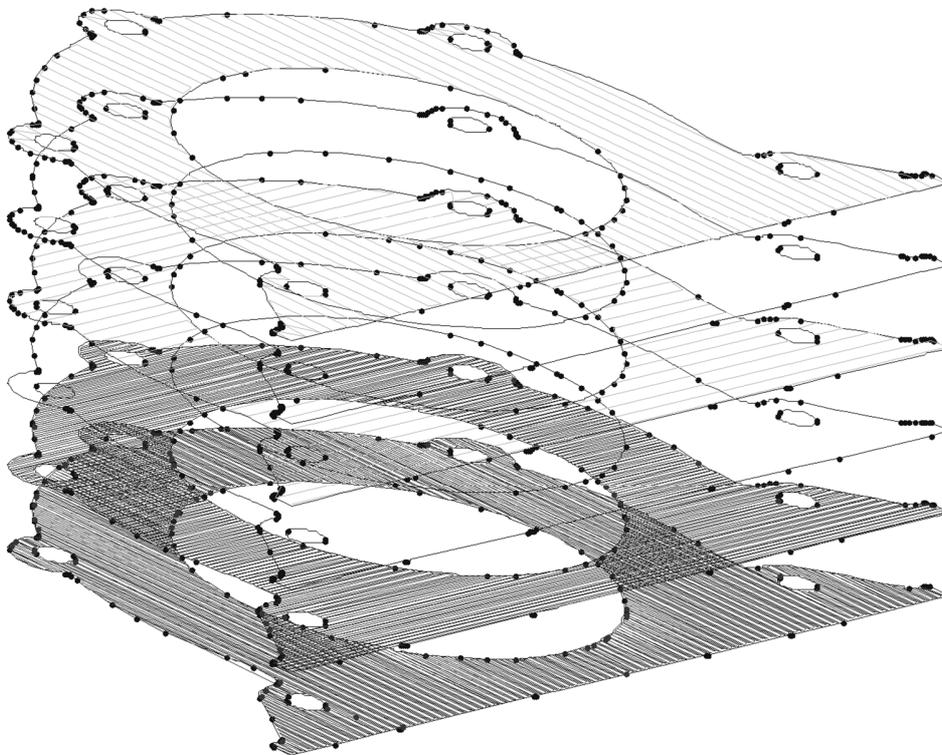


Figura 65 Trazos de vectores en fabricación por inyección dispar de material.

A modo de verificación se pueden observar en la Figura 66, los trazos obtenidos por el método de segmentación aquí propuesto, donde se presentan imágenes de capas en las que se tienen presentes regiones de superficie y de relleno en la misma capa, verificando que el proceso no genere trazos encimados entre distintas regiones.

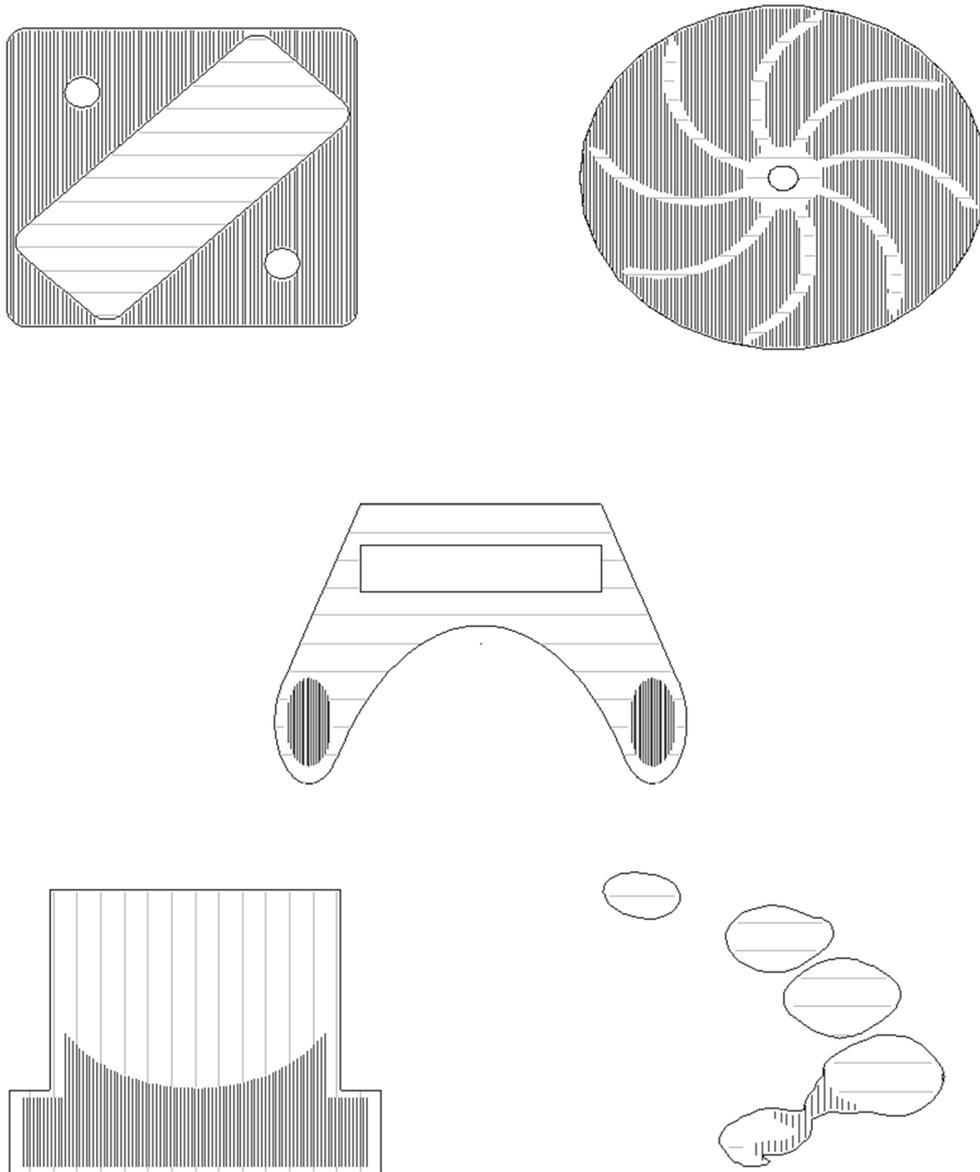


Figura 66 Regiones de relleno y superficie en diversas capas de los modelos prueba complejos (corte transversal).

5.2.3 Vectores de adicionales y de salto

Una vez se identificaron las regiones de relleno y de superficie en cada una de las capas del modelo, se procede a realizar el cálculo de los vectores adicionales y saltos, siendo este el último paso antes de la traducción de los vectores a códigos máquina. Los resultados de este paso en el proceso de segmentación se pueden apreciar en la Figura 67, en donde se observa que el patrón de rejilla tanto para los vectores de relleno como para los vectores de superficie se ha completado en un patrón de movimientos de *zig-zag*, pues la inyección de plástico debe ser mantenida de la forma más continua posible.

Es importante mencionar que los saltos deben de llevar un orden, donde primero se trazan los vectores de contorno y los saltos entre estos, para después trazar los vectores de superficie y los saltos entre estos vectores, finalmente los vectores de relleno y sus saltos correspondientes. Cabe mencionar que el proceso de cálculo de saltos no fue optimizado en el desarrollo aquí presentado, pues no se realizó un proceso de búsqueda para que los saltos se realicen de manera eficiente, realizando el menor recorrido en el total de los saltos, y solo se implementan los saltos al siguiente vector disponible de acuerdo al orden antes mencionado, dejando que el proceso sea un tanto aleatorio razón por la cual se aprecia en la Figura 67 donde los saltos están desordenados.

5.2 Estudio de tiempos de fabricación.

Existen diversos factores que pueden alargar o acortar los tiempos de fabricación, los cuales pueden ser divididos en dos grupos: factores relativos al proceso y factores geométricos. Entre los factores relativos al proceso podemos encontrar factores como son la altura de capa, densidad de relleno y velocidad de inyección del material, de los cuales tenemos algunos estudios como los presentados por *Cany Mendonsa et. al.* [34] y *Fahraz Ali et. al.* [35], donde se concluye que la densidad de relleno representa un factor importante en el tiempo de fabricación, y que es en este factor donde la inyección dispar tiene impacto de manera directa. Por el otro lado, entre los factores geométricos se pueden encontrar la orientación estudiada por *S. Saqib et al* [36], la altura y el ancho del modelo.

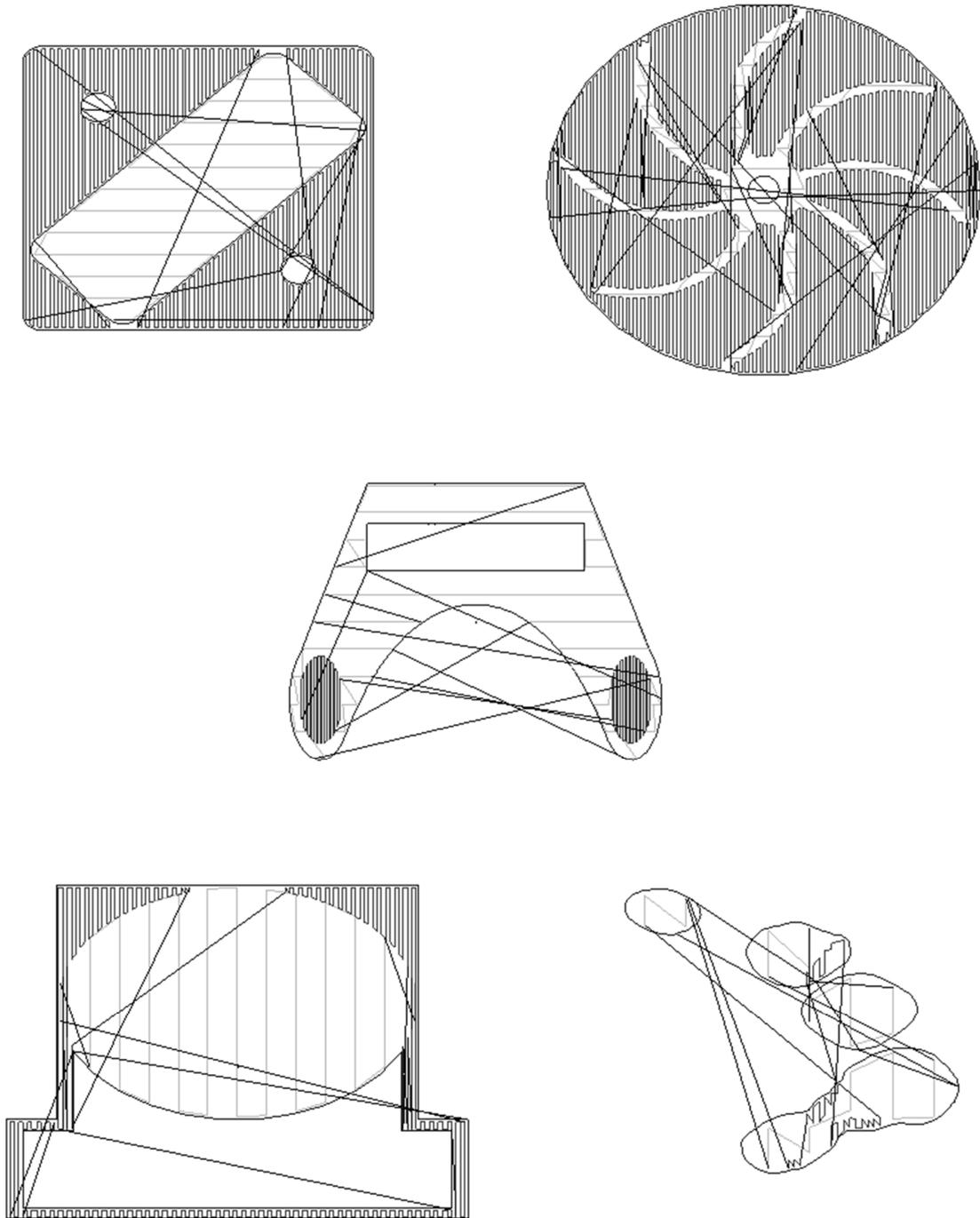


Figura 67 Resultados en el cálculo de vectores de adicionales y de salto en los modelos prueba complejos (corte transversal).

5.2.1 Estudio de tiempo de fabricación en modelos sencillos

Para el estudio presente, solo se realizaron pruebas referentes a la altura y anchura de los modelos, con la motivación de determinar en qué proporción estos dos factores afectan los tiempos de fabricación.

El experimento planteado se basa en la fabricación de nueve piezas con un volumen de fabricación idéntico pero diferentes características geométricas (véase Figura 68), donde todos los modelos tienen un volumen de 27000 mm^3 y como base de tiene un cubo de $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$, el cual en principio ha sido deformado a un tercio, la mitad, el doble y el triple de la altura original, con el correspondiente cambio en el ancho del modelo (A, B, C, D y E). Las dos modificaciones siguientes constan de dos modelos que mantienen la altura inicial del cubo, pero agregando un hueco interno en el modelo y por consiguiente las dimensiones del ancho (G y F). Finalmente las dos últimas modificaciones se realizan a la altura del modelo y donde se tiene una abertura al centro de los modelos manteniendo las dimensiones de ancho y profundidad de dichos modelos (H e I).

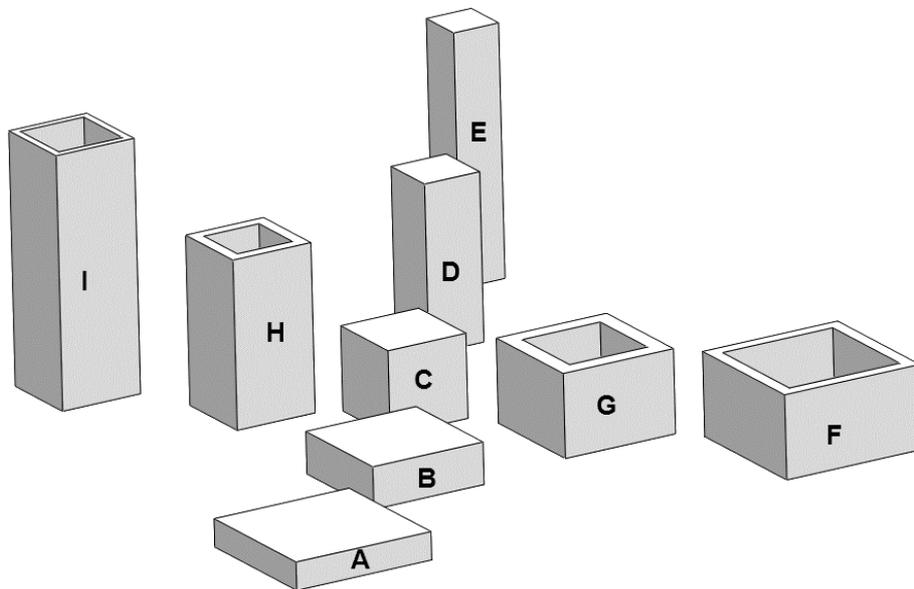


Figura 68 Modelos de estudio altura extensión.

El tiempo de fabricación del proceso tradicional y de la inyección dispar, de cada uno de los nueve modelos prueba fueron registrados en la Tabla 2, en dicha tabla es posible enumerar algunas observaciones interesantes, como es el hecho de que a pesar de que todos los modelos tienen el mismo volumen en todos los casos se tiene un consumo de material y tiempo de fabricación distinto para cada pieza.

También es posible observar que en los modelos completamente solidos (A, B, C, D y E) sin huecos internos se obtuvo una reducción en el tiempo de fabricación cercano o inclusive superior al 50% , remarcando que el modelo A presenta una reducción de tiempo menor a los modelos B, C, D y E, principalmente porque este modelo es de una altura reducida y el tiempo necesario en la fabricación de la base adherente a la plataforma de fabricación consume tiempo que no permite alcanzar tiempos de fabricación similares a los casos B, C, D y E, en donde se obtiene una reducción del tiempo de fabricación superior al 50%. La reducción del tiempo de fabricación se debe principalmente a que estos modelos se componen en gran parte de un relleno interno, que es donde el algoritmo de inyección dispar logra ventajas notables a diferencia de los modelos F, G, H e I donde se puede apreciar que entre más delgada es la sección de relleno la reducción en el tiempo de fabricación es menor.

Características modelos			Proceso tradicional		Inyección dispar		Porcentaje relativo de reducción tiempo de fabricación
Modelo	Área media (mm ²)	Altura (mm)	Tiempo fabricación (min)	material consumido (m)	Tiempo fabricación (min)	material consumido (m)	
A	2700	10	46	4.555	25	4.642	46%
B	1800	15	48	4.297	23	4.198	52%
C	900	30	49	4.151	23	3.992	53%
D	450	60	54	4.408	26	4.067	52%
E	300	90	61	4.595	29	4.146	52%
F	900	30	96	8.475	52	6.640	46%
G	900	30	78	6.136	40	5.207	49%
H	450	60	96	7.239	55	6.668	43%
I	300	90	129	9.820	80	8.350	38%

Tabla 2 Tiempos registrados en estudio extensión altura

Otra observación notable en los modelos A, B, C, D y E, es que el tiempo de fabricación tiene un comportamiento cuadrático respecto de la altura de la pieza, es decir que entre más

alta es la pieza mayor será el tiempo de fabricación, aunque la reducción en la altura del modelo no necesariamente reduce el tiempo de fabricación pues si la altura es muy pequeña y se tiene una área extensa el tiempo de fabricación se extenderá pues la base adherente que se fabrica junto con el modelo también consume parte del tiempo de fabricación, como se aprecia en la Figura 69.

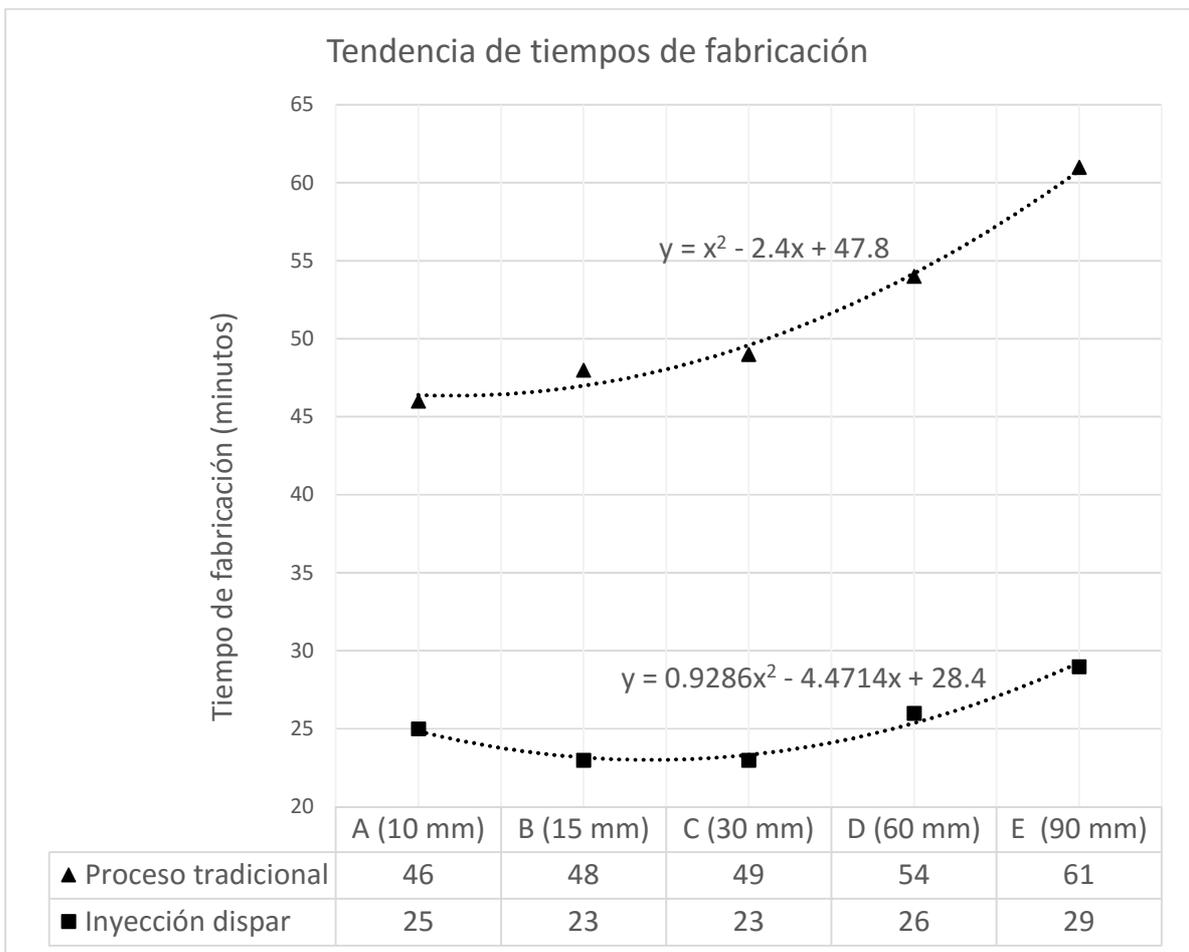


Figura 69 Tendencia tiempos de fabricación modelos solidos

5.2.2 Estudio del tiempo de fabricación en modelos complejos

El estudio del tiempo de fabricación en modelos complejos, tiene el objetivo de cuantificar la reducción de tiempos de fabricación en geometrías complejas y la capacidad del algoritmo para la correcta identificación de las regiones involucradas en el proceso FDM, así como verificar si se pueden aplicar conclusiones parciales basadas en las observaciones realizadas en los modelos sencillos.

Para dicho estudio se propusieron seis modelos, los cuales se pueden apreciar en la Figura 70, y que serán fabricados en una impresora 3D adquirida en el mercado local de modelo *Zcube dual* (veáse Figura 71), que tiene como base las impresoras Replicator de segunda generación de la empresa *Makerbot Industries*; las especificaciones de la impresora 3D se pueden consultar en los anexos del presente documento.

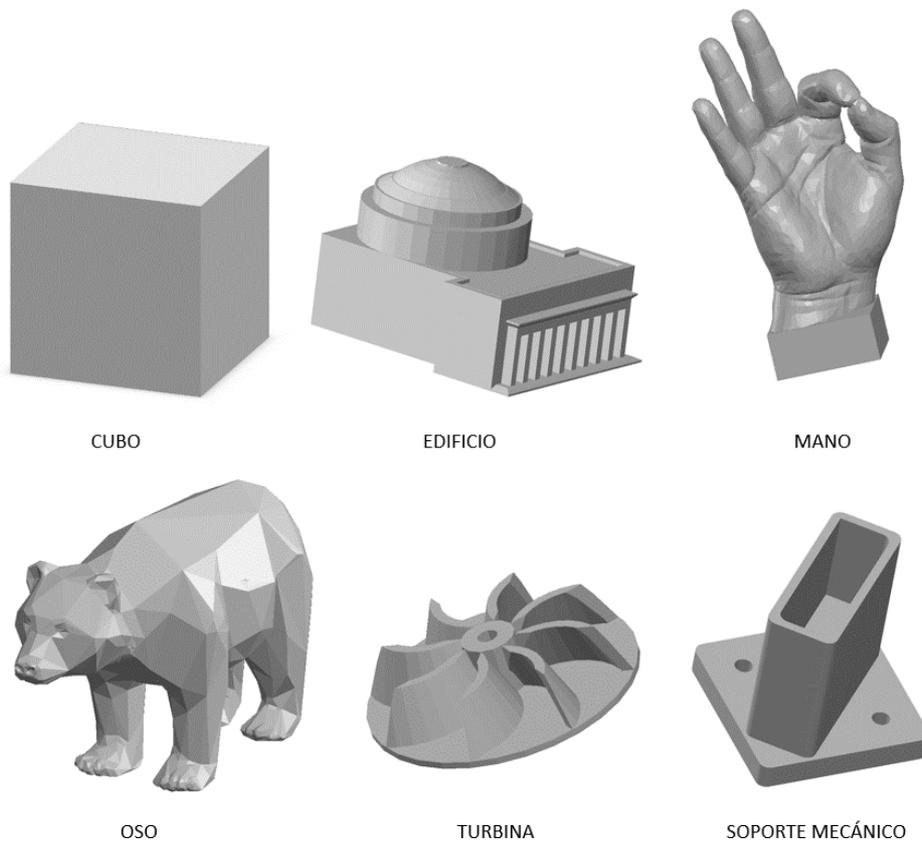


Figura 70 Modelos prueba.

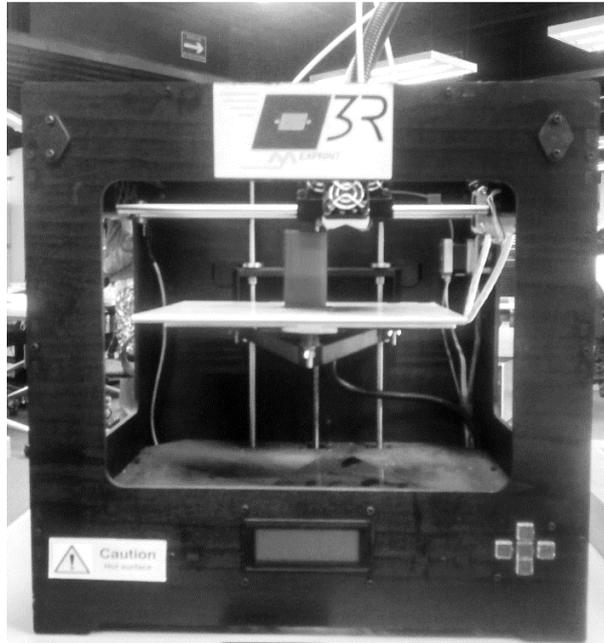


Figura 71 Impresora 3D Zcube.

Para dicho estudio se fabricaron dos grupos de piezas, el primero de estos fueron fabricadas usando el software *ReplicatorG*, el cual hace uso del segmentador *skeinforge 50*, desarrollado en el lenguaje de programación *Python*, y que trabaja mediante el proceso tradicional de fabricación a una altura de capa. El segundo grupo se fabricó haciendo del algoritmo de inyección dispar presente en este documento. Ambos grupos de piezas fueron fabricados con PLA(acido polilactico) y los parámetros base fueron los mismos manteniendo una altura de capa externa de 0.2 mm, una densidad de relleno de 20% , tres capas de profundidad para las capas de superficie y una temperatura de trabajo de 220 °C.

Ambos grupos de piezas fabricadas se pueden observar en las imágenes de la Figura 72 a la Figura 77, donde se muestran las piezas fabricadas mediante *ReplicatorG* a la izquierda y las fabricadas mediante inyección dispar a la derecha. En términos de la apariencia externa los resultados de las piezas fabricadas mediante la inyección dispar son similares a las fabricadas mediante *ReplicatorG*, sin embargo mas adelante se presentan algunas evaluaciones objetivas y subjetivas respecto de las diferencias y similitudes entre ambos grupos.

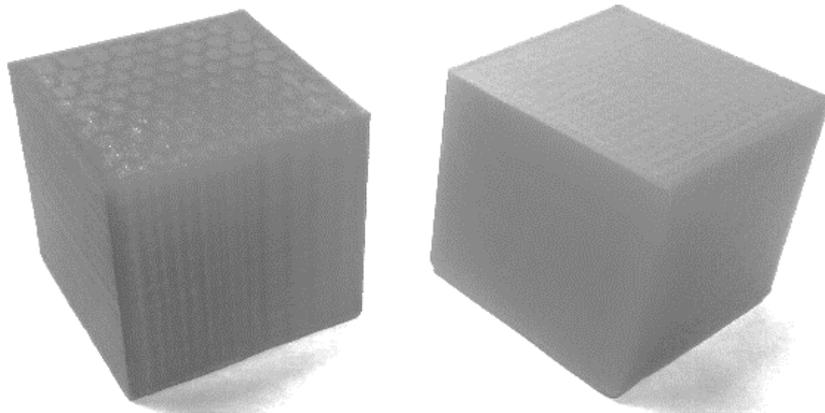


Figura 72 Cubo. *ReplicatorG* (izquierda) inyección dispar (derecha).

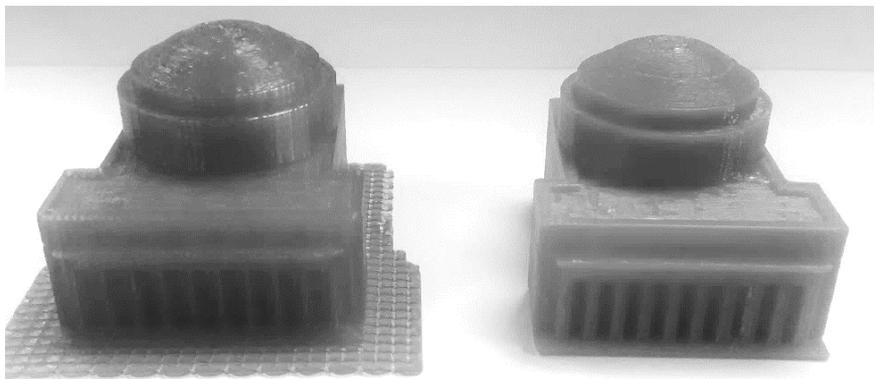


Figura 73 Edificio MIT. *ReplicatorG* (izquierda) inyección dispar (derecha).



Figura 74 Mano. *ReplicatorG* (izquierda) inyección dispar (derecha).

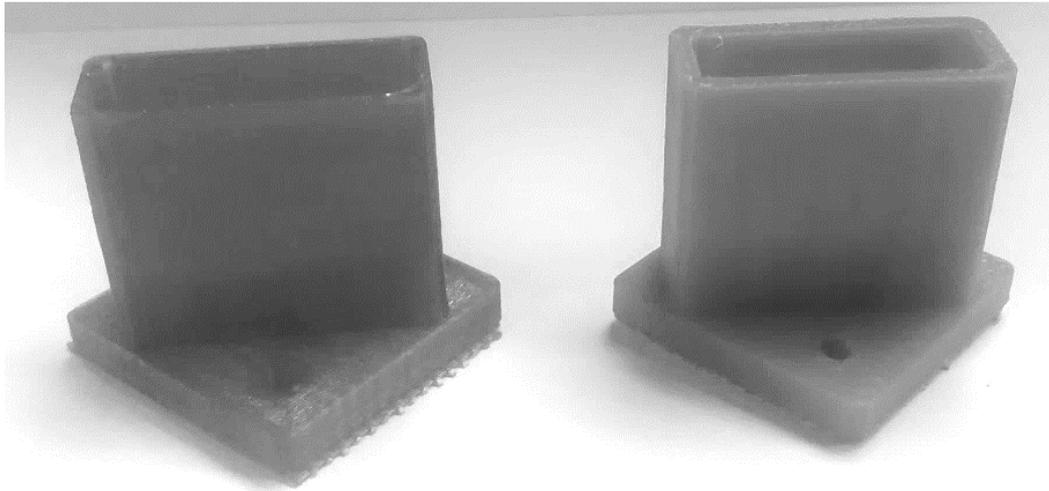


Figura 75 Soporte mecánico. *ReplicatorG* (izquierda) inyección dispar (derecha).

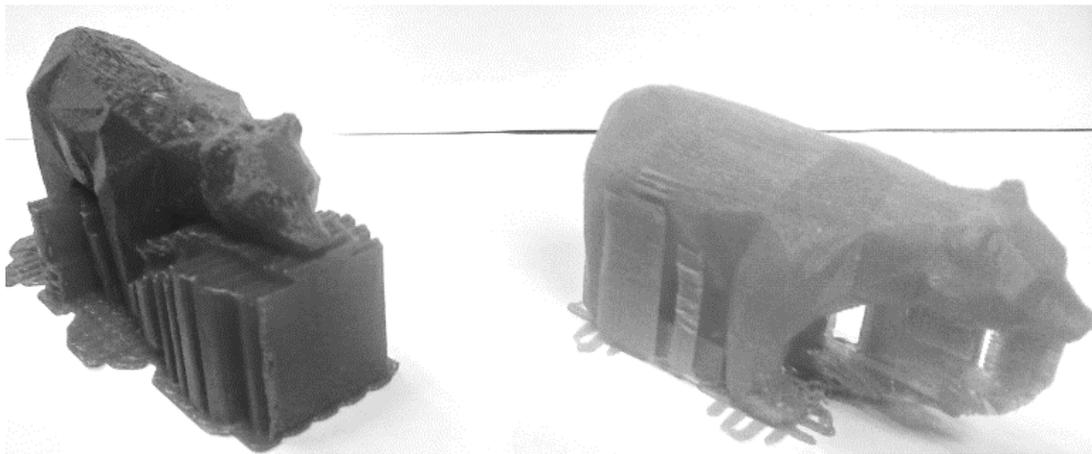


Figura 76 Oso. *ReplicatorG* (izquierda) inyección dispar (derecha).

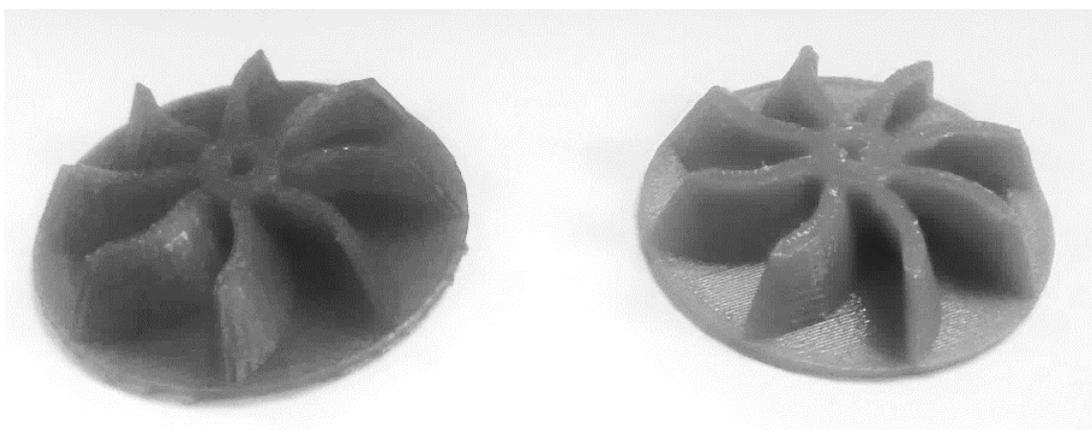


Figura 77 Turbina. *ReplicatorG* (izquierda) inyección dispar (derecha).

Los resultados de los tiempos de fabricación se pueden observar en la Tabla 3, la Figura 78 y Figura 79; donde se presentan los tiempos registrados para la fabricación de ambos grupos de modelos, organizándolos respecto de los porcentajes relativos de reducción en el tiempo de fabricación, donde el 100% expresa el tiempo requerido para la fabricación del modelo mediante el proceso tradicional.

Pieza fabricada	Proceso tradicional (min)	Longitud material (m)	Inyección dispar (min)	Longitud material (m)	Diferencia tiempo	Porcentaje de mejora
Oso	83	5.8057	64	4.5363	19	23%
Turbina agua	42	3.029	28	2.832	14	33%
Mano	51	3.107	31	3.159	20	39%
Soporte mecánico	59	3.925	34	3.861	25	42%
Edificio MIT	79	6.812	45	7.029	34	43%
Cubo	92	7.741	45	8.459	47	51%

Tabla 3 Tiempos de fabricación registrados

En los gráficos de las figuras 77 y 78 se pueden ver que las piezas con regiones de relleno interno más amplias como son el cubo y el edificio del MIT, es donde se obtienen mayores reducciones de tiempo de fabricación a diferencia de modelos con regiones de relleno más delgadas como son la turbina y la mano.

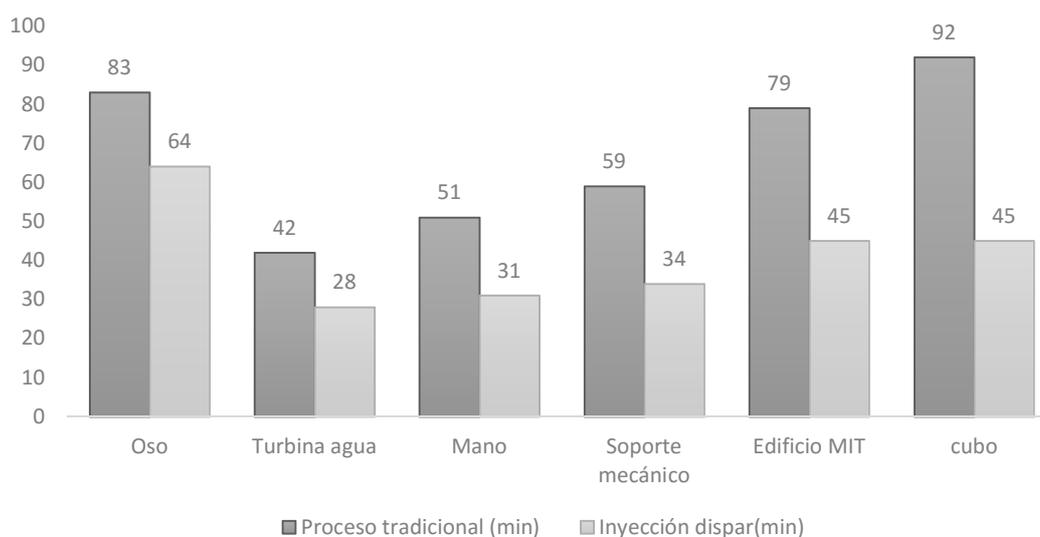


Figura 78 Grafico de tiempos de fabricación registrados

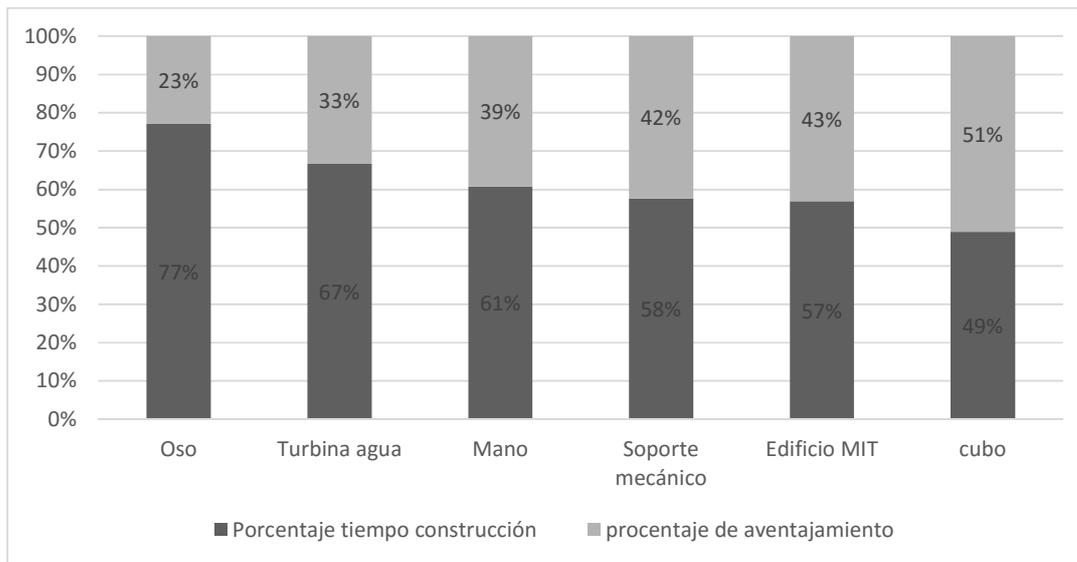


Figura 79 Reducción porcentual de los tiempos de fabricación de los modelos usando inyección dispar.

Otro resultado interesante es apreciable para el caso del oso, pues este modelo requiere en su fabricación el uso de estructuras de soportes las cuales no pueden ser optimizadas mediante la inyección dispar, por lo que la reducción de tiempo de fabricación en modelos que requieren estructura de soportes se verá limitada por la cantidad de soportes que el modelo exija en su construcción.

5.3 Estudio comparativo de características objetivas

Como parte de la evaluación de ambos grupos de piezas se realizaron diversas pruebas dimensionales, de peso y densidad en cada una de las piezas fabricadas, con el objetivo de determinar las diferencias o similitudes de cada una respecto de su par fabricado con el proceso tradicional o mediante inyección dispar. Así mismo se realizaron pruebas de resistencia mecánica y rugosidad en probetas fabricadas para dichas pruebas mediante los dos procesos de fabricación antes citados.

5.3.1 Estudio comparativo de peso y dimensiones

Respecto de las tolerancias dimensionales de las piezas fabricadas por medio del algoritmo tradicional se observó una tolerancia de +/- 0.5 mm, lo cual corresponde con las características delimitadas por el fabricante, en el caso del algoritmo de inyección dispar se observó que se conservan las dimensiones descritas en el modelo CAD 3D con una tolerancia de +/- 1mm para dimensiones menores a 50 mm y para mayores a 50 mm tolerancias dentro del 1% respecto de la medida original. Dado que las medidas de los modelos son aproximadamente iguales, se asume que el volumen⁸ de los modelos fabricados por el proceso tradicional y los fabricados por inyección dispar, son aproximadamente iguales, dejando como elemento decisivo al peso, el cual es indicativo de la cantidad de material consumido en la fabricación de cada uno de los elementos.

Los resultados obtenidos de la medición de pesos y cálculo de densidad general de las piezas fabricadas se pueden observar en la Tabla 4, donde se aprecia que existe una diferencia promedio en peso de cada una de las piezas con su correspondiente menor a 1 gramo, lo cual es indicativo que cada una de las piezas con sus correspondientes son aproximadamente iguales. Sin embargo, la diferencia de densidad en porcentaje tiene un promedio del 6.7 %, principalmente debido a que la evaluación de la densidad se realizó en volúmenes pequeños donde un gramo de diferencia en peso genera un gran cambio en la densidad obtenida.

MODELO	Volumen modelo (cm ³)	Proceso tradicional (gramos)	Inyección dispar (gramos)	Diferencia peso (gramos)	Densidad proceso tradicional (gr/cm ³)	Densidad inyección dispar (gr/cm ³)	Diferencia densidad porcentaje relativo
Oso	21.609	10.30	10.67	-0.37	0.477	0.494	-3.6%
Turbina	5.837	7.56	6.20	1.36	1.295	1.062	18.0%
Mano	13.467	8.03	7.28	0.75	0.596	0.541	9.3%
Soporte mecánico	15.861	10.80	9.38	1.42	0.681	0.591	13.1%
Edificio	47.282	19.16	19.08	0.08	0.405	0.404	0.4%
cubo	65.559	22.72	22.03	0.69	0.347	0.336	3.0%
			Promedio	0.655			6.7%

Tabla 4 Registro de volumen, peso y densidad

⁸ El cálculo del volumen se realizó mediante un software que regresa el volumen en cm³, esta herramienta se puede consultar en http://codecanyon.net/item/stl-volume-weight-calculator/full_screen_preview/3073161.

Es de notar que aun cuando existen diferencias en las densidades registradas entre piezas fabricadas por el proceso tradicional y las piezas fabricadas mediante la inyección dispar, en ambos procesos las tendencias de densidad en las piezas tienden hacia el mismo comportamiento como se aprecia en la Figura 80, dichos cambios en la densidad general de la pieza están relacionadas directamente con las regiones internas del modelos, pues los modelos con regiones internas más amplias como son el edificio y el cubo tienden a tener una densidad más baja, respecto de las piezas con regiones internas reducidas como son la turbina de agua donde los contornos y regiones de superficie representan parte considerable del modelo fabricado, lo cual genera un incremento en el peso del modelo y por lo tanto en la densidad del mismo.

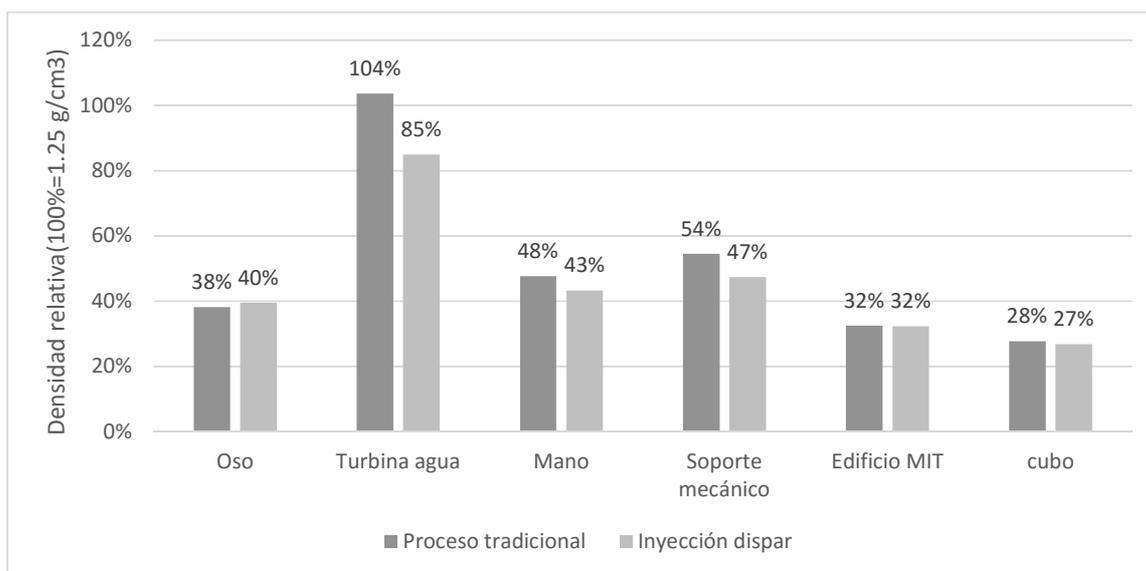


Figura 80 Comparativo de densidades relativas a la densidad del PLA.

5.3.2 Estudio comparativo de resistencia mecánica

Como parte de la evaluación de ambos procesos de fabricación se realizaron pruebas de esfuerzos únicamente en tensión, debido a que fue el único equipo al cual se tuvo acceso para

hacer dichas pruebas, por lo que las pruebas de compresión y torsión no son evaluadas en este trabajo.

Las pruebas de tensión se realizaron en una máquina especializada para dicha prueba, modelo WEW-300D fabricada por *Timegroup*, y de la cual se enumeran sus especificaciones en los anexos adjuntos al presente documento.

Es importante recalcar, que todo tipo de piezas fabricadas por medio de manufactura aditiva tienen características anisotrópicas de resistencia, lo que significa que la resistencia que ofrecen dependerá en gran medida de la dirección en la cual se realice el esfuerzo; así la prueba se realizó en una dirección vertical sobre el plano en que se genera el mallado interno de la fabricación de cada una de las probetas (véase Figura 81), las cuales se fabricaron usando PLA, a una altura de capa externa de 0.2mm y un relleno interno del 50%.

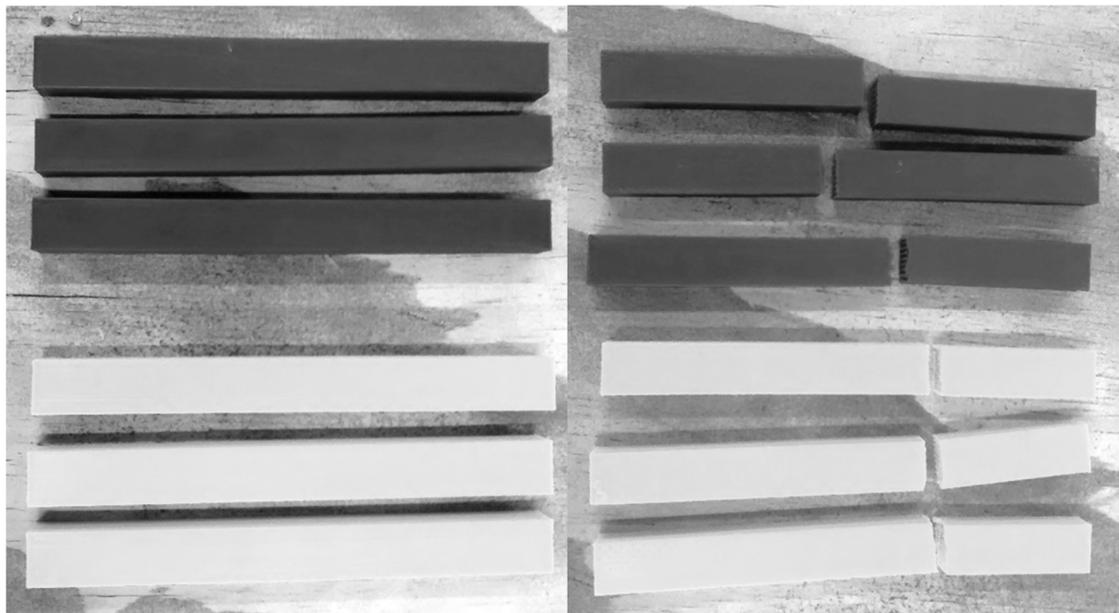


Figura 81 Probetas antes y después de la prueba de tensión (arriba proceso tradicional, abajo inyección dispar)

Los resultados de la prueba se pueden consultar en la Tabla 5, donde se aprecia que las probetas fabricadas mediante el algoritmo tradicional con un relleno hexagonal resistieron en promedio un esfuerzo de 17.30 MPa y las probetas fabricadas mediante inyección dispar con un relleno de cuadrícula soportaron un esfuerzo promedio de 21.44 MPa.

	<i>Piezas Replicator 0.2 um @ 50% infill patron hexagonal</i>			<i>Piezas CIC iny dispar 0.2 um @ 50% infill patron cuadrícula</i>		
	Área sec. Transversal (cm ²)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)	Area sec. Transversal (cm ²)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)
<i>Ensayo 1</i>	3.00	4.83	16.100	3.00	6.948	23.160
<i>Ensayo 2</i>	3.00	5.898	19.660	3.00	5.701	19.003
<i>Ensayo 3</i>	3.00	4.849	16.163	3.00	6.648	22.160
	Promedio	5.192	17.308	Promedio	6.432	21.441
	Desv. Std.	0.611	2.037	Desv. Std.	0.651	2.170

Tabla 5 Resultados de prueba de esfuerzos a tensión.

Los resultados de las pruebas demuestran que la fabricación mediante relleno cuadrícula usando inyección dispar no resta resistencia a las piezas fabricadas por esta técnica y que inclusive eleva un poco la resistencia de las piezas fabricadas mediante esta técnica. La mejora en resistencia puede deberse en parte a que el relleno en cuadrícula se encuentra alineado a la dirección de los esfuerzos y a que los filamentos de relleno internos dentro de los modelos son ligeramente más anchos, pues el relleno en la inyección dispar se realiza al doble respecto del proceso tradicional con el fin de mantener las mismas cantidades de material que el proceso tradicional.

Independientemente de los resultados, es importante hacer mención que un estudio completo de esta índole debe de agrupar estudios en múltiples direcciones y en esfuerzos tanto de tensión como compresión para demostrar todas las características que pueden ser obtenidas mediante la fabricación por inyección dispar con un relleno cuadrículado.

5.3.3 Estudio comparativo de rugosidad superficial

El estudio comparativo de rugosidad se realizó con el objetivo de demostrar la similitud en acabados externos de las piezas fabricadas mediante el proceso tradicional y el de inyección

dispar, para lo cual esta medición se realizó en una de las caras perpendiculares al plano de la plataforma de fabricación en dos cubos muestra fabricados mediante cada uno de los procesos aquí citados.

Las mediciones de rugosidad dan una idea sobre qué tan uniforme es una superficie mediante dos parámetros básicamente los cuales son la rugosidad total y la rugosidad media, parámetros que pueden ser observados en la Figura 82. El proceso de medición se realiza realizando un barrido mediante un brazo con una punta piezoeléctrica que registra las deformaciones de dicha superficie en un barrido típicamente de 0.4 a 1 mm de distancia. De esta manera la rugosidad total expresa la distancia entre el valle más bajo y pico más alto de las deformaciones registradas, para que a partir de esta distancia ésta se divida a la mitad y sirva de referencia para la medición de la rugosidad media, la cual es el promedio de las deformaciones registradas durante el barrido a partir de la mitad del pico más alto al valle más bajo.

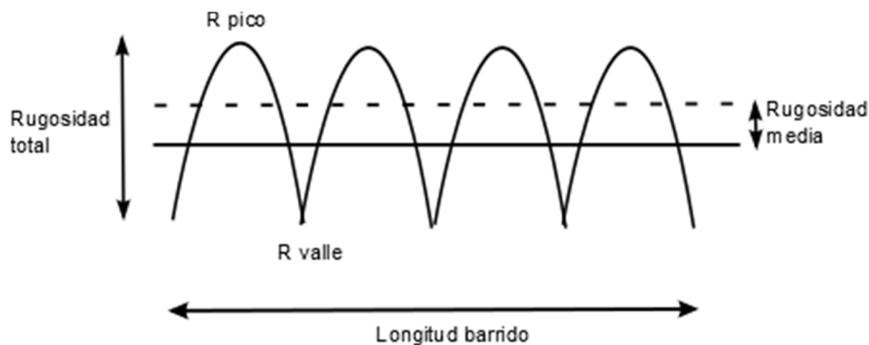


Figura 82 Esquema demostrativo de parámetros de mediciones en rugosidad.



Figura 83 Imagen equipo medición rugosidad.

En las mediciones de rugosidad tomadas, se realizó un barrido de 0.8 mm con tres patrones base, el primero de estos fabricado mediante el proceso tradicional a 0.2 mm de altura de capa, el segundo fabricado mediante inyección dispar a 0.2 de altura de capa y finalmente el tercero solo como referencia fabricado mediante el proceso tradicional a 0.3 mm de altura de capa. La idea de comparar los resultados en dichos patrones es que se observe que las mediciones tanto para el primero y segundo patrón son similares, pues en apariencia externa deben tener características similares, pero que difieren de un patrón fabricado a otra altura de capa. Los resultados de dichas mediciones⁹ se resumen en la Tabla 6 ,donde se aprecia que los valores de rugosidad media y rugosidad total en sus valores promedio son similares tanto para la inyección dispar como para el proceso tradicional, y que efectivamente difieren del de las mediciones registradas para la pieza fabricada con una altura de capa de 0.3 mm.

	<i>Superficie proceso tradicional @0.2 mm</i>		<i>Superficie proceso inyección dispar @ 0.2 mm</i>		<i>superficie 0.3 mm</i>	
	Rugosidad media (um)	Rugosidad total (um)	Rugosidad media (um)	Rugosidad total (um)	Rugosidad media (um)	Rugosidad total (um)
<i>medición 1</i>	13.4	68	13.98	61.8	20.12	88.3
<i>medición 2</i>	14.05	76.4	14.7	62.2	20.4	89.6
<i>medición 3</i>	14.09	76	14.28	62.2	19.65	88.4
<i>promedio</i>	13.847	73.467	14.320	62.067	20.057	88.767
<i>desv. std</i>	0.387	4.738	0.362	0.231	0.379	0.723

Tabla 6 Resultados mediciones de rugosidad.

5.4 Estudio comparativo de características subjetivas

El estudio de características subjetivas fue realizado mediante una encuesta a un grupo de 40 personas, a las cuales se les aplicó una encuesta de 24 preguntas, donde se evaluaron las imperfecciones presentes y la calidad visual de dos grupos de piezas, donde el primer grupo es fabricado por medio del proceso tradicional y el segundo grupo fabricados por medio de inyección dispar. Tanto el primero y segundo grupos constan de cinco piezas cada uno de

⁹ Los resultados completos y gráficos de cada una de las mediciones se pueden consultar en los anexos de este documento.

ellos, y se diferenciaban porque el primer grupo fue fabricado en color azul y el segundo grupo en color rojo, con el fin de no indicarle a los encuestados que piezas formaban parte del proceso de fabricación tradicional y cuales parte del proceso de inyección dispar, a fin de no propiciar favoritismos. Los modelos de cada uno de los grupos antes mencionados están compuestos de 5 piezas: un edificio, una mano, un oso, una turbina y una pieza mecánica, las cuales se pueden observar en la Figura 84.



Figura 84 Modelos prueba de ambos grupos

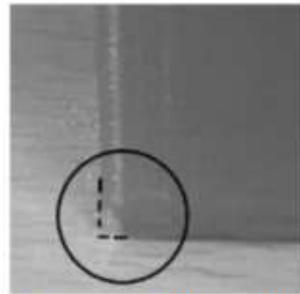
5.4.1 Características e imperfecciones a evaluar

Durante el proceso de fabricación tanto tradicional como por inyección dispar existen diferentes imperfecciones, que pueden ser expuestas en mayor o menor grado dependiendo de la complejidad geométrica de la pieza, algunas de estas imperfecciones son:

- a) **Escurrimiento de material.** Generado por la falta de una estructura que soporte el filamento al caer.
- b) **Bordes indefinidos.** Falta de precisión en las esquinas y bordes agudos del modelo.
- c) **Filamento fuera de la pieza.** Se genera por la falta de control en la dosificación de material.
- d) **Rayones o bordes en la superficie.** Se generan por cambios en la velocidad de movimiento del cabezal.
- e) **Secciones abiertas o sin material.** Esta imperfección puede deberse a que no se hallan agregado suficientes capas para el cerrado de una superficie.



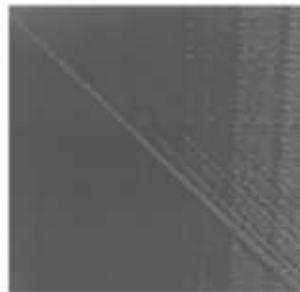
a) Escurrimientos de material



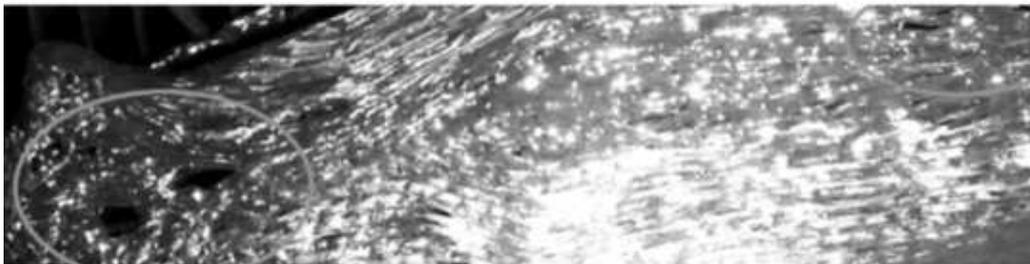
b) Bordes indefinidos



c) Filamento fuera de la pieza



d) Rayones o bordes en la superficie



e) Secciones abiertas o sin material

Figura 85 Imperfecciones presentes en piezas fabricadas

En la primera parte de la encuesta se realizaron preguntas relacionadas a que imperfecciones son halladas en cada una de las piezas, donde el encuestado puede marcar más de una de las imperfección a la vez; y la segunda parte de la encuesta se realizó con la intención de determinar que apreciación visual tienen las personas de las piezas fabricadas por ambos tipos de métodos, las calidad de las piezas era evaluada en una escala del 1 al 10, donde 1 se refiere a una pieza que no puede ser usada con ningún fin y el 10 representa una pieza sin imperfecciones presentes en la pieza evaluada.

5.4.2 Resultados de la encuesta

Referente a los resultados obtenidos en la encuesta se contabilizaron 272 imperfecciones en las piezas fabricadas por medio del proceso tradicional y 290 imperfecciones en las piezas fabricadas mediante inyección dispar, sin embargo cuando se les pregunto a los encuestados sobre la percepción visual de calidad las piezas fabricadas por inyección dispar quedaron ligeramente por encima de las piezas fabricadas por el proceso tradicional con un promedio de 7.9 y 7.8 respectivamente.

Estudiando a más detalle los resultados de la encuesta (véase Figura 86), se revela que las imperfecciones referentes a rayones o borde en la superficie y escurrimientos de material son ponderados de manera similar entre ambos procesos, no así en el caso de la falta de definición de bordes y filamentos fuera de la pieza, donde la inyección dispar contabiliza más imperfecciones, pero contabilizando menos imperfecciones en secciones abiertas o sin material.

Por otro lado, si las imperfecciones son contabilizadas por cada una de las piezas (véase Figura 87), encontramos que la mano y el soporte mecánico ponderan valores similares de imperfecciones; para el caso del edificio y la turbina éstas ponderan más imperfecciones en la fabricación por inyección dispar, pero contabilizando menos imperfecciones en el oso.

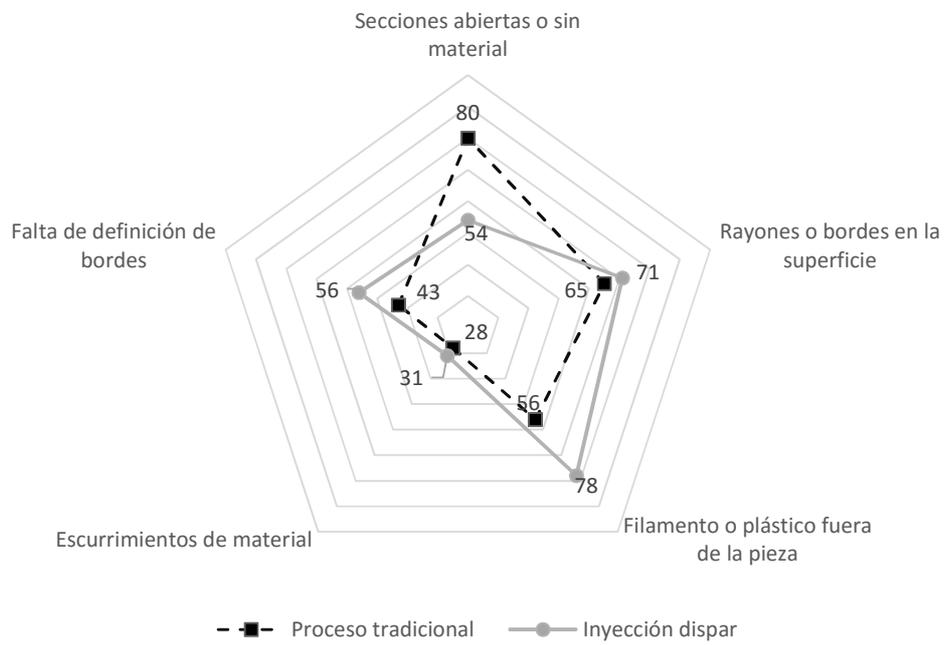


Figura 86 Comparativo general de imperfecciones

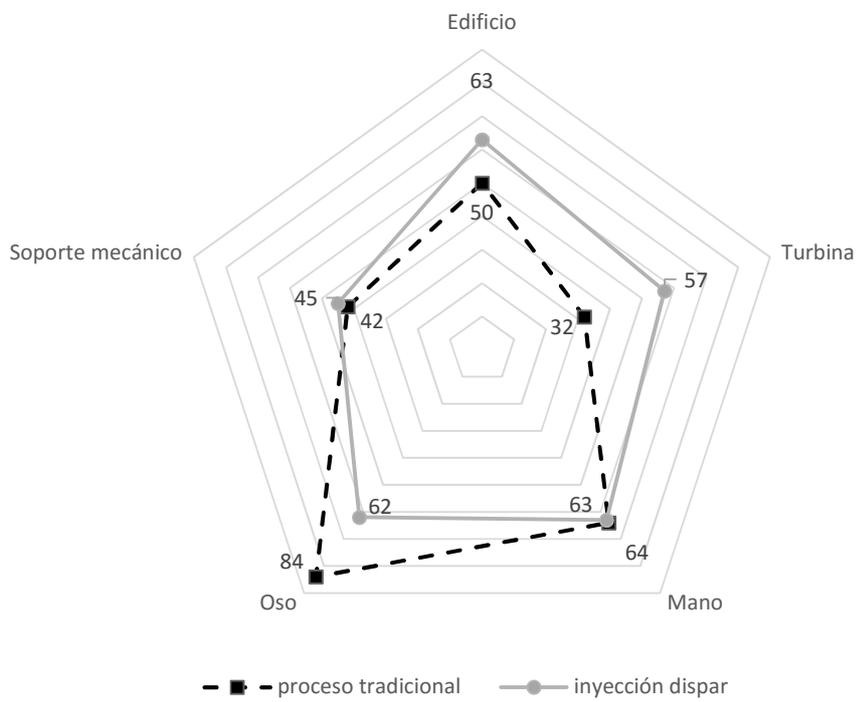


Figura 87 Comparativo de imperfecciones por pieza

Así mismo, los datos obtenidos de la percepción visual de calidad en las piezas en cada uno de los grupos, mostró que existe una relación directa entre la ponderación dada a cada una de las piezas y sus correspondientes de imperfecciones presentes, pues en piezas con más imperfecciones se ponderaron con menos puntaje, y viceversa, como se aprecia en la Figura 88.

Finalmente, a los encuestados se les pregunto sobre su percepción general de la cantidad de imperfecciones en cada una de los grupos evaluados o si consideraban que estos eran equivalentes, quedando porcentajes muy cercanos entre ambos grupos, con un 38% donde los encuestados mencionan que las piezas rojas tienen más imperfecciones y con 42% para las piezas fabricadas por el proceso tradicional, y un 20% que considera que las imperfecciones en ambos grupos de piezas son equivalentes, de lo cual se puede determinar que en términos de apariencia visual ambos grupos de piezas son equivalentes.

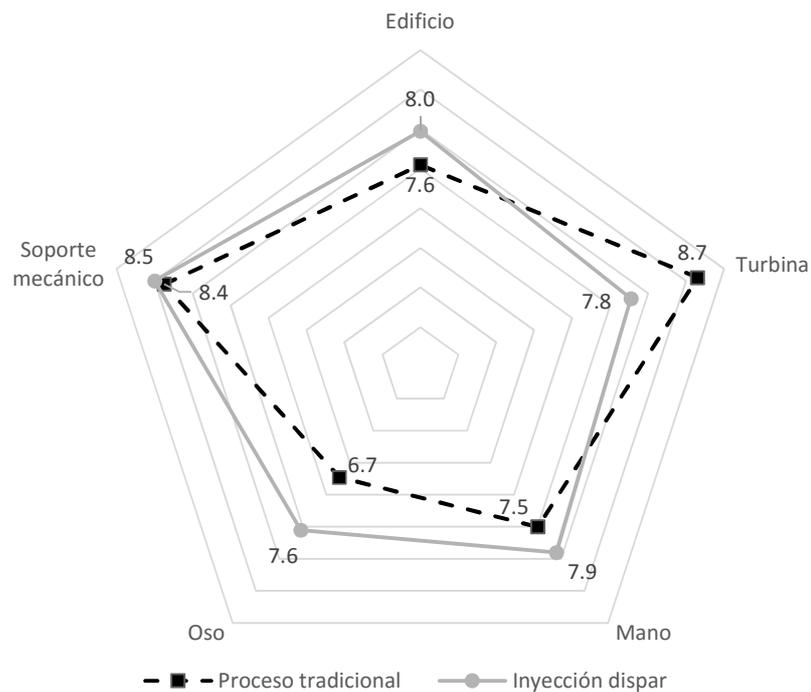


Figura 88 Evaluación visual de calidad

Capítulo 6 Conclusiones

El proceso de fabricación por medio de manufactura aditiva, es un proceso de construcción por capas donde el objeto es dividido en secciones de una altura o grosor estipulado (altura de capa), sin embargo, el proceso de división por capas de un modelo genera un compromiso entre una fabricación con un acabado fino con alturas de capa pequeñas pero tiempos de fabricación prolongados, o una fabricación burda a una altura de capa grande de capa y con un tiempo de fabricación reducido. Así entre mejores terminados se deseen, mas es el tiempo necesario para la fabricación de los modelos, y viceversa, en donde un acabado superficial liso de un modelo está directamente relacionada a la altura de capa, por lo que si se desea mejorar el acabado de las piezas, es necesario reducir la altura de cada capa, generando más capas por consiguiente, pero incrementado el tiempo de fabricación, que puede llegar a niveles inaceptables.

De esta manera, se presentan las siguientes conclusiones alineadas a los objetivos que se presentan al inicio de este documento:

1. Se logró un proceso de segmentación que genera la división del modelo a dos alturas de capa diferentes (0.2 mm para regiones externas y 0.4 mm para las regiones internas), basando la decisión en **el recorrido más corto de los vectores que describen los trazos de relleno interno**, lo cual permite una correcta superposición de capas a alturas de capa distintas.
2. La simulación de las trayectorias automáticamente generadas demostró que la selección de capas de relleno interno mediante **el recorrido más corto, permite trabajar con modelos 3D de geometrías complejas**, las cuales no son presentadas en trabajos de segmentación adaptativa donde los trabajos presentes en el estado del arte solo presentan metodologías para modelos 3D heterogéneos con geometrías simétricas.
3. Las piezas fabricadas mediante inyección dispar, tienen una **reducción en el tiempo de fabricación de hasta un 51% en comparativo con el proceso tradicional**, destacando que los modelos con regiones internas más amplias es donde se obtienen

mayores reducciones de tiempo de fabricación. La altura general de un modelo a fabricar genera un incremento en forma cuadrática del tiempo de fabricación, este aumento se explica por un mayor número de capas generadas al momento de dividir el modelo en capas, Así en cada capa, se generan estructuras de relleno interno redundantes, es precisamente en esas estructuras donde la inyección dispar genera reducción en el tiempo de fabricación.

4. Es posible fabricar piezas por medio de inyección dispar **sin afectar significativamente las propiedades** de dichas piezas en comparativa con las piezas fabricadas por el proceso tradicional. En donde el estudio de las características objetivas demuestra que las diferencias en términos de dimensiones son menores al 2%, y las diferencias en peso son menores a 1 gramo; sin embargo el estudio de densidad demostró que si existe una reducción en la densidad general de las piezas fabricadas mediante inyección dispar, diferencia que nos es mayor al 7%. Así mismo, el estudio de las características subjetivas demostró que la percepción visual y las imperfecciones presentes en las piezas fabricadas mediante el proceso tradicional y por inyección dispar es similar.

Otro de los puntos destacables del trabajo, el algoritmo propuesto que identifica las diversas regiones de fabricación del modelo dentro de cada capa, pues la propuesta que se presenta permite acelerar el proceso de segmentación y cálculo de vectores involucrados en el proceso. Dicho algoritmo evita que se realice un corrimiento hacia adentro de los vectores de contorno, evitando un paso presente en otros algoritmos de segmentación y que en este caso se hace al mismo tiempo que la detección de áreas internas. Producto de la implementación del algoritmo se redujo considerablemente el tiempo de procesamiento de los modelos CAD respecto de los sistemas de segmentación tradicionales, habilitando la posibilidad de explorar este sistema de generación de vectores en plataformas con recursos más limitados que una PC, como pudiesen ser dispositivos móviles.

En resumen se puede concluir que el objetivo general y particulares planteados se lograron satisfactoriamente, pues se desarrolló un método que permite la fabricación de modelos a dos flujos de inyección, uno abundante usado en las regiones internas del modelo y el segundo más fino usado para las regiones externas del modelo, obteniendo una reducción

considerable en el tiempo de fabricación, logrando que las piezas fabricadas mediante inyección dispar tengan atributos similares a los obtenidos mediante el proceso tradicional, lo cual valida la hipótesis expuesta al inicio del trabajo de investigación.

6.1 Trabajo futuro

Aun cuando se cumplieron los objetivos planteados, podemos mencionar diversas mejoras y actividades adicionales a las presentadas en este documento. Entre las cuales están la necesidad de realizar un estudio integral que evalúe todos los factores que incrementan el tiempo de fabricación, en búsqueda de mejoras adicionales a la metodología aquí presentada.

Otra posible mejora está relacionada con explorar la posibilidad de trabajar con valores variables de altura de capa en los rellenos internos, pues en esta propuesta solo se ha realizado el relleno en una altura de capa dos veces más grande que la altura de capa para los rellenos externos, principalmente debido a que como primera aproximación es la forma más sencilla de asegurar una correcta relación entre capas internas y externas, pero queda abierta la posibilidad de explorar propuestas donde la altura de capa para las regiones internas varíe dinámicamente de acuerdo a las propiedades geométricas del modelo.

Dado que la metodología desarrollada es flexible, resultaría interesante su aplicación a sistemas multicanal de manufactura aditiva o la aplicabilidad de la metodología actual en otros sistemas de manufactura aditiva monocanal como son el LST, SLS o SLA, así mismo, el proceso puede ser adaptado a sistemas de manufactura multicanal como son el OBJECT, 3DP o ThermoJet, pues estos últimos, también conllevan un proceso de generación de un patrón de rejilla, donde la inyección dispar puede ser aprovechada.

Finalmente, dado que el algoritmo desarrollado, se implementó en lenguaje Java, la implementación del segmentador en dispositivos móviles Android no debería representar dificultades mayores al menos con el fin de evaluar la viabilidad del procesamiento de modelos CAD en dispositivos Android, en donde por las características limitadas de memoria y procesamiento de los dispositivos móviles no existe una propuesta de sistema de segmentación para este tipo de arquitecturas.

Referencias

- [1] Gibson, Rosen y Tucker, “Additive Manufacturing Technologies”, Inglaterra: Springer, 2010.
- [2] H. Bin, “Development of a Software procedure for Curved Layered Fused Deposition Modelling (CLFDM)”, Nueva Zelanda: Auckland University of Technology, 2009.
- [3] J. Moilanen, «Statistical Studies of Peer Production» 06 Septiembre 2013. [En línea]. Available: <http://surveys.peerproduction.net/>.
- [4] R. Infante, Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido, Madrid España: UNED, 2012.
- [5] Pham y Gault, «A comparison of rapid prototyping technologies» *Int J Mach Tools Manufacturing*, vol. 38, p. 1257–1287, 1998.
- [6] Stratasys, «Stratasys» 27 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.stratasys.com/>.
- [7] D. Neishtadt, «Quora» Quora, 2 Julio 2014. [En línea]. Available: <https://www.quora.com/How-would-you-price-objects-made-by-a-3d-printer-assuming-you-had-an-online-3d-printing-business>. [Último acceso: 2015 Octubre 12].
- [8] Moe, Kreemer y Hlwan, «Rapid Manufacturing Usind FDM Systems» Springer-Verlag, London, 2013.
- [9] 3D Hubs, «3D Hubs» [En línea]. Available: <https://www.3dhubs.com/best-3d-printer-guide>. [Último acceso: 12 Octubre 2015].
- [10] B. Huang, Alternate Slicing and Deposition Strategies for FDM, Auckland: Auckland University, 2014.

- [11] Suh y Wozny, «Adaptative slicing of freeform fabrication processes» *Freeform Fabrication Symposium*, 1994.
- [12] Sabourin, Houser y Bohn, Acurate exterior, fast interior layered manufacturing, vol. 3: *Rapid Prototyping Journal*, 1997.
- [13] J. Tyberg y J. H. Bohn, «Local adaptative slicing» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 4, 1998.
- [14] K. Thrimurthulu, P. M. Pandey y N. V. Reddy, «Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44, 2004.
- [15] Z. Zhao y L. Laperrie, «Adaptative direct slicing of the solid model for rapid prototyping» *International Journal of Production Research*, 2000.
- [16] Zeng, Lai y Qi, «Efficient slicing procedure based on adaptative layer depth normal image» *Computer Aided Desing*, vol. 43, 2011.
- [17] Wang, Yang, Fuh y Loh, «Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing.» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, pp. 30-37, 202.
- [18] Chen, Wang, Ye, Xiao y Huang, «Direct Slicing from PowerSHAPE Models for Rapid Prototyping» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, 2001.
- [19] Starly, Lau, Sun y Bradbury, «Direct slicing of STEP based NURBS models for layered manufacturing» *Computer-Aided Design*, vol. 37, pp. 387-397, 2005.
- [20] B. Qiu, X. Zhou y X. Qian, «Direct slicing of cloud data with guaranteed topology for rapid prototyping» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, 2001.

- [21] A. Bowyer, «RepRap» 28 Septiembre 2014. [En línea]. Available: <http://reprap.org/>. [Último acceso: 2015 Octubre 15].
- [22] B. Evans, *Practical 3D Printers*, Nueva York: Springer Science+Business, 2012.
- [23] T. Kramer, F. Proctor y E. Messina, «The NIST RS274NGC Interpreter - Version 3,» National Institute of Standards and Technology, 2000.
- [24] Avelino, Gomez, Guzman y Román , "Impresora 3D por extrusión de termoplástico para la fabricación de piezas y modelos", Ciudad de México: UPIITA-IPN, 2011.
- [25] MMS editorial staff, «CAM system simplifies Swiss-type lathe programming» *Modern Machine Shop*, vol. 8, n° 83, pp. 100-105, 2010.
- [26] Z. Zhang y J. Sanjay, «An improved slicing algorithm with efficient contour construction using STL files» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, n° 5-8, pp. 1347-1362, 2015.
- [27] Gregori, Volpatoy, Minetto y d. Silva, «Slicing Triangle Meshes: An Asymptotically Optimal Algorithm» de *Federal University of Technology*, Curitiba, Brasil, 2011.
- [28] Vatti y Balla, «A generic solution to polygon clipping» *Communications of the ACM*, vol. 35, n° 7, pp. 56-63, 1992.
- [29] S. Puri, *Efficient Parallel and Distributed Algorithms for GIS Polygon Overlay Processing*, Georgia: Georgia State University, 2015.
- [30] Martínez, Rueda y Feito, «A new algorithm for computing Boolean operations on polygons» *Computers & Geosciences*, vol. 35, pp. 1177-1185, 2008.
- [31] Greiner y Hormann, «Efficient clipping of arbitrary polygons,» *ACM Transactions on Graphics*, vol. 17, n° 2, pp. 71-83, 1998.
- [32] Eragubi y Munir, «Slicing 3D CAD Model in STL Format and Laser Path Generation,» *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 4, n° 4, pp. 410-413, 2013.

- [33] Huang, Chunsheng, Jianhua y Haitao, «Slice Data Based Support Generation Algorithm for Fused Deposition Modeling» *Tsinghua Science and Technology*, vol. 14, n° S1, pp. 223-228, 2009.
- [34] N. U. Mendonsa, «Influence of FDM Process Parameters on Build Time Using Taguchi and ANOVA Approach» *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015.
- [35] Fahraz, Chowdary y Maharaj, «Influence of Some Process Parameters on Build Time, Material Consumption, and Surface Roughness of FDM Processed Parts: Inferences Based on the Taguchi Design of Experiments» *IAJC/ISAM Joint International Conference*, 2014.
- [36] S. Saqib y J. Urbanic, «An Experimental Study to Determine Geometric and Dimensional Accuracy Impact Factors for Fused Deposition Modelled Parts» de *4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*, Montreal, Canada, 2011.
- [37] J. Owen, *STEP: an introduction*. Information geometers, Winchester, UK: 2nd ed., 1997.
- [38] Hyung-Jung, Kyung-Hoon, Sung-Hoon, Heon-Seong y Cha-Soo, «Slicing algorithm for polyhedral models based on vertex shifting» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 11, n° 5, pp. 803-807, 2010.
- [39] Jamieson y Hacker, «Direct slicing of CAD Models for Rapid Prototyping» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 1, 1995.
- [40] P. Kulkarni y D. Dutta, «An accurate slicing procedure for layered manufacturing» *Computer Aided Design*, vol. 28, 1996.
- [41] Topcu, Tascioglu y Ünver, «A method for slicing CAD models in binary STL format» *International Advanced Technologies Symposium(IASTS' 11)*, 2011.
- [42] Pulak, Venkata y Sanjay, «Slicing procedures in layered manufacturing review» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, 2003.

- [43] T. Ruo, «Implementation of a New Adaptive Slicing Algorithm for the Rapid Prototyping Manufacturing System» *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 9, n° 3, 2004.
- [44] ReplicatorG, «replicat.org» [En línea]. Available: <http://replicat.org/>. [Último acceso: 15 Noviembre 2015].

Anexo A Notación manejada.

Código y variables

Dentro del documento se usará la nomenclatura de Java para la designación de variables, atributos y métodos, los cuales serán escritos en inglés, con un nombre que se relacione con su función dentro del programa y en fuente *Courier new*.

Tipo de elemento	Ejemplo	Descripción
Clase	<code>SliceVector</code>	Las clases serán escritas en forma de sustantivo, con la primera letra en mayúscula y la separación de palabras se hace por medio de letras mayúsculas.
Atributo de una clase, argumentos de un método o instancia de una clase(objeto)	<code>pStart.</code>	Los elementos citados, serán escritos en forma de sustantivo, con la primera letra en minúscula y la separación de palabras se hace por medio de letras mayúsculas.
Métodos de las clases.	<code>getVectors()</code>	Los elementos citados, serán escritos en forma de verbo o acción (a excepción de los constructores), con la primera letra en minúscula y la separación de palabras se hace por medio de letras mayúsculas.
Variables primitivas.	<code>x</code>	Los elementos citados, usualmente son escritos en forma de sustantivo. El nombre de la variable se escribe por completo en minúsculas.

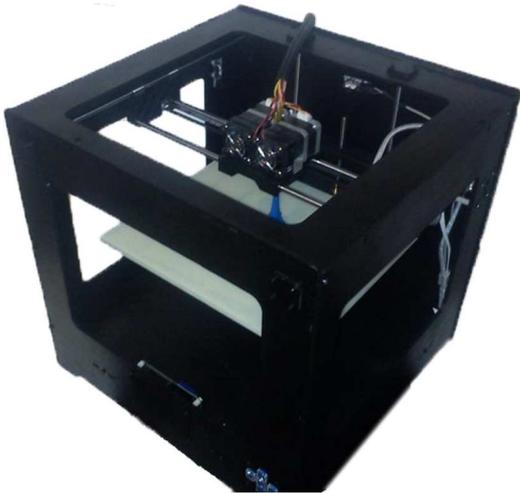
Variables estáticas o contantes.	X_{MAX}	Los elementos citados, usualmente son escritos en forma de sustantivo. El nombre de la variable se escribe por completo en mayúsculas.
Índices.	i	Se usaran las letras i, j, l, m . para designar los nombres de índices de ciclos.

Definiciones matemáticas.

Tipo de elemento	Ejemplo	Descripción
Vector	$P_{inicial}$	Letras mayúsculas con un subíndice adicional para detallar función.
Escalar o contante.	$x_{inicial}$	Letras minúsculas con un subíndice adicional para detallar función.
Símbolos matemáticos	$\cap \geq$	Nomenclatura estándar de operadores matemáticos.
Conjunto	A	Los conjuntos de Ven se representan por medio de letras mayúsculas de doble trazo.

Anexo B Especificaciones impresora 3D ZCube Dual

Características.



SOFTWARE.

Replicator G o Makerware

Compatibilidad con Windows, OSX y Linux.

Impresión mediante tarjeta SD o sobre USB

Archivos de entrada: STL, OBJ o GCODE.

GENERALES.

Alimentación Eléctrica: **100-240V, 50/60Hz, 4.0 A**

Peso: **11Kg**

Dimensiones: **410x400x415 mm**

IMPRESIÓN.

Volumen de impresión:

250x200x190 mm un cabezal

200x200x190 mm dos cabezales

Espesor de capa: **0.1mm – 0.4 mm (Ajustable)**

Diámetro de la boquilla: **0.4 mm**

Velocidad: **70 mm/s**

Velocidad de extrusión: **aprox. 20 cm³/hr.**

Precisión de posicionamiento

XY: 0.0025mm Z: 0.011mm

Tolerancia. **+/- 0.5mm**

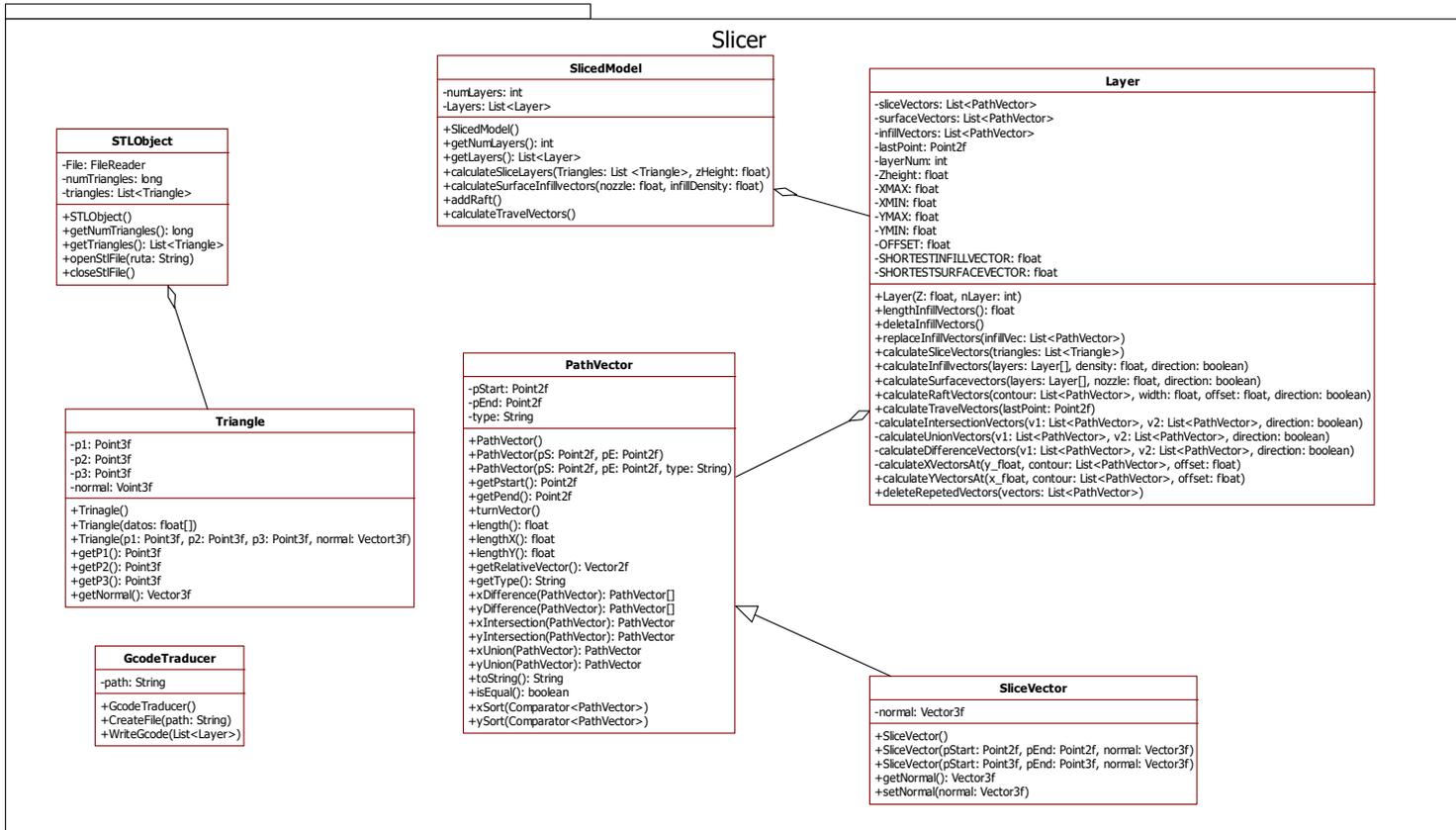
Precisión de posicionamiento eje Z: **0.011mm**

MATERIALES.

Trabaja con ABS o PLA.

Diámetro del filamento: **1.75 mm**

Anexo C Diagrama de clases del proyecto



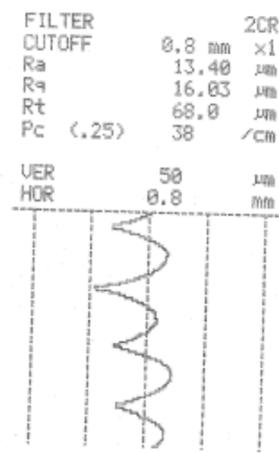
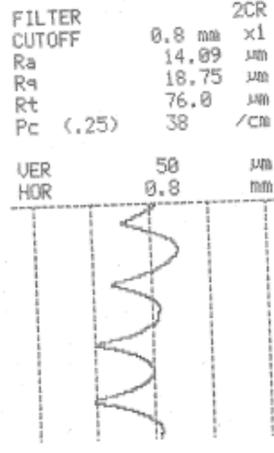
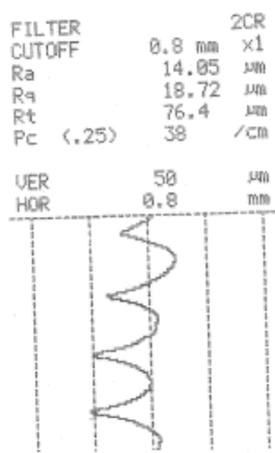
Anexo D Hoja de especificaciones de máquina de esfuerzos

Specification	WEW-300D
Max. capacity (KN)	: 300
Measuring range	: 2%-100% of FS
Relative error of reading	: $\leq \pm 1\%$
Clamping method	: Hydraulic clamping
Round specimen clamping range(mm):	: $\Phi 10\text{-}\Phi 32$
Flat specimen clamping range(mm):	: 0-15
Flat specimen clamping width(mm)	: 80
Max. tension test space (mm)	: 650
Max. compression test space (mm)	: 550
Control cabinet dimensions (mm)	: 610*700*1100
Load frame dimensions (including piston stroke) (mm)	: 840*620*2210
Motor power (KW)	: 2.1
Load frame weight (KG)	: 1600
Column net distance (mm)	: 520
Compression platen size (mm)	: $\Phi 160$
Span of bending roller (mm)	: 240
Width of bending roller (mm)	: 140
Allowable camber (mm)	: 100
Shearing specimen diameter (mm)	: $\Phi 10$
Max. piston stroke (mm)	: 200
Piston max. speed (mm/min)	: Approx. 70
Crosshead max. speed (mm/min)	: Approx 160

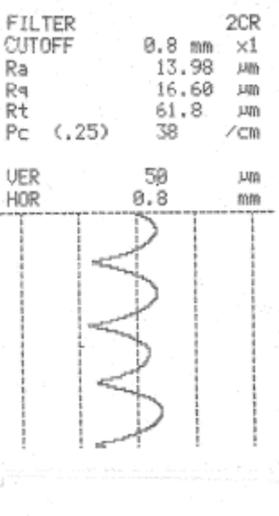
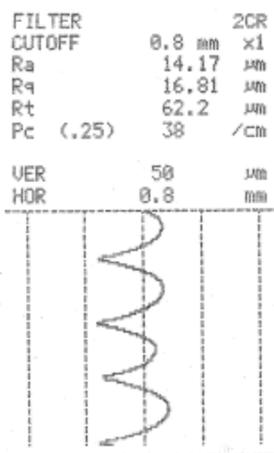
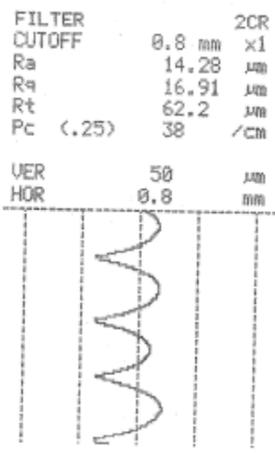


Anexo E Resultados de mediciones de rugosidad

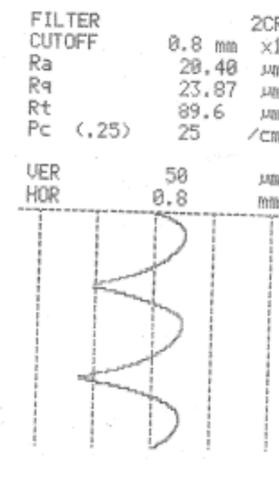
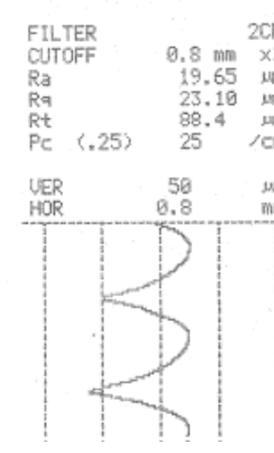
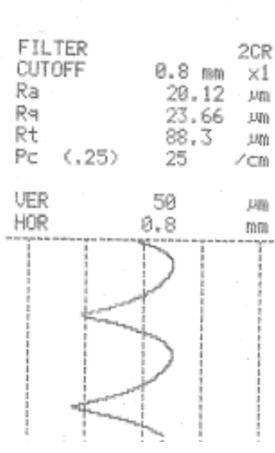
Proceso tradicional 0.2 mm



Inyección dispar 0.2/0.4 mm

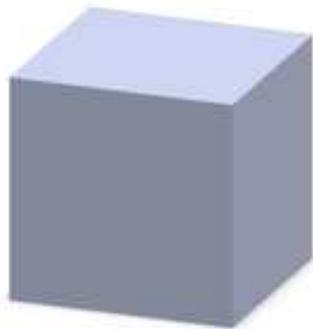


Proceso tradicional 0.3 mm

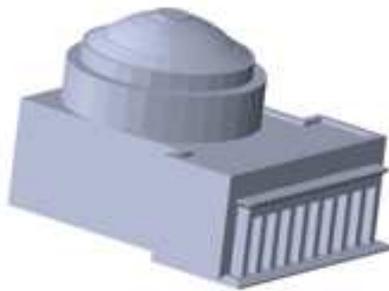


Anexo F Preguntas y resultados de encuesta realizadas

La siguiente encuesta forma parte de un estudio que busca identificar las diferencias e imperfecciones en dos conjuntos de piezas las cuales han sido fabricadas mediante 2 algoritmos de trazado de vectores. A continuación se presentan los modelos CAD originales que sirvieron de base para la fabricación de cada una de las piezas, por favor observe los modelos CAD con detalle.



CUBO



EDIFICIO



MANO



OSO



TURBINA



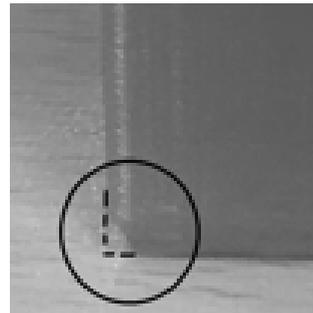
SOPORTE MECÁNICO

Como parte del estudio, se plantea identificar imperfecciones, las cuales se presenta a continuación a manera de muestra.

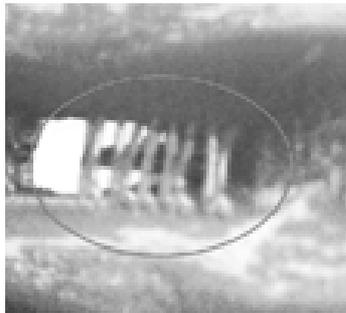
Siguiente a esto se le pedirá contestar una serie de preguntas, por favor sea lo más objetivo posible, agradeciendo sus observaciones.



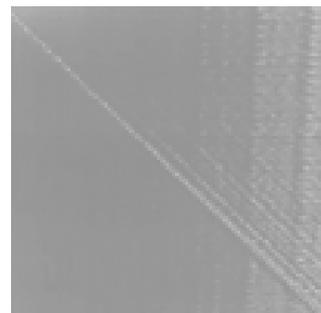
Escurremientos de material



Bordes indefinidos



Filamento fuera de la pieza



Rayones o bordes en la superficie



Secciones abiertas o sin material

Encuesta calidad piezas

* Requerido

1. Por favor indique su área de conocimiento u especialidad *

- Ingeniería
- Administración
- Ciencias Naturales
- Ciencias Sociales
- Otra

2. Evalúe las imperfecciones del edificio azul

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

3. Evalúe las imperfecciones del edificio rojo

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

4. Evalúe las imperfecciones de la turbina azul

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

5 Evalué las imperfecciones de la turbina roja

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

6. Evalué las imperfecciones de la mano azul

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

7. Evalué las imperfecciones de la mano roja

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

8. Evalué las imperfecciones del oso azul

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

9 Evalué las imperfecciones del oso rojo

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

10. Evalué la imperfecciones del soporte mecánico azul

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

11. Evalué las imperfecciones del soporte mecánico rojo

- Secciones abiertas o sin material
- Rayones o bordes en la superficie
- Filamento o plástico fuera de la pieza
- Escurrimientos de material
- Falta de definición de bordes

12. Evalué la calidad de acabados del edificio azul

*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

13. Evalué la calidad de acabados del edificio rojo

*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

14. Evalúe la calidad de acabados de la turbina azul *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

15. Evalúe la calidad de acabados de la turbina roja *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

16. Evalúe la calidad de acabados de la mano azul *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

17. Evalúe la calidad de acabados de la mano roja *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

18. Evalúe la calidad de acabados del oso azul *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

19. Evalúe la calidad de acabados del oso rojo *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

20. Evalúe la calidad de acabados del soporte mecánico azul *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

21. Evalúe la calidad de acabados del soporte mecánico rojo *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

22. Después de evaluar ambas piezas, indique que piezas considera tienen más imperfecciones *

- Rojas
- Azules
- Son equivalentes

23. Si las piezas fueran del mismo color podría diferenciarlas una de la otra.

*

Sí

NO

24. Por favor indique sus comentarios adicionales a la encuesta

Los resultados obtenidos de la encuesta a 40 personas se enumeran a continuación.

Pregunta 1. Área de conocimiento

Área de conocimiento o especialidad	Conteo	Porcentaje
Ingeniería	35	88%
Administración	3	8%
Ciencias naturales	0	0%
Ciencias Sociales	1	3%
Otra	1	3%

Preguntas 1 a 11, evaluación de imperfecciones presentes en las piezas.

	Imperfecciones piezas azules					
	Edificio	Turbina	Mano	Oso	Soporte mecánico	Sumatoria
Secciones abiertas o sin material	27	6	8	31	8	80
Rayones o bordes en la superficie	8	10	17	15	15	65
Filamento o plástico fuera de la pieza	9	5	15	19	8	56
Escurrecimientos de material	1	0	15	9	3	28
Falta de definición de bordes	5	11	9	10	8	43
Total	50	32	64	84	42	272

	Imperfecciones piezas rojas					
	Edificio	Turbina	Mano	Oso	Soporte mecánico	Sumatoria
Secciones abiertas o sin material	25	4	7	4	14	54
Rayones o bordes en la superficie	18	14	15	11	13	71
Filamento o plástico fuera de la pieza	8	21	24	20	5	78
Escurrecimientos de material	2	8	7	12	2	31
Falta de definición de bordes	10	10	10	15	11	56
Total	63	57	63	62	45	290

Preguntas 12 a 21, evaluación visual de la calidad de las piezas.

	Evaluación calidad piezas azules					Soporte mecánico
	Edificio	Turbina	Mano	Oso		
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2	1		2
4	2	0	1	3		0
5	2	0	1	3		0
6	2	2	3	11		0
7	8	4	10	7		4
8	20	10	12	11		12
9	4	14	9	4		15
10	2	10	2	0		7
Promedio x modelo	7.6	8.7	7.5	6.7	8.4	7.8

	Evaluación calidad piezas rojas					Soporte mecánico
	Edificio	Turbina	Mano	Oso		
1	0	0	0	0		0
2	0	0	0	0		0
3	0	0	0	0		0
4	0	0	0	2		2
5	0	2	1	2		0
6	6	2	4	4		0
7	6	9	7	10		4
8	13	18	17	9		11
9	13	8	8	12		14
10	2	1	3	1		9
Promedio x modelo	8.0	7.8	7.9	7.6	8.5	7.9

Pregunta 22. Percepción de imperfecciones por grupo de piezas.

	Conteo	Porcentaje
Rojas	15	37.5%
Azules	17	42.5%
Son equivalentes	8	20.0%

Pregunta 23 Si las piezas fueran del mismo color podría identificarlas.

	Conteo	Porcentaje
Si	34	85%
No	6	15%