DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA IMPRESORA TRIDIMENSIONAL PARA LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS PLÁSTICOS UTILIZANDO LA TÉCNICA DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO

CARLOS ARTURO GUZMÁN VILLOTA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2012

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA IMPRESORA TRIDIMENSIONAL PARA LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS PLÁSTICOS UTILIZANDO LA TÉCNICA DEPOSICIÓN DE HILO FUNDIDO

CARLOS ARTURO GUZMÁN VILLOTA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director
Ing. ROLANDO BARAHONA CABRERA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SAN JUAN DE PASTO
2012

“LAS IDEAS Y CONCLUSIONES APORTADAS EN EL TRABAJO DE GRADO, SON DE RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DE AUTOR”

ARTÍCULO 1 DEL ACUERDO No. 324 DE OCTUBRE 11 DE 1966, EMANADO DEL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO

San Juan de Pasto, Mayo de 2012

Nota de aceptación:

_____
_____
_____
_____
_____
_____

_____
Presidente

_____
Jurado

_____
Jurado

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado en primer lugar a Dios, quien me ha dado la fuerza para seguir adelante en los momentos difíciles. Especialmente a mi madre Flor Alba que me ha apoyado en todos mis proyectos y ha tenido mucha paciencia, gracias por su ayuda y por acogerme en su hogar y por ser una persona quien ha brindado el mejor ejemplo a la hora de formar a un hijo. A mi Tía Blanca Ermila que aunque ya no esté físicamente conmigo siempre la llevo en mi corazón, gracias por sus consejos y momentos que perduraran para toda la vida. A mi familia y amigos por su apoyo y palabras de aliento.

RESUMEN

Este documento presenta el diseño e implementación de un prototipo de una impresora tridimensional como resultado de un trabajo aplicativo. se describen las teorías utilizadas dentro del marco del proyecto, como son algoritmos de trazo de líneas, algoritmos de relleno, técnicas de prototipado, programas de diseño y materiales utilizados para la fabricación de elementos. la impresora permite obtener modelos físicos a partir de un diseño realizado en programa computacional 3d. el sistema está compuesto por una estructura física que permite movimientos en los tres ejes (x, y, z). el software esta desarrollado en java, éste analiza la información de un archivo con extensión stl, y genera señales de control para obtener desplazamientos en los ejes de la máquina y de esta manera seguir las coordenadas que componen el objeto. se usa el método de deposición de hilo fundido para la construcción del objeto, razón por la cual el plástico utilizado es calentado y sobrepuesto capa por capa hasta alcanzar la totalidad del objeto. se obtienen modelos de formas básicas diseñadas en un programa cad 3d. este trabajo describe cada una de las partes de la estructura física, los parámetros del software de análisis de la información, el sistema electrónico de control, sistema de control de temperatura, la validación de resultados, conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

ABSTRACT

this document presents the design and implementation of a prototype of a three-dimensional printer as a result of application work. the theories are described used inside the mark of the project, like they are algorithms of line of lines, filler algorithms, technical of prototipado, design programs and materials used for the production of elements. the printer allows to obtain physical models starting from a design carried out in computational program 3d. the system is compound for a physical structure that allows movements in the three axes (x, y, z). the software this developed in java, this analyzes the information of a file with extension stl, and it generates control signs to obtain displacements in the axes of the machine and this way to follow the coordinates that compose the object. the deposition method is used without stopping fused for the construction of the object, reason for which the used plastic is heated and superimposed layer for layer until reaching the entirety of the object. models in basic ways are obtained designed in a program cad 3d. this work describes each one of the parts of the physical structure, the parameters of the software of analysis of the information, the electronic system of control, system of control of temperature, the validation of results, conclusions and recommendations for future works

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	14
1. ASPECTOS PRELIMINARES	16
1.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	16
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3 ALCANCE Y DELIMITACIONES	17
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. MARCO REFERENCIAL	20
3.1 MARCO CONCEPTUAL	20
3.1.1 Impresora Tridimensional	20
3.1.2 Prototipado Rápido	20
3.1.3 Deposición de hilo fundido (FDM)	20
3.1.4 Control Numérico Por Computador	22
3.1.5 Archivo STL	23
3.1.6 Problemas De Los Archivos STL	24
3.1.7 Programa De Diseño CAD 3D (Blender)	24
3.1.8 Plástico ABS	25
3.1.9 Lenguaje De Programación	27
3.1.10 Dibujo de Líneas	27
3.1.11 Discretización de Líneas	28
3.1.12 Sistemas de Coordenadas de Referencia	29
3.1.13 Algoritmo De Trazo De Líneas	29
3.1.14 Áreas de Relleno	32
3.1.15 Algoritmos de Relleno	32
3.1.16 Microcontrolador	36
3.1.17 Correas de Sincronización	37
3.1.18 Motor Paso a Paso	38
3.1.19 Piñón	38
3.2 MARCO LEGAL	39
4. SISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO	40
4.1 INTERFAZ USB	40
4.1.1 Métodos de iniciación de varios	41
4.1.2 Métodos generales	41
4.1.3 Métodos rápidos	41
4.2 CONTROL MAESTRO	41
4.3 CIRCUITO DE POTENCIA CONTROL DE MOTORES PAP	42
4.4 MOTORES PASA A PASO	42
4.5 ELEMENTOS DE SENSADO	43
4.6 DIAGRAMA DE CIRCUITO ELECTRICO	43

4.7 LISTA DE COMPONENTES 45
5. GENERALIDADES DEL SISTEMA 46
5.1 PIEZAS COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA 46
5.2 PROCESO DE ARMADO 50
5.3 MOVIMIENTO EN LA MÁQUINA 54
5.4 TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO 55
5.4.1 Correas 55
5.4.2 Piñones 56
5.5 DESPLAZAMIENTO EN LOS EJES 56
5.6 EL EXTRUSOR 57
5.6.1 Resolución del Extrusor 58
5.6.2 Potencia del Calefactor 60
5.6.3 Sistema de Control de Temperatura de Calefactor 61
5.6.4 Diagrama del circuito de control de Temperatura 63
5.6.5 Lista de componentes de circuito de control de temperatura 64
5.7 FUENTE DE ALIMENTACIÓN 65
5.8 REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE 66
5.9 RECURSOS MATERIALES 66
6. INFORMACIÓN DEL OBJETO 67
6.1 CAPTURA DE INFORMACIÓN JAVA 69
6.2 OBTENCIÓN DE LÍNEAS 70
6.3 PRIORIDAD DE MOVIMIENTO EN LOS EJES 71
6.4 GENERACIÓN DE PUNTOS DE LINEA 74
7 DESPLAZAMIENTO SOBRE EJES 75
7.1 DESPLAZAMIENTOS CON PRIORIDAD EN X 75
7.1.1 Cuadrante I 75
7.1.2 Cuadrante IV 77
7.2 DESPLAZAMIENTO CON PRIORIDAD DE Y 78
7.2.1 Cuadrante I 78
7.2.2 Cuadrante II 80
7.3 DESPLAZAMIENTO CON OTRAS PRIORIDADES 81
7.4 GENERACIÓN DE RUTAS 83
7.4.1 Ruta Externa 83
7.4.2 Rutas Internas 86
7.5 RELLENO 88
7.5.1 Calculo de Líneas de Relleno 92
7.5.2 Relleno Paralelo a Eje X 93
7.5.3 Relleno Paralelo a Eje Y 95
7.5.4 Líneas Perpendiculares de Relleno 96
7.5.5 Relleno para Diseños que presentan Huecos 98
7.6 ORGANIZACIÓN DE LÍNEAS 99
7.7 ENVIÓ DE INFORMACIÓN PARA DESPLAZAMIENTO 100
8. INTERFACE DE USUARIO DEL PROGRAMA 101
9. VALIDACIÓN DE RESULTADOS 104

9.1 CUBO 104
9.1.1 Forma y medidas 104
9.1.2 Cálculo de error 105
9.2 CILINDRO 107
9.2.1 Forma y medidas 107
9.2.2 Cálculo de error 107
9.3 TIEMPO DE FABRICACIÓN 108
10. CONCLUSIONES 109
11. RECOMENDACIONES 111
BIBLIOGRAFÍA 112
ANEXOS 115

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Esquema de Deposición de Hilo Fundido	21
Figura 2. Pantallazo de inicio de BLENDER	25
Figura 3. Rollo de ABS	27
Figura 4. Relación de pixeles con una línea	28
Figura 5. Distancia de Separación Bresenham	30
Figura 6. Opciones de Relleno	33
Figura 7. Relleno por Inundación	33
Figura 8. Línea de Barrido con cruces de polígono	34
Figura 9. Intersecciones con vértices	34
Figura 10. Número de puntos de Intersección	35
Figura 11. Incrementos en los ejes	35
Figura 12. Correa de sincronización XL	38
Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de control	40
Figura 14. Diagrama de circuito electrónico	43
Figura 15. Soporte de vértices	46
Figura 16. Soporte de parte móvil en eje Y	47
Figura 17. Base sobre la que se construye el Objeto	47
Figura 18. Soporte lateral superior e inferior	48
Figura 19. Soporte de motores	48
Figura 20. Soporte de eje X	49
Figura 21. Base de Extrusor	50
Figura 22. Base Inferior Armada	51
Figura 23. Soportes Inferiores Paralelos a X	51
Figura 24. Piezas de Soporte de Base	51
Figura 25. Base sobre Varilla lisa.	52
Figura 26. Trasmisión de movimiento en eje Z	52
Figura 27. Soportes para movimiento en X	53
Figura 28. Base superior	53
Figura 29. Impresora Armada	54
Figura 30. El extrusor	58
Figura 31. Etapa de amplificación de voltaje de Termocupla	62
Figura 32. Diagrama de circuito de control	63
Figura 33. Información de un cubo a materializar	67
Figura 34. Triangulo con coordenadas	69
Figura 35. Movimiento en los cuadrantes	72
Figura 36. Trazo de líneas	72
Figura 37. Prioridad en X – Cuadrante I	75
Figura 38. Prioridad en X – Cuadrante IV	77
Figura 39. Prioridad Y – Cuadrante I	78
Figura 40. Prioridad Y – Cuadrante II	80

Figura 41. Prioridades negativas y sus cuadrantes 81
Figura 42. Líneas en la parte inferior de un cubo 84
Figura 43. Líneas de la ruta Externa de un Cubo 84
Figura 44. Líneas externas de capas 86
Figura 45. Objeto con Espacios vacios 87
Figura 46. Línea de escaneo sobre dos aristas 88
Figura 47. Área de relleno 89
Figura 48. Puntos de una línea de Relleno 89
Figura 49. Lineas de relleno en una capa 90
Figura 50. Relleno de Objetos con espacios vacios 91
Figura 51. Puntos Inicial y Final de Líneas de Relleno 92
Figura 52. Espacios entre puntos y líneas Externas e Internas 92
Figura 53. Coordenadas de la línea de Relleno paralela a X 94
Figura 54. Líneas de relleno paralelas al eje X 94
Figura 55. Coordenadas de la línea de Relleno paralela a Y 96
Figura 56. Líneas de relleno paralelas al eje Y 96
Figura 57. Líneas perpendiculares 97
Figura 58. Relleno para Diseños Huecos 98
Figura 59. Relleno de varias capas 98
Figura 60. Rutas con líneas desordenadas 99
Figura 61. Ruta con líneas ordenadas 99
Figura 62. Interface de usuario 101
Figura 63. Cargar archivo 101
Figura 64. Análisis de la Información 102
Figura 65. Mensaje de terminación de análisis 102
Figura 66. Opciones de Manejo 103
Figura 67. Diseño de cubo vs Objeto fabricado 104
Figura 68. Diseño de cilindro vs Objeto fabricado 107

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla1. Características de las técnicas de Prototipado Rápido	22
Tabla 2. Propiedades del ABS	26
Tabla 3. Pasos de las Correas de Sincronización	37
Tabla 4. Pines del microcontrolador	42
Tabla 5. Características de motores PAP	42
Tabla 6. Componentes Circuito Maestro	45
Tabla 7. Componentes Driver para un motor	45
Tabla 8. Anchos de correas XL	55
Tabla 9. Distancia por paso en los ejes	57
Tabla 10. Componentes Circuito Maestro Control Temperatura	65
Tabla 11. Componentes Circuito de Potencia	65
Tabla 12. Recursos materiales del Proyecto	66
Tabla 13. Selección de cuadrante para el Movimiento	73
Tabla 14. Prioridad en Movimiento	73
Tabla 15. Ecuaciones de Distancia en los ejes	82
Tabla 16. Distancia de Referencia	83
Tabla 17. Dimensión de los espacios	105
Tabla 18. Error en el eje X	105
Tabla 19. Error en el eje Y	106
Tabla 20. Error en el eje Z	106
Tabla 21. Error en el radio del cilindro	107
Tabla 22. Tiempo de fabricación	108

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Problemas de Diseño de un Objeto	115
Anexo B. Pasos para la construcción de un objeto con la impresora	118

.INTRODUCCIÓN

La impresión en 3D permite construir prototipos reales a partir de un diseño hecho en computador, dada la tecnología existente en la actualidad se han desarrollado varios modelos y una perspectiva a mediano plazo es que se vuelva una tecnología de consumo. Este proyecto puede representar especial importancia para empresas dedicadas al diseño de elementos, que pueden ser la arquitectura, automoción, educación, joyería, electrónica, robótica, mantenimiento de equipos e instrumentos, entre otras, donde una parte importante de la producción es la construcción de objetos en 3D.

La impresión en 3D se convierte en una alternativa muy relevante ya que permite obtener elementos de una manera rápida, y con especificaciones de forma y tamaño más exactas a los obtenidos de forma manual. Además permite la repetibilidad de los elementos sin que sea necesario hacer nuevamente el diseño de la pieza.

Este proyecto está enfocado a la implementación de un prototipo de una impresora tridimensional que permite obtener elementos plásticos de diferentes formas geométricas básicas como cuadrados, rectángulos, triángulos, esferas etc, a partir de un diseño hecho en computador. Se utiliza la técnica de deposición de hilo fundido para la construcción de los modelos de diseño, donde el programa informático desarrollado en Java, traduce un grafico en señales electrónicas que posteriormente son usadas para la generación de movimientos en la máquina. Debido a que se usa la estratificación para la construcción del modelo se organiza la información en capas [1]. Mediante el uso de un extrusor de material (del cual se compondrá el elemento) se deposita una cantidad de este sobre la superficie y de esta manera es posible la generación del objeto.

Básicamente la máquina responde a un control numérico computarizado ya que permite controlar en todo momento la posición del extrusor respecto a un punto en la base donde se fabrican los elementos, este control se realiza mediante órdenes provenientes del software que traduce la información de un grafico a coordenadas. La máquina permite obtener modelos físicos tridimensionales de manera rápida y similar a la geometría diseñada en el software modelador.

En la primera parte del documento se describe los aspectos preliminares del proyecto donde se define el planteamiento del problema teniendo en cuenta las desventajas de la elaboración de piezas en forma manual, también se define el alcance y delimitaciones que rigen el proyecto, tales como materiales utilizados para la fabricación de los elementos, características de diseño de los objetos y tamaños máximos y mínimos de los objetos obtenidos.

Luego se detallan los aspectos teóricos sobre los cuales está regido el proyecto, tales como trazos de línea en donde se definen las pautas para desarrollar el algoritmo que se usa en la generación de pasos en los motores, es fundamental tener muy claro los conceptos de línea y las formulas sobre las que se fundamenta. También se define en qué consiste el Prototipado Rápido, las diferentes técnicas que existen, el material utilizado para la construcción de los objetos y el programa de diseño CAD 3D.

A partir del capítulo 4 se tratan los temas desarrollados en el proyecto como Control de movimiento, aquí se trata en forma detallada como se realiza el control de motores y por consiguiente el movimiento sobre los ejes, se describe los componentes electrónicos utilizados, interface de comunicación y características de los motores usados.

Posteriormente se detalla el proceso de construcción de la estructura de la máquina, se muestra la totalidad de las piezas, el lugar donde están ubicadas, la forma de unión entre ellas y el proceso como se armo dicha estructura.

Luego se presenta la información del objeto proveniente del programa de diseño CAD 3D, el análisis de dicha información con el fin de generar los pasos y lograr el seguimiento de líneas, y sobrepasar por áreas donde se debe rellenar de material. Se describen los parámetros que se tienen en cuenta para realizar las líneas que componen las rutas y el objeto en general.

También se muestra la interface desarrollada para la interacción entre el usuario y el sistema desarrollado, se describe como se carga y analiza un archivo luego de hacer el diseño en el programa CAD y que pasos se debe seguir para obtener el producto. Finalmente se describe las conclusiones y recomendaciones que arroja el proyecto.

1. ASPECTOS PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

Para sobresalir a nivel empresarial en cualquiera que sea la actividad económica a la que se dedique, es necesaria la optimización de los recursos con los que cuenta. En el ámbito regional cuando se requiere la elaboración de piezas que no tengan un modelo establecido o se necesite partes o componentes para hacer mantenimiento o reparación de máquinas (como elementos de transmisión de movimiento de baja potencia donde sea aplicable el plástico ABS), y no se encuentren en el mercado, por lo general se acude a técnicas manuales para su construcción.

Si se habla de elaboración manual de objetos se tiene que ésta presenta deficiencias como son, invertir muchas horas en la fabricación de los elementos, obtener productos con especificaciones técnicas como forma y tamaños inadecuados, no permitir la repetibilidad de los productos y pérdida de materias primas.

Una solución para dichos inconvenientes es la impresión en 3D que es una tecnología que puede ser empleada en la construcción rápida de prototipos, maquetas de arquitectura y en general, para la construcción de cualquier modelo en tres dimensiones directamente a partir de un diseño hecho en un computador.
El inconveniente de esta tecnología o de los sistemas de impresión en 3D existentes en la actualidad está representado en el alto costo comercial y en su complejidad, lo cual no ha permitido que esta se implemente de forma masiva en la industria.

Dado lo anterior y a su alto grado de aplicación en diferentes ramas, el objetivo es construir un prototipo de impresora tridimensional a un costo inferior en comparación a las ya existentes, que fabrique elementos de geometría básica con características de forma y medidas similares a las diseñada en el programa modelador y en un menor tiempo en comparación a la elaboración manual.

1.2 FORMULACIÓN

¿El prototipo de la impresora tridimensional de elementos plásticos logrará construir objetos con características de forma y tamaño similares a las diseñadas en el programa CAD 3D?

1.3 ALCANCE Y DELIMITACIONES

El prototipo de la impresora tridimensional tiene una estructura física, donde se fabricará el elemento, esta consta a su vez de un sistema de extrusión el cual tiene movimientos sobre dos ejes cardinales, y una base que es donde se ubica el objeto, esta base tiene un movimiento sobre un eje cardinal, completando así los movimientos necesarios para la construcción de las piezas.

El prototipo utiliza una interface en JAVA que a su vez hace uso de un archivo STL generado por un programa CAD 3D donde se diseña el elemento. El software en JAVA convierte la información del archivo STL en señales que posteriormente llegan a un circuito de control en el cual se utiliza un microcontrolador PIC que permite realizar una comunicación USB, el circuito de control se encarga del manejo de los motores y por tanto de los desplazamientos de las partes móviles de la máquina.

Para la fabricación de los elementos se utiliza un plástico ABS el cual ofrece propiedades importantes de ingeniería como buena resistencia mecánica y al impacto, combinado con facilidad para el procesado, características que son fundamentales dentro de este proyecto. Se utiliza la técnica de deposición por hilo fundido que opera extruyendo una pequeña cantidad de termoplástico a través de una boquilla, formando cada sección y a su vez el objeto tridimensional. Puede ser necesario darle a las piezas obtenidas un acabado manual mediante un proceso de lijado para obtener una textura externa mas lisa. Se obtiene elementos plásticos de geometría básica, como cúbica, cilíndrica, cónica, esférica, o composición de ellas.

El prototipo de la impresora tridimensional queda en la universidad de Nariño y puede ser utilizada para obtener piezas didácticas y apoyar las actividades de enseñanza. Posteriormente puede ser susceptible de mejoras y aplicarla en la industria tanto regional como nacional.

Con el prototipo no se puede lograr elementos que en su interior tengan espacios vacios como esferas, cubos, cilindros huecos, u otro tipo de arquitectura con estas características, ya que el sistema usa la estratificación para la construcción del elemento, y al no haber una capa que sirva como base para la siguiente el material no se puede depositar y adquirir la geometría deseada.

El sistema está diseñado para obtener objetos tridimensionales con las siguientes restricciones.

- El diseño del objeto en el programa CAD debe ser apropiado (no contener dobles caras, huecos, dobles líneas), este es un punto muy importante a tener en cuenta ya que el análisis se lo realiza basado en coordenadas de puntos, y al encontrar estas inconsistencias los resultados finales pueden no ser los deseados.

- Objetos no mayores a 5 cm por lado, en sus tres ejes
- Objetos no menores a 0.5 cm de lado, en sus tres ejes

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un prototipo de impresora tridimensional, la cual permita la fabricación de piezas o componentes plásticos a partir de un diseño realizado en un programa modelador.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Elaborar una estructura física que tenga movimiento en las tres dimensiones y permita la utilización de la técnica deposición de hilo fundido para la construcción de elementos plásticos.

- Desarrollar un modulo software en JAVA que permita la interpretación, de la información del objeto diseñado en un programa CAD 3D y se puedan definir las coordenadas que lo constituyen.

- Implementar un sistema de control el cual reciba del software mediante enlace USB las coordenadas que constituyen el objeto y a través de señales eléctricas genere los movimientos.

- Desarrollar un modulo software en JAVA que reciba y envié información al sistema de control para obtener los desplazamientos necesarios y así lograr la construcción del objeto.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 MARCO CONCEPTUAL

Dentro de este Marco se encuentran los aspectos teóricos sobre los cuales se fundamenta el proyecto, se tratan también las características funcionales de el material utilizado para la construcción de piezas y otros temas relacionados con la automatización.

3.1.1 Impresora Tridimensional. Las impresoras tridimensionales son máquinas capaces de obtener un elemento volumétrico a partir de un diseño en 3D realizado en computador mediante un programa CAD, es similar a una impresora convencional que imprime en papel esquemas obtenidos de un programa 2D. En la actualidad existen varios tipos de impresoras 3D tales como, impresora 3D de Tinta, impresora 3D de laser, impresora 3D de inyección de polímeros. Por lo general este tipo de máquinas construyen piezas a partir de información que se obtiene de archivos CAD en formato STL, estos archivos tienen información de triángulos los cuales componen el objeto [1] y [2].

3.1.2 Prototipado Rápido. El prototipado Rápido puede agrupar varias tecnologías con las que se puede obtener sólidos a partir de la superposición de capaz horizontales. “Se puede concebir como un conjunto de tecnologías, que permiten la obtención de prototipos en menos de 24 horas a partir de un fichero CAD. Consecuencia de esta rapidez de respuesta, es que el tiempo de desarrollo de un producto puede reducirse a la mitad, la quinta e incluso la décima parte”[1]. Su desarrollo comenzó al final de los años 80, la primera tecnología fue la estereolitografía, posteriormente aparecen otras tales como, Fused Deposition Modeling (FDM), Solid Ground Curing (SGC), y Laminated Object Manufacturing (LOM). Se estudiaron estas técnicas pero a continuación se relata en forma detallada en qué consiste la (FDM) que es la utilizada en el desarrollo del proyecto. [1].

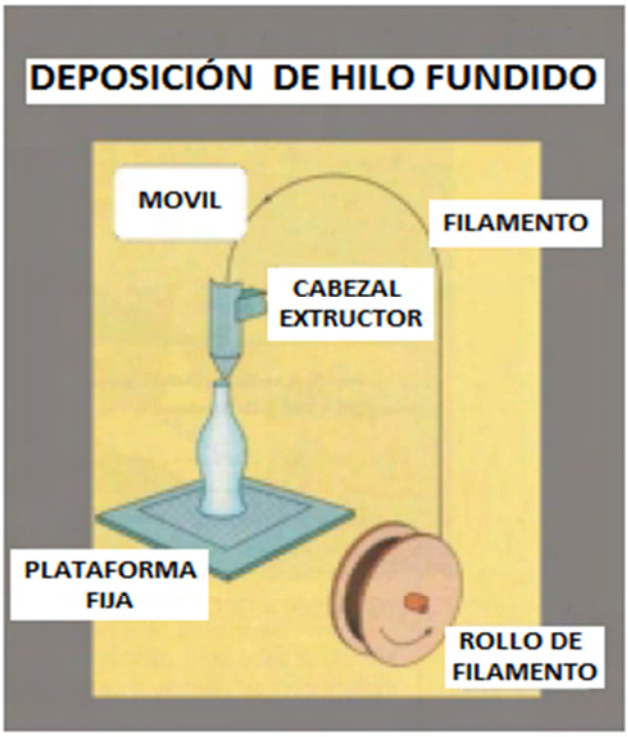
3.1.3 Deposición de hilo fundido (FDM). El presente trabajo se basa en esta técnica para la obtención de objetos tridimensionales a partir de un diseño realizado en un programa CAD. Este método “opera extruyendo una pequeña cantidad de termoplástico, a través de una diminuta boquilla, formando cada sección y a su vez el objeto tridimensional. La máquina utilizada para su realización está compuesta fundamentalmente por.

- Un cabezal móvil, el cual vierte el filamento.
- Una plataforma.

[1]DIGITA2 TECNOLOGÍA & COMUNICACIONES. Prototipado rápido Modelos físicos y tridimensionales. [en línea]. http://www.protorapido.es/que.pdf [Citado el 11 de Agosto de 2011].

- Rollo de termoplástico”[2].

Figura 1. Esquema de Deposición de Hilo Fundido



Fuente: SÁNCHEZ JIMÉNEZ, Javier; FERNÁNDEZ DE LA PUENTE, Arturo; LLORENTE GENIZ, Julián. Técnicas de prototipado Rápido En: XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA. Universidad de Sevilla España, p. 6

El sistema descrito en este proyecto extruye plástico Acrilonitrilo Butadieno Estireno, en adelante (ABS) para la fabricación de los elementos. El cabezal tiene movimiento sobre dos ejes (X y Z), y la plataforma donde se deposita el plástico capa por capa tiene movimiento sobre el eje Y.

En esta técnica se construyen objetos de forma horizontal capa a capa, se deposita un hilo de plástico a alta temperatura (1° por debajo del punto de fusión), el cual una vez se deposita sobre la base o sobre las capas inferiores se solidifica, y de esta manera se conforma la totalidad del objeto.

A continuación se presenta una tabla comparativa de las diferentes técnicas de prototipado donde se presentan sus principales características, sus ventajas y

[2]SÁNCHEZ JIMÉNEZ, Javier; FERNÁNDEZ DE LA PUENTE, Arturo; LLORENTE GENIZ, Julián. Técnicas de prototipado Rápido En: XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA. Universidad de Sevilla España, p. 6

desventajas, precios aproximados de las máquinas, materiales utilizados en la fabricación, etc

Tabla 1. Características de las técnicas de Prototipado Rápido

	SLA	SGC	SLS	LOM	FDM
TECNOLOGIA	Polimerización	Polimerización	Sinterización	Corte Laminado	Deposición de Hilo
LASER	SI	NO	SI	SI	NO
TAMAÑO MAX DE LAS PIEZAS	19 x 19 x 25 25,5x25,5x25,5 51x51x60	35,5x51x51	diámetro 30x38	25,4x33x38	30,5x30,5x30,5
PRECIO €	95.000 185.000 385.000	490.000	350.000 a 400.000	75.000	180.000
MATERIALES	Fotopolímeros	Fotopolímeros	PVC, policarbonatos, nylon y ceras	Papel, poliéster y nylon celulosa	Ceras, ABS y plástico tipo nylon
VENTAJAS	Tecnología más madura; rápido; precisión del 2%	Mayor precisión; mejores propiedades mecánicas;	Material más barato; más variedad de materiales; no hacen falta soportes	Precisión hasta 0.1%; de 5 a 10 veces más rápido que otros métodos; material más barato	Material más barato. No huele. no hacen falta Soportes. más rápido que el SLA
DESVENTAJAS	Los modelos Son traslucidos. los modelos son quebradizos; algunas partes requieren soportes	Es el equipo Más caro. complejidad; tamaño del equipo	Tolerancias del 5%; el proceso es más nuevo; Salvo el PVC, todas las piezas tienen un aspecto laminado	Deformación en las láminas	Apariencia granulada

Fuente: ALONSO RODRÍGUEZ, JOSÉ ANTONIO. Sistemas de prototipado rápido. [En línea]. http://webs.uvigo.es/disenoindustrial/docs/protorapid.pdf. [Citado el 11 de Agosto de 2011]. p. 8.

3.1.4 Control Numérico Por Computador. Este sistema se usa para el control de máquinas – herramienta mediante una serie de comandos, “permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico, normalmente una herramienta que está montada en una máquina. Esto quiere decir que mediante un software y

un conjunto de órdenes, controlaremos las coordenadas de posición de un punto (la herramienta) respecto a un origen (0,0,0 de máquina), o sea, una especie de GPS pero aplicado a la mecanización, y muchísimo más preciso"[3].

En el proyecto se utiliza este tipo de control, ya que una máquina-herramienta opera bajo comandos programados, en este caso un extrusor de plástico debe seguir unas coordenadas en el plano en un orden determinado. Se utiliza el control numérico por computador para fabricar un objeto mediante la conformación con plástico fundido capa a capa siguiendo puntos en el espacio con coordenadas en (X,Y,Z), estas coordenadas están referidas a la punta de la herramienta (extrusor). Este control permite obtener objetos diseñados con medidas previamente establecidas, así como también permite la repetibilidad de objetos con características iguales.

3.1.5 Archivo STL. Los sistemas de prototipado rápido surgen con el proceso de Estereolitografía de 3D Systems y "Los archivos STL (o esterolitos) provienen del formato que leían estas primeras máquinas. Actualmente es el tipo de archivo estándar utilizado por todos los sistemas de prototipado rápido. De hecho es un archivo frecuente de conversión intermedia entre los distintos programas CAD. Los archivos STL pueden crearse a partir de dos clases de datos: Nube de puntos o Modelo CAD (superficies o sólidos)"[4].

Los archivos (.STL) guardan información sobre objetos en 3D en forma de triángulos, esta clase de archivos son utilizados principalmente en la creación de prototipos físicos a partir de diseños realizados en un ordenador. El número de triángulos que se generan dependen básicamente del tamaño y de la forma del objeto, entre mas triángulos se generen en un diseño, este tiende a ser más complejo, lo cual requiere mayor tiempo en el análisis de la información y por consiguiente para la fabricación. Una vez se diseña el objeto, la mayoría de los programas utilizados para este fin permiten exportar este tipo de archivos, se puede hacerlo en forma BINARIA o ASCII.

Además se tiene que un archivo STL, "es una aproximación mediante mallas poliédricas, a la geometría de una superficie 3D. La superficie es facetada en una serie de pequeños triángulos (faceta o cara). Cada faceta viene determinada por una dirección perpendicular (la normal) y los tres vértices del triangulo"[5].

---

[3]COSMOCAX. Que es el cnc. [en línea]. http://cadcamcae.wordpress.com/2007/06/14/el-control-numerico-por-computadora-el-cnc/. [Citado el 15 de Octubre de 2011]

[4]INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. Taller de soluciones. [En línea] http://tallerdesoluciones.blogs.inti.gob.ar/2009/10/22/%C2%BFque-es-un-archivo-stl/ [Citado el 23 de Octubre de 2011]

[5]PLAN DE CONSOLIDACIÓN Y COMPETITIVIDAD DE LA PYME. Requisitos de uso de tecnologías de fabricación rápida en el sector de plástico. [en línea]. http://www.aserm.net/files/2009/11/Requisitos-de-uso-de-tecnolog%C3%ADas-de-fabricaci%C3%B3n-r%C3%A1pi.pdf [Citado el 14 de septiembre de 201]. p.4.

Para que un objeto representado mediante un archivo .STL sea posible modelarlo, es necesario que los triángulos que lo conforman encajen perfectamente entre ellos, sin dejar espacios vacios o conocidos como (huecos), ya que el software de análisis no va a entender esta información y se ocasionaran áreas en las cuales no se va a realizar la deposición de material ya sea sobre los límites o sobre el relleno del objeto.

Una característica sobresaliente en la mayoría de los programas de modelado 3D es que "rara vez trabajan sobre archivos STL y, habitualmente, es necesario hacer una exportación de los modelos a éste formato antes de comenzar la impresión 3D. Dadas las diferencias entre el formato STL y los formatos 3D de origen, las conversiones suelen dejar fallos estructurales en el modelo. Por lo tanto, los archivos STL deben ser comprobados usando un software especial antes de utilizarse para fabricar un modelo"[6].

3.1.6 Problemas De Los Archivos STL. El hecho de tener un archivo en formato STL, no garantiza que el objeto diseñado pueda ser materializado, debido a que se puede presentar una serie de inconvenientes, por tanto el diseño debe obedecer a una serie de reglas o se debe corregir errores que se presentan en el diseño.

Los errores pueden ser, no obedecer la regla de vértice a vértice, encontrar en el diseño normales invertidas las cuales pueden generar huecos no deseados, dobles caras, bordes múltiples y caras degeneradas, estos errores se describen en el anexo A en forma detallada.

En el Software desarrollado en este proyecto tiene como parámetro fundamental que este tipo de inconvenientes no se van a presentar en el diseño realizado de un objeto; por lo tanto, antes de enviar a que el objeto sea materializado por la máquina se debe tener la plena seguridad de que estos errores no se van a presentar. Ya que de lo contrario el objeto presentará áreas sin plástico, ocasionando que la pieza tenga deficiencias en cuanto a forma y resistencia mecánica.

3.1.7 Programa de diseño CAD 3D (Blender). La mayoría de los programas de diseño 3D permiten exportar archivos STL, pero el presente trabajo se enfoca en la utilización de archivos STL exportados desde BLENDER que es un programa informático de licencia libre el cual permite especialmente modelar y crear gráficos tridimensionales.

Sobre su creación y progreso se tiene que "Originalmente, el programa fue desarrollado como una aplicación propia por el estudio de animación holandés NeoGeo; el principal autor, Ton Roosendaal, fundó la empresa "Not a Number

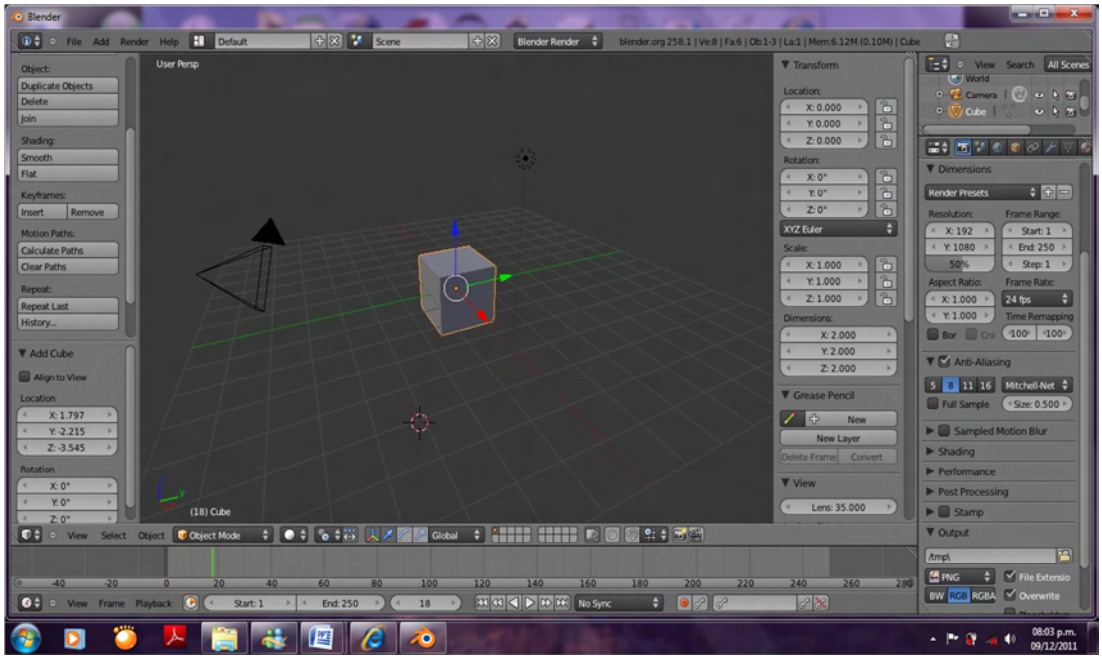
6 CADDY NEWS.El formato del fichero stl. [en línea]. http://www.caddyspain.com/noticias/stl.htm [citado el 21 de julio]

Technologies" (NaN) en junio de 1998 para desarrollar y distribuir el programa. En 1988, Ton Roosendaalco fundó el estudio de animación Holandés NeoGeo. NeoGeo rápidamente se convirtió en el estudio más grande de animación 3D en Holanda y en una de las más destacadas casas de animación en Europa"[7].

Este programa permite crear diseños diversos tanto en 2D como en 3D, posee funcionalidades importantes en el proceso de modelado que es la parte a tener en cuenta en este trabajo, además posee funcionalidades de textura, animación y video pos-procesado. Blender es una de las aplicaciones gráficas en 3D de fuente abierta más populares alrededor del mundo, es compatible con Windows, Linux, Mac OS X, entre otros, por lo que es muy atractivo para los usuarios. Permite exportar archivos STL en formato ASCII, información necesaria para lograr los objetivos planteados.

En la figura 2, se presenta la interface de inicio de BLENDER, donde se muestra el área de trabajo y las diferentes opciones para la creación de los modelos.

Figura 2. Pantallazo de inicio de BLENDER



3.1.8 Plástico ABS. Existen numerosos plásticos los cuales poseen propiedades que permiten que sean utilizados en procesos de extrusión, dentro del marco del

[7]WIKIPEDIA. Blender. [en línea]. http://es.wikipedia.org/wiki/Blender. [Citado el 21 de octubre de 2011]

presente trabajo se utiliza el plástico “Acrilonitrilo Butadieno Estireno” o (ABS). Es un termoplástico de ingeniería, el cual ofrece alta resistencia a impacto mecánico. Dadas las propiedades que posee se le puede realizar procesos de lijado, y fácilmente se puede recubrir con capas metálicas o de pintura, aspectos que pueden ser de uso frecuente en la obtención de objetos en la impresora 3D y especialmente para darle un determinado acabado a las piezas obtenidas.

Sobre el plástico ABS se conoce que “es una mezcla de un copolímero vítreo (estireno- acrilonitrilo) y un compuesto elástico principalmente el polímero de butadieno”[8].

El plástico ABS posee una gran variedad de propiedades, que resultan de la combinación de las propiedades de cada uno de sus componentes, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado.

Tabla 2. Propiedades del ABS

CARACTERISTICAS PROPORCIONADAS		
ACRILONITRILO	BUTADIENO	ESTIRENO
Resistencia térmica	Ductilidad a baja temperatura	Facilidad de procesado (fluidez)
Resistencia química	Resistencia al impacto	Brillo
Resistencia a la fatiga	Resistencia a la fusión	Dureza y rigidez
Dureza y rigidez		

Fuente: TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. abs. [En línea]. http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html. [Citado el 10 de octubre de 2011]

El plástico ABS que se utiliza es en forma de filamento de 3mm de diámetro, el cual entra por la parte superior del extrusor, este es calentado hasta una temperatura de 220℃ en el momento de ser extruido. Puede encontrarse en diferentes colores para este tipo de aplicación. A continuación se muestra la forma de un rollo de ABS que se utiliza en este proyecto.

[8]TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. abs. [En línea]. http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html. [Citado el 10 de octubre de 2011]

Figura 3. Rollo de ABS

3.1.9 Lenguaje De Programación. Entre otras se puede definir como, “un lenguaje que puede ser utilizado para controlar el comportamiento de una máquina, particularmente una computadora. Consiste en un conjunto de reglas sintácticas y semánticas que definen su estructura y el significado de sus elementos, respectivamente”[9].

El lenguaje de programación utilizado dentro del marco del proyecto, es java, el cual permite desarrollar el software que envía señales de control para que las estructuras móviles de la máquina se desplacen una cierta distancia con el fin de alcanzar un punto determinado. Estas señales de control están determinadas por unas coordenadas tomadas de un diseño realizado en un programa CAD.

3.1.10 Dibujo de Líneas. El dibujo de líneas resulta crucial para el desarrollo del proyecto, para una ubicación dentro del contexto se tiene que “Un segmento de línea recta dentro de una escena está definido por las coordenadas de los dos extremos del segmento. Para mostrar la línea en un monitor digital, el sistema gráfico debe primero proyectar las coordenadas de los extremos para obtener coordenadas de pantalla de valor entero y determinar las posiciones de píxel más próximas a lo largo de la línea que conecta los dos extremos”[10].

Básicamente los diferentes algoritmos usados para la obtención de líneas utilizan la siguiente ecuación,

[9]SAAVEDRA, JORGE. Lenguajes de programación. [En línea]. http://jorgesaavedra.wordpress.com/2007/05/05/lenguajes-de-programacion/. [Citado el 16 de julio de 2011]

[10]DONALD HKARN; M. PAULINE BAKF.R. Gráficos por computadora con opengl, Madrid: Pearson Educación S.A. 2006. p. 92.

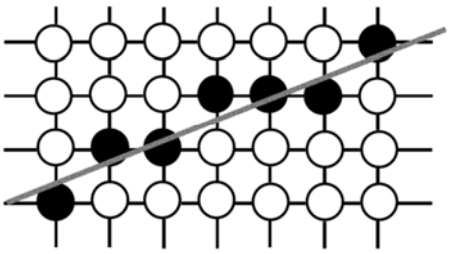
(1)

Con esta ecuación se puede seguir una ruta que va desde el punto ( ) hasta el punto ( ), de esta forma el algoritmo varia x desde un punto inicial con coordenada hasta un punto final con coordenada en incrementos de una unidad.

Una vez se tiene establecido los diferentes puntos con sus respectivas coordenadas es necesario que las primitivas (gráficas matemáticas), se aproximen en términos del plano cartesiano. Para este proceso existen varios algoritmos los cuales obtienen pixeles de diferentes colores. En el caso de la impresión en 3D estos algoritmos se usaran como base para la generación de pasos en el plano.

3.1.11 Discretización de Líneas. Con el fin de obtener movimientos adecuados para el trazo de líneas con las características de la estructura física de la máquina es necesario realizar el proceso de discretización, en este orden de ideas "Un algoritmo de discretización de líneas calcula las coordenadas de los pixeles que están sobre o cerca de una línea ideal infinitamente delgada sobrepuesta a una trama bidimensional"[11].

Figura 4. Relación de pixeles con una línea



Fuente: VIDAL VALENZUELA, Javier. Algoritmos gráficos en 2 dimensiones [En línea] http://asignaturas.inf.udec.cl/cgraf/public_html/algoritmos2d.pdf, taller de computación gráfica.[Citado el 29 de noviembre de 2011]. p.1.

Cuando se hace el cálculo de las coordenadas de los puntos que están entre los extremos, se obtienen valores que no son enteros por lo cual se requiere de este tipo de consideraciones, así puede ser posible la representación de una línea en una matriz de pixeles o como para el caso del prototipado en el cual se necesita un desplazamiento de una herramienta física es necesario la generación de pasos para seguir una ruta o una línea determinada.

3.1.12 Sistemas de Coordenadas de Referencia. Para determinas la posición de un punto en un espacio (2D o 3D) y más aun "para describir una imagen, primero

[11]VIDAL VALENZUELA, Javier. Algoritmos gráficos en 2 dimensiones [En línea] http://asignaturas.inf.udec.cl/cgraf/public_html/algoritmos2d.pdf, taller de computación gráfica.[Citado el 29 de noviembre de 2011]. p.1.

es necesario seleccionar un sistema de coordenadas cartesianas adecuado, denominado sistema de coordenadas de referencia del mundo. Después se describen los objetos de la imagen proporcionando sus especificaciones geométricas en términos de la posición dentro de las coordenadas del mundo"[12].

Los sistemas de referencia pueden estar dados o no en coordenadas enteras, por ejemplo para el caso de una matriz de pixeles las coordenadas son enteras, ya que cada pixel ocupa un área determinada y constante dentro de un arreglo, además las coordenadas representan la posición en la cual se encuentra un pixel. A pesar de que se use un sistema de coordenadas absolutas, se puede encontrar especificaciones de coordenadas relativas esto se puede presentar cuando se especifique una posición de coordenadas en forma de un desplazamiento a partir de la última posición a la que se hubiera hecho referencia.

En el prototipado rápido se utilizan una serie de información la cual llega en formas de coordenadas las cuales son generadas por un programa de diseño 3D, estos programas entregan puntos los cuales tienen valores en X, Y y Z, por lo cual el sistema con el que se debe trabajar en este caso es tridimensional y el sistema de coordenadas será absoluto.

3.1.13 Algoritmo De Trazo De Líneas. Para adecuar las traslaciones en los ejes de la máquina y lograr la construcción de objetos, se tomo como base el algoritmo de Bresenham para desarrollar el software que controla la generación de pasos para seguir líneas y poder trazar las diferentes rutas que componen los objetos.

Este algoritmo utiliza sólo cálculos enteros para determinar los incrementos. Además, el algoritmo de Bresenham para dibujo de líneas puede adaptarse para dibujar círculos y otras líneas.

Es un algoritmo preciso y efectivo en la generación de líneas, además utiliza cálculos incrementales con aritmética entera para encontrar puntos lo más cercanos posibles para seguir una recta.

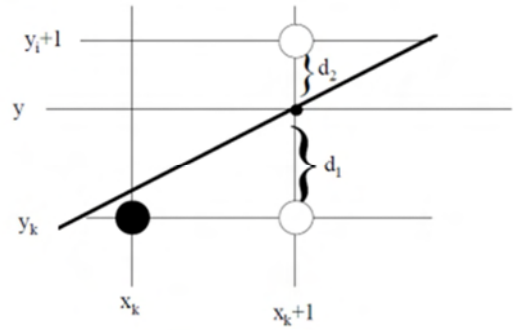
A continuación se detalla las relaciones para desarrollar el algoritmo. Consideremos una línea con pendiente positiva (0 <*m*< 1). En este caso se efectúa un muestreo de X en intervalos unitarios.

Iniciando en el extremo izquierdo en el punto (x_0, y_0) de una línea, se pasa a cada columna sucesiva y se traza el pixel cuyo valor de *y* se aproxima más a la trayectoria de la línea de rastreo. Suponiendo que el primer pixel desplegado es (x_k, y_k), a continuación se necesita decidir cual debe seguir en la columna x_{k+1}. Aquí se presentan dos alternativas (x_{k+1}, y_k), y (x_{k+1}, y_{k+1}).

[12]DONALD HKARN; M. PAULINE BAKF.R.Gráficos por computadora con opengl, Madrid: Pearson Educación S.A. 2006. p. 86.

Analizando el muestreo en la posición designamos la separación de pixeles verticales de la trayectoria de la línea matemática como *d*1 y *d*2. Tal como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Distancia de Separación Bresenham



El valor de la coordenada de (*y)* en la posición de referencia ( ), se puede obtener de la siguiente manera teniendo como base la ecuación (1).

$$y = m\,(\quad) + b \tag{2}$$

Por lo tanto las distancias $d1$ y $d2$están dadas por,

$$d1 = y - \quad = m\,(\quad) + b - \tag{3}$$

$$d2 = (\quad) - y = \quad - m\,(\quad) - b \tag{4}$$

La diferencia entre las distancias es,

$$d1 - d2 = 2m\,(\quad) - 2 \quad + 2\,b - 1 \tag{5}$$

Haciendo igual a un parámetro de decisión, para cualquier paso k, y redondeando la ecuación anterior, de modo que implique solo cálculos de enteros, y asumiendo que $m = \Delta y / \Delta x$, donde Δx y Δy son las separaciones horizontal y vertical de las posiciones de los extremos de la línea, se tiene que,

$$\begin{aligned} = \Delta x\,(d1 - d2) &= \Delta x\,(2\,(\Delta y / \Delta x)\,(\quad) - 2 \quad + 2\,b - 1) \\ &= 2\,\Delta y\,xk \quad - 2\,\Delta x \quad + 2\,\Delta y + 2\,b\,\Delta x - \Delta x \\ &= 2\,\Delta y \quad - 2\,\Delta x \quad + c \end{aligned} \tag{6}$$

Se tiene que el signo de es el mismo que el de $d1 - d2$, puesto que $\Delta x > 0$ en este ejemplo, donde $c = 2\,\Delta y + 2\,b\,\Delta x - \Delta x$, que es independiente del pixel.

Si $d1 < d2$ se tiene que (y_k) está más cerca de la trayectoria de la línea que (y_{k+1}), entonces $p_k$es negativo. En ese caso, se traza el pixel inferior; de otro modo, se traza el pixel superior.

Del mismo modo si se evalúa en el paso $k + 1$,

$$p_{k+1} = 2\,\Delta y(x_{k+1}) - 2\,\Delta x\,(y_{k+1}) + c \tag{7}$$

Haciendo una resta del parámetro inmediatamente anterior se tiene,

$$p_{k+1} - p_k = 2\,\Delta y\,(x_{k+1} - x_k) - 2\,\Delta x(y_{k+1} - y_k)$$

Donde $x_{k+1} = x\,k + 1$, de manera que

$$p_{k+1} = p_k + 2\,\Delta y - 2\,\Delta x(y_{k+1} - y_k) \tag{8}$$

Donde el término $(y_{k+1} - y_k)$ es 0 o 1, dependiendo del signo del parámetro p. A continuación se describe en forma más detallada como se hace el cálculo de parámetros de decisión, se realiza en cada posición entera de x empezando en este caso en el extremo izquierdo de las coordenadas de la línea. Por lo tanto el primer parámetro p_0 se evalúa a partir de la ecuación (2) en la posición del pixel inicial (x_0, y_0), sustituyendo

En este punto se puede determinar los valores para,

$$\mathrm{b} = y_0 - m\,x_0$$
$$m = \Delta y / \Delta x.$$

De esta manera se puede calcular,

$$p_0 = \Delta x\,(2\,\Delta y / \Delta x(x_0 + 1) - 2\,y_0 + 2\,(y_0 - (\Delta y / \Delta x)\,x_0) - 1)$$
$$= 2\,\Delta y\,x_0 + 2\,\Delta y - 2\,\Delta x\,y_0 + 2\,\Delta x\,y_0 - 2\,\Delta y\,x_0 - \Delta x$$

Donde se obtiene la siguiente ecuación,

$$p_0 = 2\,\Delta y - \Delta x$$

A pesar de que en el ejemplo anterior se trata solamente rectas con pendientes positivas ($0 < m < 1$), el algoritmo de Bresenham puede ser utilizado para líneas con una pendiente arbitraria al considerar la simetría entre los diversos octantes y cuadrantes del plano xy.

Para una línea con una pendiente *m* > 1, intercambiamos las funciones de las direcciones de x y y, o sea, se tabula a lo largo de y en pasos unitarios y se calcula los valores sucesivos de x que se aproximan mas a la trayectoria de la línea. Como se puede observar este algoritmo usa aritmética entera por lo cual puede ser de gran utilidad en la generación de pasos que controlan los movimientos en los ejes de la máquina herramienta que se trata en este proyecto.

3.1.14 Áreas de Relleno. Para determinar un área de relleno, primero se necesita identificar los bordes que la limitan, en este orden de ideas y desde el punto de vista matemático, "un polígono se define como una figura plana especificada mediante un Conjunto de tres o más puntos, denominados vértices, que se conectan en secuencia mediante segmentos lineales, denominados bordes, o aristas del polígono.[13]"

Con la información suministrada por el programa de diseño, se forma polígonos donde todos sus vértices deben estar en el mismo plano. Cada nivel está determinado por un área la cual a su vez está determinada por una figura plana con un contorno de tipo poli-línea cerrado, el área debe ser rellenada con plástico capa a capa, hasta obtener el objeto deseado.

3.1.15 Algoritmos de Relleno. Una vez se tiene establecida un área cerrada cuyos límites están determinados por líneas primitivas, el siguiente paso es rellenar dicha área ya sea con un color determinado para el caso de matrices de pixeles o con material para el caso del prototipado rápido. Este tipo de algoritmos sirven de base para la realización del software de relleno que para el caso de la impresión 3D hace referencia a la ubicación de diferentes puntos dentro de un área en la cual debe ser depositado plástico.

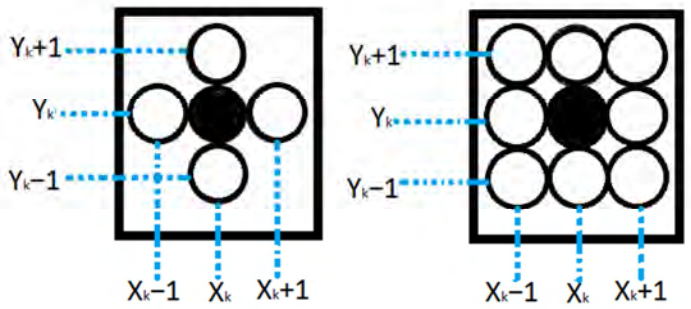
A continuación se tratan dos algoritmos de relleno de forma más detallada.

- Relleno por inundación. En este algoritmo a partir de un punto en el interior de las líneas que definen un objeto, se determina el área formada por elementos contiguos en una matriz,en este caso se va expandiendo recursivamente el área formada por los pixeles hasta alcanzar su borde. Se parte de un punto cualquiera (x,y), el algoritmo va haciendo un test de los pixeles vecinos y determina si estos pertenecen a las fronteras, si no hacen parte de ella se pinta el pixel con un color. Este algoritmo es usado para cualquier tipo de curvas y no solo para polígonos definidos.

Se pueden presentar dos opciones para el relleno de acuerdo a los pixeles vecinos, bien sea definiendo 4 u 8, de la siguiente manera,

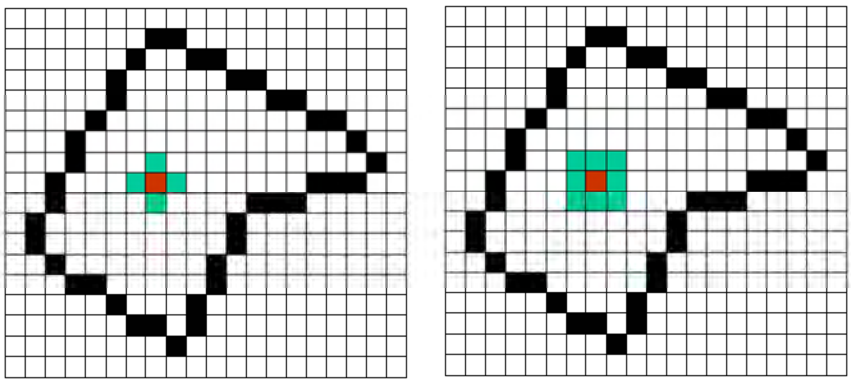
[13]DONALD HKARN; M. PAULINE BAKF.R.Gráficos por computadora con opengl, Madrid: Pearson Educación S.A. 2006. p.128.

Figura 6. Opciones de Relleno. a) Cuatro vecinos, b) Ocho vecinos



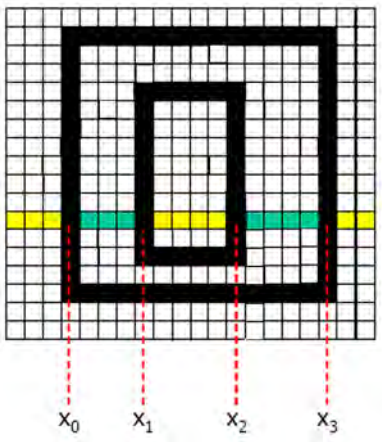
Dependiendo de qué esquema sea el seleccionado, el algoritmo tendrá un determinado comportamiento, esto lo establece las necesidades del programador o usuario. Este algoritmo presenta una deficiencia relativa ya que se necesita mucha memoria y puede causar problemas para áreas extensas, en las cuales hay desbordamiento de pila. Ya que se necesita comparar y guardar muchas posiciones.

Figura 7. Relleno por Inundación



➢ Relleno scan-line. Fila a fila se traza líneas entre dos puntos que definen el área, por lo tanto el primer paso es determinar las intersecciones. Cada vez que la línea de escaneado cruce un polígono se encuentra un punto de intersección. Una vez identificadas la intersecciones éstas se ordenan y se rellenan en pares.El área más simple para rellenar es un polígono, ya que cada punto de intersección de la línea con el límite del polígono se obtiene mediante la resolución de un sistema de dos ecuaciones lineales, donde la ecuación de la línea de barrido es una constante.

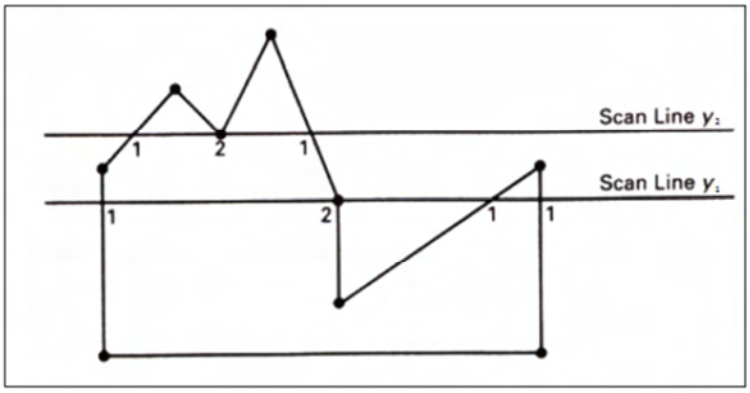
Figura 8. Línea de Barrido con cruces de polígono



Según la figura 8, el área a rellenar está comprendida por dos rangos determinados por (a) y (a) sobre el mismo valor en el eje (y).

Sin embargo, este algoritmo de relleno presenta problemas cada vez que una línea de barrido pasa a través de un vértice, esto puede producir un número impar de intersecciones con la frontera para una línea de barrido, lo cual no permite identificar de manera correcta los rangos a rellenar. Este es el primer inconveniente que el algoritmo debe superar. En la figura 9 se muestra esta situación.

Figura 9. Intersecciones con vértices

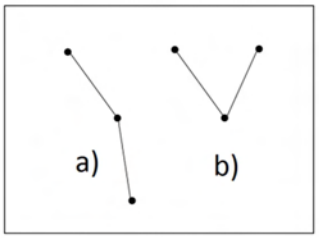


Una solución es contar estos vértices como una sola intersección, en ocasiones esto funciona pero en otras no, analizando la gráfica 9, se puede ver que en el caso de la línea de rastreo (inferior) el problema desaparece, pero en la línea de rastreo el error persiste.

Por lo anterior se debe hacer una diferenciación adicional, la cual consiste en definir la diferencia topológica entre la línea de barrido y teniendo en cuenta las posiciones relativas de las aristas.

Por ejemplo en las dos aristas que comparte el vértice de intersección están en lados opuestos a la línea de barrido, pero en el caso de la línea las dos aristas de intersección están sobre la línea de barrido. De esta manera se puede determinar que, un vértice que tiene aristas contiguas en lados opuestos de una línea de barrido de intersección se debe contar como un único punto de intersección con la frontera ( ).

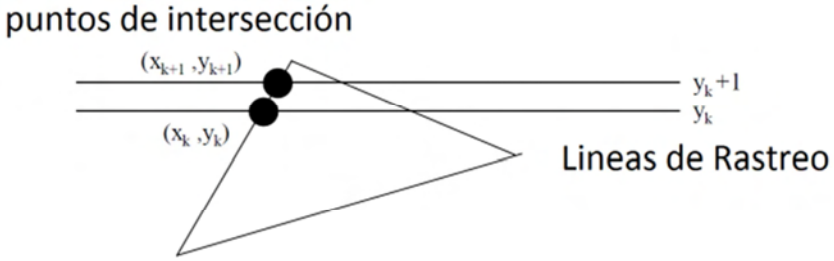
Figura 10. Número de puntos de Intersección. a) Un punto de Intersección b) dos puntos de intersección.



Cuando se presenta una intersección tal como se muestra en la gráfica a) de la figura 10, se cuenta como un solo punto de intersección. Y en el caso señalado en b) se cuenta como dos puntos de intersección.

El cálculo de coordenadas para establecer los puntos de relleno, se basa en incrementos a lo largo de los ejes. La pendiente que se presenta en una arista es constante y puede calcularse en función de las coordenadas de intersección.

Figura 11. Incrementos en los ejes



$$m = (\quad - \quad)/ (\quad - \quad) \tag{9}$$

La diferencia entre las líneas de rastreo está dada por,

$$- \quad = 1 \tag{10}$$

El valor de la intersección de x_{k+1} en la línea de rastreo superior puede determinarse a partir del valor x_k de la Intersección de *X* en la línea de rastreo anterior como sigue,

$$x_{k+1} = x_k + 1/m \quad (11)$$

De esta manera se puede determinar el valor de cada intersección de X, teniendo en cuenta el valor anterior y la inversa de la pendiente. Se debe redondear al entero más próximo.

A continuación se considera líneas con una pendiente *m*>1.

En el punto inicial o extremo (x_{min}, y_{min}) se requiere dibujar un pixel. Según se incrementa *y*, la coordenada de *x* del punto en la línea ideal se incrementara con valores de 1/*m* a lo largo de una arista, donde la pendiente se da con,

$$m = (y_{max} - y_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (12)$$

Ya que se está trabajando con enteros la pendiente es equivalente a,

$$m = \Delta y/\Delta x \quad (13)$$

Δy y Δx son las diferencias entre las coordenadas *x* y *y* del extremo de la arista. Los incrementos de las intersecciones a lo largo de x están dados por,

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x / \Delta y \quad (14)$$

Se puede ir incrementando el valor de Δx por cada línea de escaneo, encontrando de esta manera las diferentes intersecciones.

3.1.16 Microcontrolador. Entre otras definiciones se tiene que, “Los microcontroladores son computadores digitales integrados en un chip que cuentan con un microprocesador o unidad de procesamiento central (CPU), una memoria para almacenar el programa, una memoria para almacenar datos y puertos de entrada salida”[14].

En presente proyecto se utilizan los PIC, que son una familia de microcontroladores fabricados por Microchip Technology Inc. Su funcionamiento se basa en una serie de instrucciones que son propias de cada una de las series

[14]TORRES TORRITI, Miguel. Tutorial Microcontroladores pic inicialización rápida. [En línea] http://web.ing.puc.cl/~mtorrest/downloads/pic/tutorial_pic.pdf. [Citado el 2 de Octubre de 2011]. p.3.

del PIC, por medio de estas instrucciones es posible realizar operaciones tales como suma, resta, multiplicación, comparaciones, saltos, etc [3]

3.1.17 Correas de Sincronización. Con el objeto de llevar el movimiento desde los motores hasta las partes móviles de la máquina se utiliza las correas de sincronización, "estas se crearon en Estados Unidos en 1946 y su función básica es transmitir potencia de manera sincronizada. Actualmente, las correas de sincronización se utilizan en la más variada y diversificada gama de equipamientos, desde un sencillo cortador de césped hasta autos de fórmula 1 y equipamientos militares"[15]

Este elemento se utiliza en la máquina para transmitir el movimiento angular del motor y convertirlo en desplazamiento en los diferentes ejes. La transmisión por correas es de tipo flexible ya que absorbe vibraciones y choques, tienen un buen rendimiento en condiciones adversas de trabajo como humedad, calor, polvo. Ya que estas correas tienen en su diseño dientes, su transmisión es sincronizada lo cual es muy útil, y en algunos casos fundamental.

La relación de transmisión está dada por la expresión,

$$dp1 \cdot n\,1 = dp2 \cdot n\,2 \qquad (15)$$

Donde,

dp1, dp2 = diámetros primitivos de las poleas.
n1, n2 = número de revoluciones de ambas poleas.

Estas correas se agrupan comercialmente en los tipos XL, L, H, XH, y XXH. En seguida se muestra una tabla donde se especifica el valor del paso por cada tipo.

Tabla 3. Pasos de las Correas de Sincronización

Tipo	Paso
XL	5,080 mm (1/5")
L	9,525 mm (3/8")
H	12,700 mm (1/2")
XH	22,225 mm (7/8")
XXH	31,750 mm (1 1/4")

Fuente: REXON. Manual técnico, correas industriales. [En línea] http://www.rexon.com.co/indexmarcasregistradas.html. [Citado el 17 de Julio de 2011]. p.37.
A continuación se muestra la imagen de una correa de sincronización tipo XL

15 REXON. Manual técnico, correas industriales. [En línea] http://www.rexon.com.co/indexmarcasregistradas.html. [Citado el 17 de Julio de 2011]. p.37.

Figura 12. Correa de sincronización XL

3.1.18 Motor Paso a Paso. El motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte pulsos digitales en rotación mecánica, el número de pulsos determina la cantidad de rotación que el motor genera lo que significa que avanza una serie de grados dependiendo de sus entradas de control, la velocidad de rotación es relativa a la frecuencia de dichos pulsos. Los motores paso a pasos, son de mucha utilidad en la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.

Los utilizados en la construcción de la máquina son motores unipolares y tienen 6 cables para su conexión; las señales para activar las entradas son dadas por el microcontrolador.

3.1.19 Piñón. Además de la transmisión de movimiento, los piñones pueden ser usados para aumentar o disminuir la potencia de un sistema, convirtiéndose en un elemento esencial dentro de la industria, "Así como la rueda revolucionó la historia del hombre, el piñón cambió la historia de la máquina-herramienta, mejorando velocidad y potencia, ampliando sus aplicaciones e influyendo en su evolución"[16].

Los dientes de los piñones que se utilizan deben coincidir perfectamente con los de las correas XL, usadas para la transmisión de movimiento.

3.2 MARCO LEGAL

[16]ROJAS, María Cristina. Piñones. Diente por diente y vuelta por vuelta. [En línea]. http://www.metalactual.com/revista/9/pinones.pdf. [4 de Septiembre de 2011]. p.1.

En el desarrollo de este proyecto se utiliza el lenguaje de programación JAVA, por lo cual se tiene en cuenta los términos de su licencia.

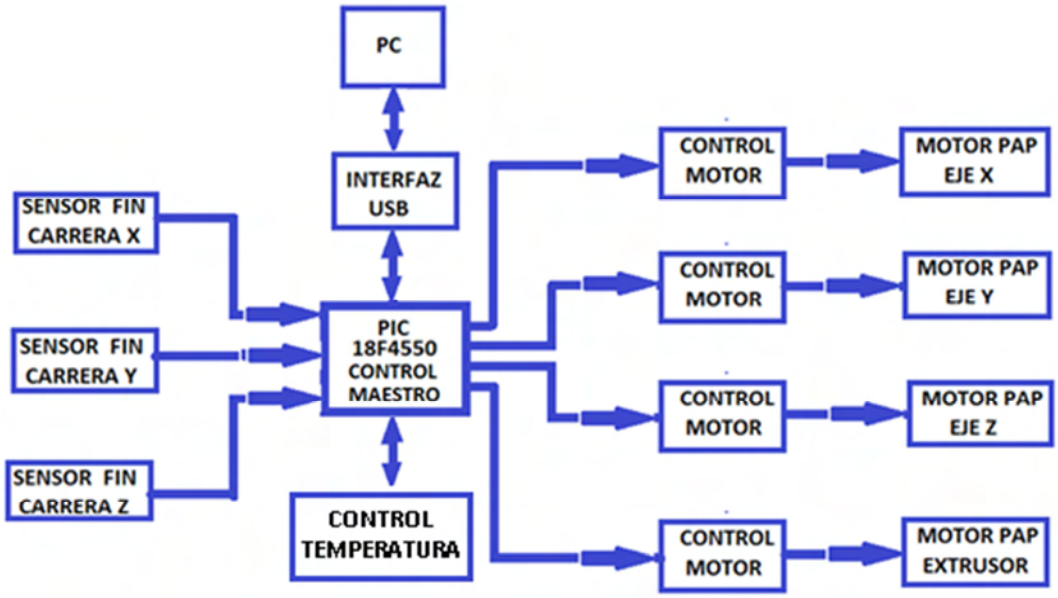
"En esta licencia de código binario, ORACLE AMERICA, INC. Aclara todos los términos que se deben tener en cuenta para elaborar programas en lenguaje java".[17].

[17] ORACLE AMERICA. License. [En línea]. http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/terms/license/index.html. [Citado el 22 de diciembre de 2011]

4. SISTEMA DE CONTROL DE MOVIMIENTO.

Es el sistema encargado de controlar el movimiento de los motores de acuerdo a órdenes recibidas del computador. También envía información al PC cuando las órdenes ya se han llevado a cabo e informa que está listo para la siguiente instrucción. A su vez este sistema está compuesto por una serie de sub-módulos que se describen a continuación de manera detallada.

Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de control



4.1 INTERFAZ USB

La comunicación que existe entre el PC y el circuito de control se realiza mediante protocolo USB ya que éste ofrece una mayor tasa de transferencia, es capaz de alimentar un periférico a 5V/500mA y en la actualidad en gran parte de las computadoras se han eliminado otros puertos.

Para lograr la comunicación se hace uso de un proyecto desarrollado por Gerónimo Isidro Oñativia, "jPicUSB: Clase Java para comunicación USB con PICs usando API de Microchip"[18]. Java no proporciona métodos para acceder a librerías

[18] http://divideandconquer.com.ar/dyq/2009/01/jpicusb-comunicacion-pic-usb-usando-java/

dinámicas (dll) como lo puede ofrecer otro tipo de lenguaje, es por eso que para hacer una comunicación USB con PIC se requiere librerías que faciliten esta tarea.

Se utiliza la clase jPicUSB de java para establecer comunicación entre el microcontrolador y la computadora, utilizando interfaces nativas (JNI), los métodos llaman a funciones específicas de un dll (jpicusb.dll), y esta librería a su vez implementa los métodos de la API de Microchip.

JPicUSB utiliza los siguientes métodos para transmisión y recepción de datos.

4.1.1 Métodos de iniciación de varios. Aquí se carga la librería dinámica y carga valores por defecto.

4.1.2 Métodos generales. Son aquellos que se comportan igual a las funciones proporcionadas por la API USB de Microchip, Lectura y Escritura de datos a un dispositivo USB, apertura de una conexión, etc

4.1.3 Métodos rápidos. Son métodos que agilizan el desarrollo de la transmisión.

4.2 CONTROL MAESTRO

El principal componente de este Modulo es un microcontrolador PIC 18F4550, el cual mediante protocolo de comunicación USB recibe órdenes desde el computador y de acuerdo al dato recibido este actúa para generar señales de control, también envía señales al computador que indican que algún proceso ya fue realizado [3].

El microcontrolador genera señales de control para el manejo de los motores de los diferentes ejes y el sistema extrusor, para cada motor envía señales a 4 transistores los cuales conmutan las cuatro bobinas internas de éstos para generar los pasos.

El microcontrolador detecta las señales proporcionadas por los sensores de fin de carrera de los ejes X, Y y Z, y si es el caso detiene el movimiento de los motores. Se utiliza un cristal externo XT de 20Mhz sobre los pines 13 y 14 del microcontrolador. En la parte de Anexo se muestra el diagrama de flujo del programa.

A continuación se detalla los pines utilizados del microcontrolador, a parte de los obligatorios para el correcto funcionamiento.

Tabla 4. Pines del microcontrolador

DESCRIPCION DE LOS PINES DEL MICROCONTROLADOR				
PIN	USO		PIN	USO
3	L1 MOTOR EXTRUSOR		23	USB
4	L2 MOTOR EXTRUSOR		24	USB
5	L3 MOTOR EXTRUSOR		27	L1 MOTOR X
6	L4 MOTOR EXTRUSOR		28	L2 MOTOR X
8	L1 MOTOR Z		29	L3 MOTOR X
9	L2 MOTOR Z		30	L4 MOTOR X
10	L3 MOTOR Z		33	LED PILOTO
15	L4 MOTOR Z		36	SENSOR X
18	VOLTAJE USB		38	SENSOR Y
19	L1 MOTOR Y		40	SENSOR Z
20	L2 MOTOR Y			
21	L3 MOTOR Y			
22	L4 MOTOR Y			

4.3 CIRCUITO DE POTENCIA CONTROL DE MOTORES PAP. (DRIVER)

El circuito para cada motor PAP está conformado por 4 transistores NPN TIP122 4 diodos (1N4007), 4 resistencias (4k7Ω), este circuito tiene como función activar cada una de las bobinas del motor. El transistor es conmutado dependiendo de los pulsos generados en su base por el microcontrolador, este transistor soporta una corriente de (5 Amperios), suficiente para un buen funcionamiento del motor. Este circuito permite que las órdenes transmitidas desde el PIC tengan la suficiente potencia para activar los motores paso a paso [4].

4.4 MOTORES PASA A PASO.

Los motores usados en el desarrollo del proyecto son unipolares, pero presentan diferentes características de voltaje y corriente [5]. A continuación se muestra en forma detallada las características propias de cada motor y donde son utilizados.

Tabla 5. Características de motores PAP

CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES UTILIZADOS				
LUGAR	NUMERO PASOS	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	VOLTAJE	CORRIENTE
EJE X	200	1.8°	12 V	1.4A
EJE Y	200	1.8°	8 V	0.8A
EJE Z	48	7.5°	12V	0.4A
EXTRUSOR	200	1.8°	5V	1.1 A

4.5 ELEMENTOS DE SENSADO

Se utiliza pulsadores para ser usados como sensores de fin de carrera, los cuales hacen un cambio de estado de una señal cuando son activados. La máquina tiene incorporado 3 sensores, uno para cada eje; son utilizados para determinar un punto inicial dentro del espacio de trabajo, así como también para detectar los límites dentro de los cuales la máquina puede trabajar.

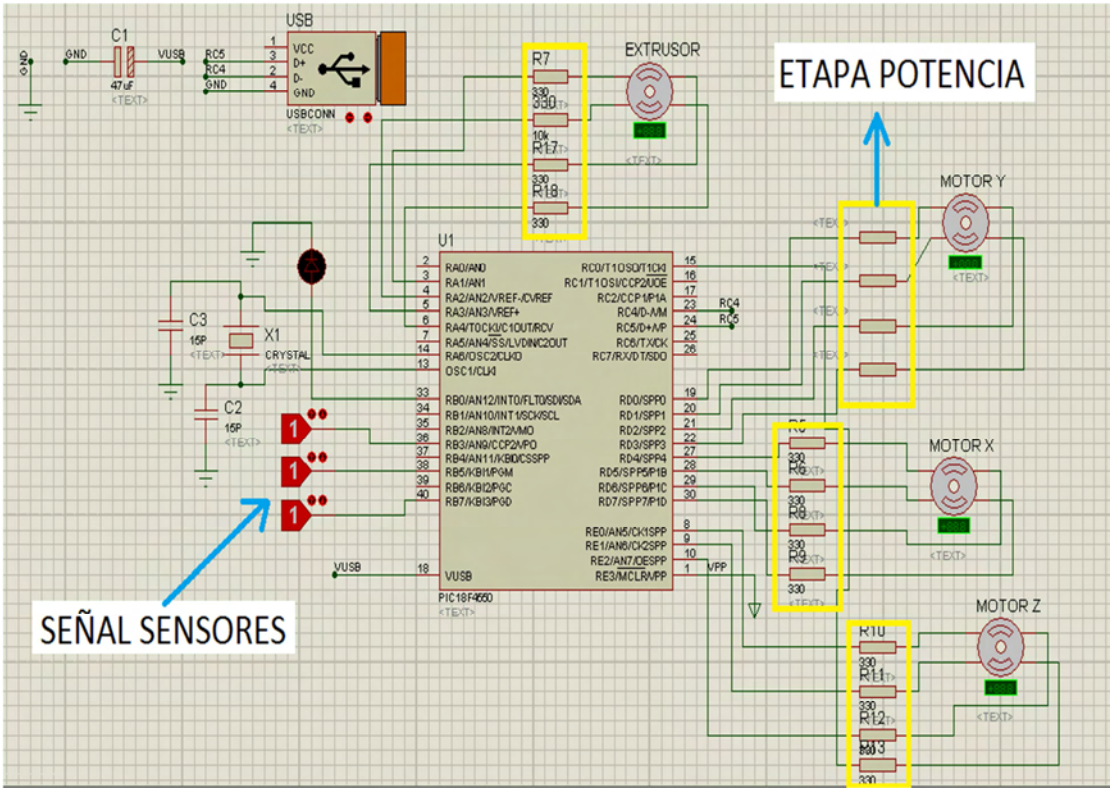
4.6. CONTROL TEMPERATURA

El sistema desarrollado para dicho control se documenta de forma detallada en la sección 5.6.3 perteneciente al capítulo generalidades del sistema.

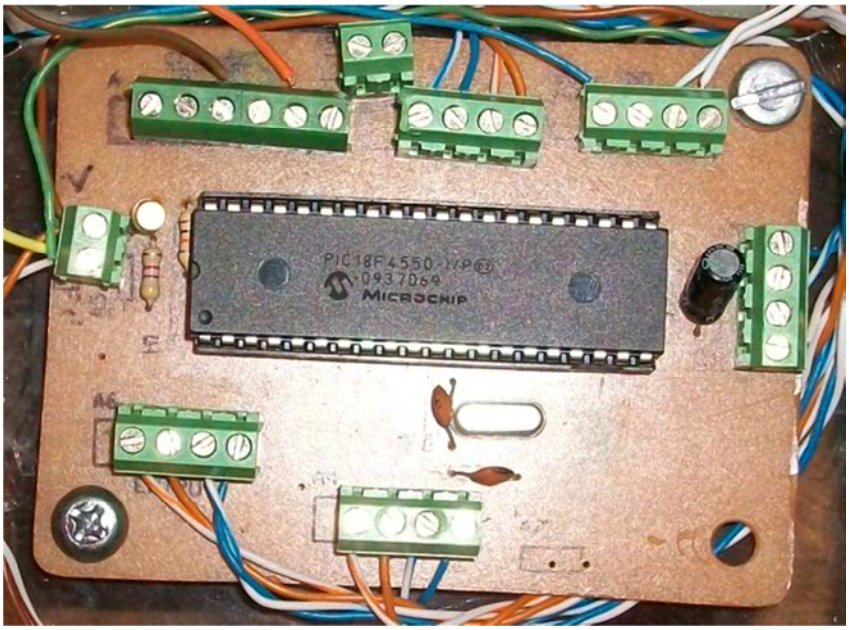
4.6 DIAGRAMA DE CIRCUITO ELECTRONICO

A continuación se presenta el modelo esquemático, y la foto de los circuitos eléctricos montados.

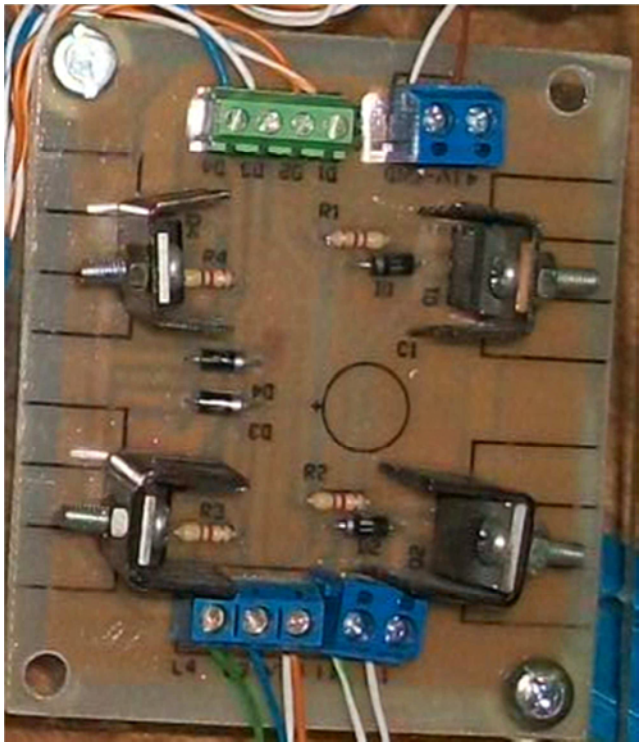
Figura 14. Diagrama de circuito electrónico. a) Esquemático general, b) Circuito Maestro de control, c) Driver de control de los motores.



a)



b)



c)

4.7 LISTA DE COMPONENTES.

A continuación se relaciona los componentes utilizados en cada uno de los circuitos antes relacionados.

Tabla 6. Componentes Circuito Maestro

DESCRIPCION	CANTIDAD
PIC 18F4550	1
CRISTAL 20M	1
CONDENSADOR 15Pf	2
CONDENSADOR 47 µf	1
LED	1
RESISTENCIA 4.7K	1
RESISTENCIA 1 K	1
CONECTOR 4 PINES	5
CONECTOR 2 PINES	2
CONECTOR 6 PINES	1

Tabla 7. Componentes Driver para un motor

DESCRIPCION	CANTIDAD
TIP 122	4
DIODO 1N4007	4
RESISTENCIA 4.7K	4
CONECTOR 4 PINES	1
CONECTOR 2 PINES	1
CONECTOR 5 PINES	1

5. GENERALIDADES DEL SISTEMA

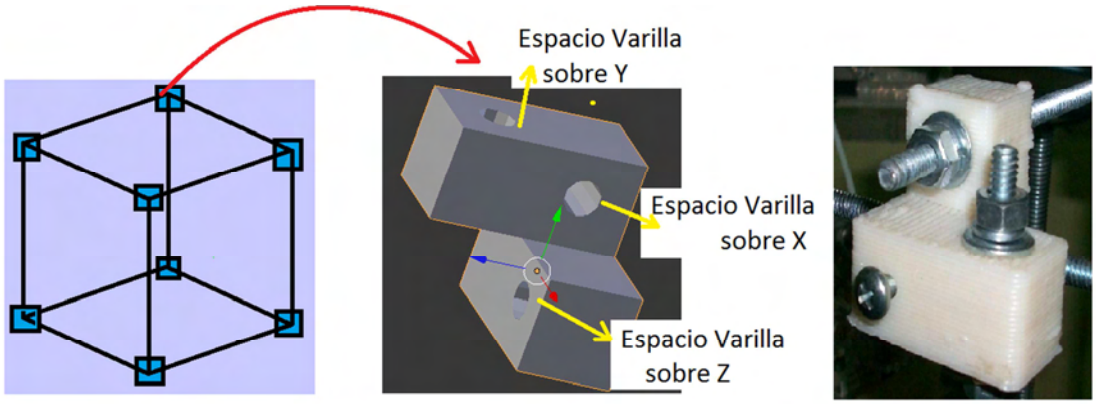
5.1 PIEZAS COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA

Debido a las necesidades del proyecto es fundamental que la estructura física permita realizar movimientos controlados en los ejes X, Y y Z, teniendo como referencia el plano cartesiano.

A continuación se detalla la estructura externa, las partes móviles y la base de la máquina necesarios para la construcción del objeto diseñado. La estructura externa está basada en una forma cúbica, ya que presenta ventajas en su resistencia mecánica y tiene características de buena estabilidad, además presenta una relativa facilidad para su construcción por su simetría.

Dicha estructura está conformada por una serie de piezas plásticas especialmente diseñadas propiamente para la construcción de la máquina, las cuales se describen y muestran a continuación.

Figura 15. Soporte de vértices. a) Estructura Máquina, b) Pieza diseñada en Blender, c) Pieza construida.

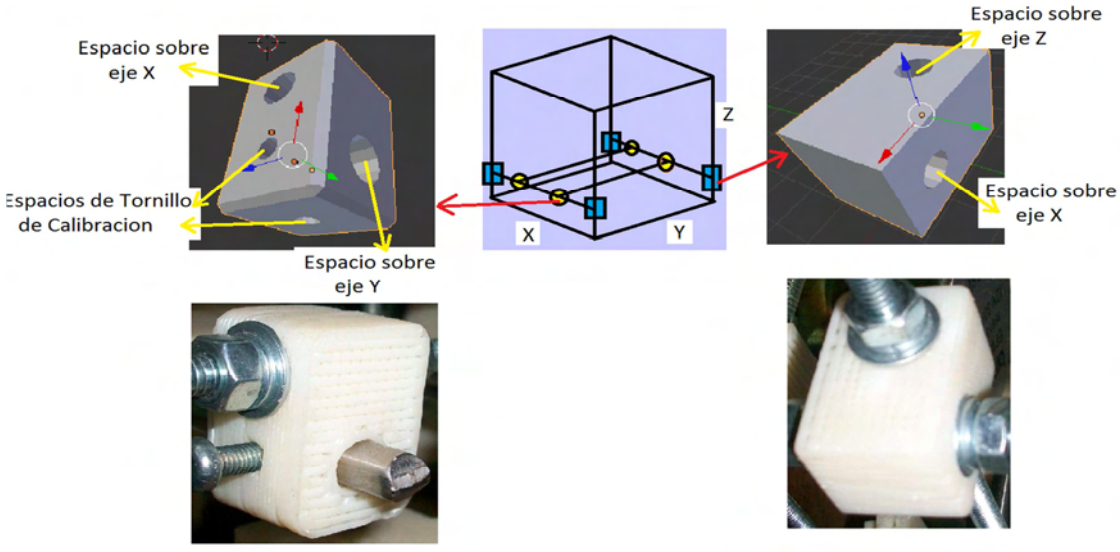


a) b) c)

En la figura 15 se muestra la estructura cúbica externa junto con las piezas que dan soporte en los vértices. Como se puede observar es necesario utilizar 8 piezas para asegurar dichos vértices, en la parte derecha se muestra de forma más detallada esta pieza, la cual tienen orificios redondos sobre los tres ejes, para que se aseguren la varillas roscadas la que da soporte a dicha estructura. El diseño de estas piezas es hecho en BLENDER.

Es necesaria la construcción de unas bases adicionales para sostener las partes móviles de la máquina, a continuación se muestra las piezas utilizadas y el lugar donde se encuentran.

Figura 16. Soporte de parte móvil en eje Y. a) Soporte de Base, b) Pieza sobre la estructura, c) Soporte sobre Z



a) b) c)

Las 4 piezas que están en los recuadros de color azul están sujetas en las varillas verticales, con el fin de soportar 2 varillas horizontales.

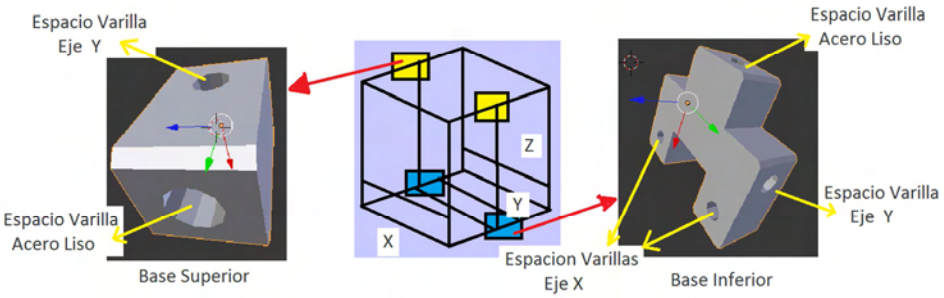
Las 4 piezas en el círculo amarillo sirven de soporte para dos varillas de acero inoxidable sobre las cuales se desplaza la base donde se conforma el objeto. Estas piezas tienen orificios roscados los cuales se usan para calibración de la base.

Figura 17. Base sobre la que se construye el Objeto. a) Estructura Máquina, b) Pieza diseñada en Blender, c) Pieza construida

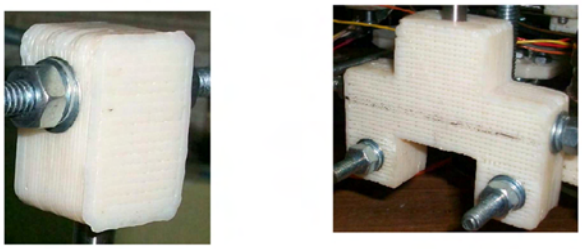
a) b) c)

En la figura 17, se muestra la base, la cual va a tener un movimiento sobre el eje Y, a esta base se sujeta la correa dentada de sincronización mediante la cual se transmite el movimiento desde el motor.

Figura 18. Soporte lateral superior e inferior. a) Diseño base superior, b) Estructura c) Diseño base Inferior, d) Pieza superior construida, e) Pieza inferior construida



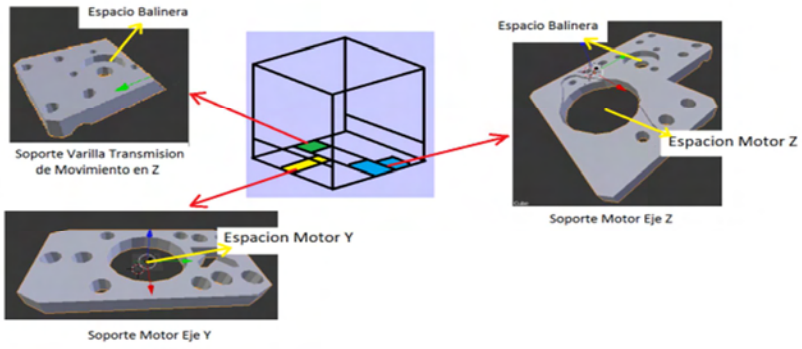
a) b) c)



d) e)

La figura 17 se muestra las Soporte superior e inferior, para dos varillas de acero liso, las cuales son usadas para guiar el movimiento en el eje Z. la pieza de la parte inferior también sirve de soporte para dos varillas roscadas horizontales.

Figura 19. Soporte de motores. a) Diseño realizado en Blender, b) Piezas Construidas.

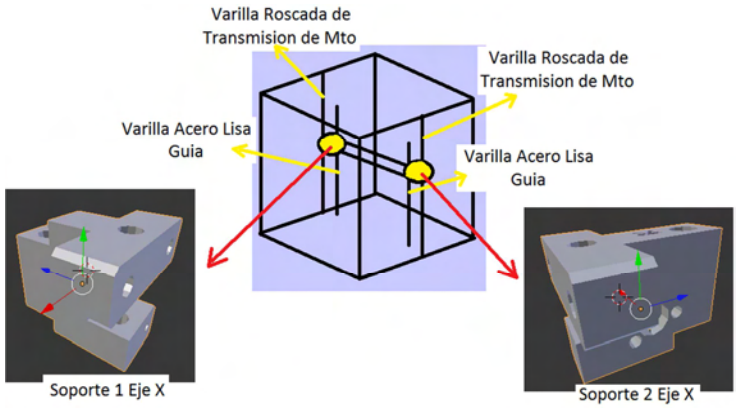


a)

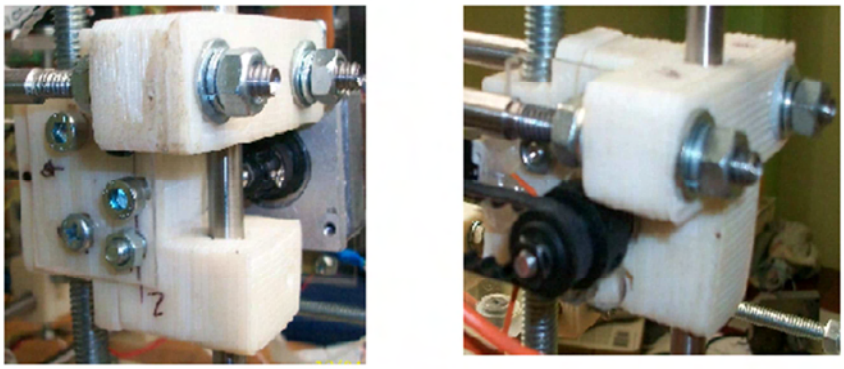
b)

La figura 19 muestra las bases para los motores que generan movimiento en los ejes Y y Z, la base del eje Z también soporta una varilla roscada que a su vez hace la transmisión de movimiento, esta varilla esta soportada mediante una balinera que evita el rozamiento.

Figura 20. Soporte de eje X. a) Diseño en Blender, b) Piezas construidas



a)



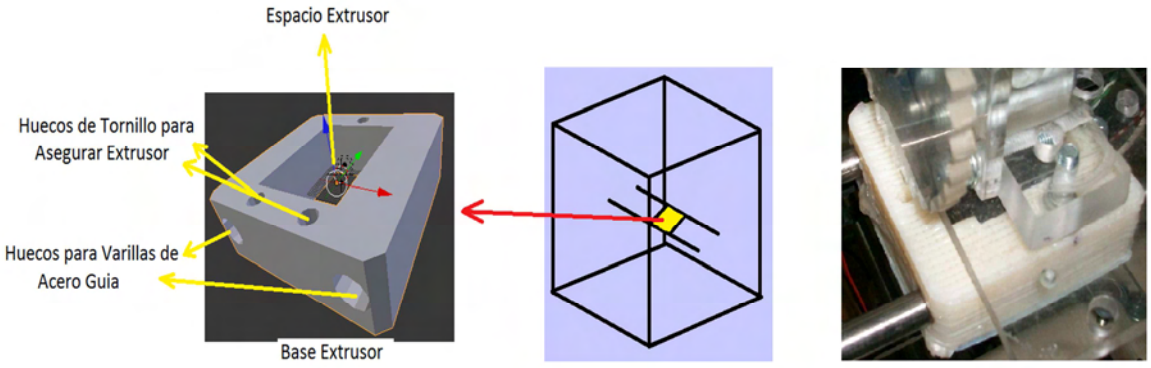
b)

Las piezas que se muestran en la figura 20, se encuentran sobre dos varillas roscadas la cuales hacen tracción y generan transmisión de movimiento en el eje

Z, también están sujetas sobre dos varillas de acero liso lo cual estabiliza el movimiento.

Sobre estas piezas se sujetan dos varillas que soportan el extrusor, el cual tiene movimiento sobre el eje X. sobre la pieza de soporte 1 se instala el motor que genera el movimiento del eje X, y sobre la pieza de soporte 2 se instala una balinera la cual soporta un piñón.

Figura 21. Base de Extrusor. a) Pieza diseñada en Blender, b) Estructura Máquina, c) Pieza construida



a) b) c)

Sobre las varillas de acero liso se instala la base del extrusor, por lo tanto debe tener dos orificios los cuales deben permitir el movimiento sobre ellos, pero los espacios no deben tener mucha área ya que esto genera movimientos inadecuados.

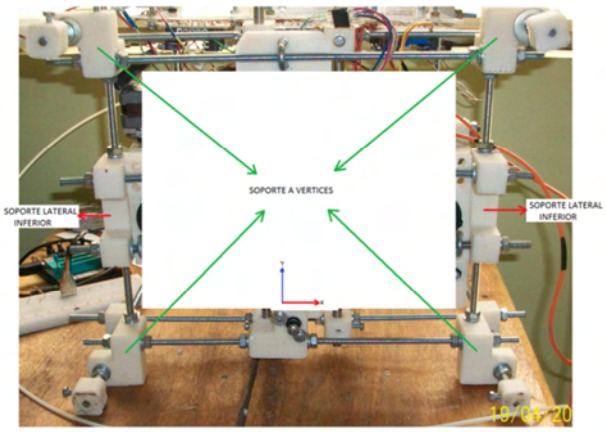
5.2 PROCESO DE ARMADO

La máquina está conformada básicamente por varilla roscada de 1/4 de pulgada de grosor de rosca ordinaria y las piezas antes descritas.

Para realizar el proceso de armado se comienza por la parte inferior de la estructura con 4 piezas que sirven de soporte a vértices (figura 15), y 2 varillas roscadas de 34 cm y 2 de 30 cm. Para asegurar las piezas y la varilla roscada se utiliza turcas y arandelas, elementos que son de fácil consecución en el mercado local.

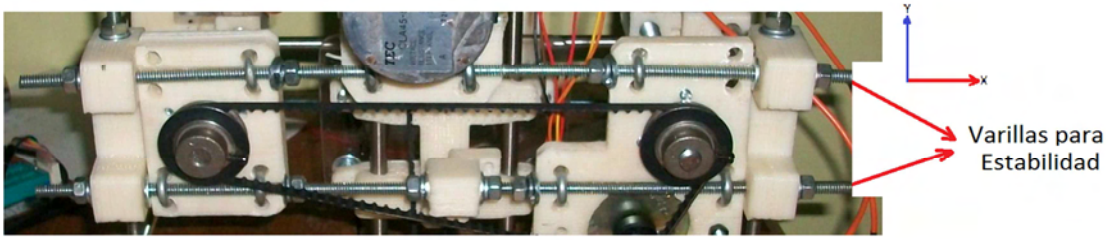
Sobre las varillas paralelas al eje y se deben asegurar los soportes laterales inferiores a cada lado (figura 18), antes de asegurar las varillas a las piezas de los vértices, ya que estas deben estar en el centro sobre dicho eje.

Figura 22. Base Inferior Armada



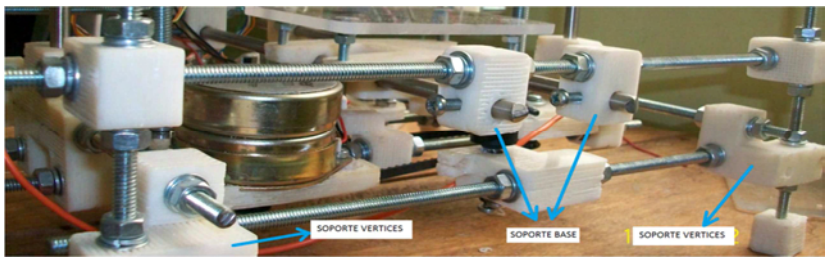
Sobre los dos soportes laterales inferiores (figura 18), se sujetan dos varillas roscadas paralelas al eje X las cuales dan estabilidad a la estructura y sirven para sujetar las bases del motor que genera el movimiento sobre el eje Z y lo elementos de transmisión de movimiento de dicho eje, también se sujeta el motor que genera el movimiento en el eje Y de la máquina.

Figura 23. Soportes Inferiores Paralelos a X



Seguidamente se atornillan 4 varillas roscadas de 36 cm sobre las piezas de soporte de vértices (figura 15), dichas varillas se aseguran sobre el orificio paralelo al eje Z de las piezas. Sobre cada una de estas varillas se sujeta una pieza, la que posteriormente servirá de base para sujetar la base donde se conforma el objeto.

Figura 24. Piezas de Soporte de Base.

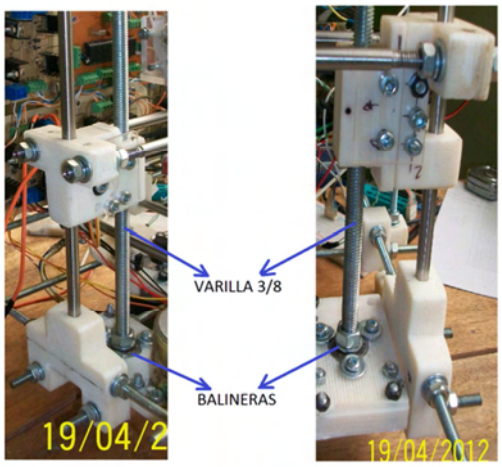


La base (figura 17) está sujeta a dos varillas de acero lizo esta tiene movimiento sobre el eje Y.

Figura 25. Base sobre Varilla lisa.

Luego se arma el sistema que tiene movimiento sobre el eje Z. Se asegura 2 varillas de 3/8 de rosca ordinaria a las piezas descritas en la (figura 19), la unión se realiza a través de una balinera a cada lado.

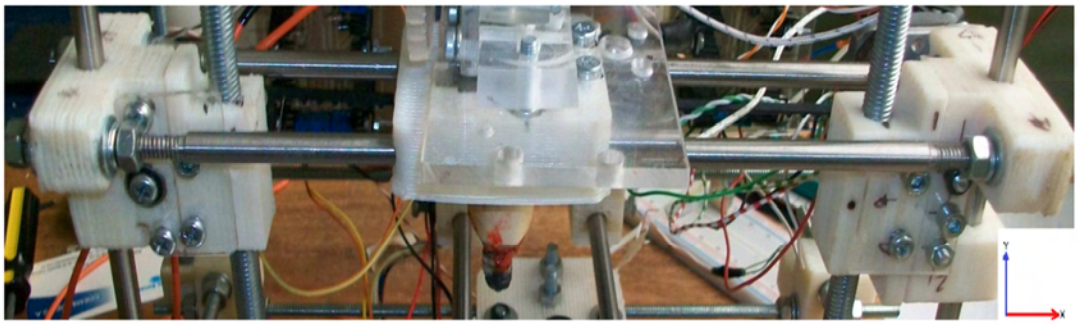
Figura 26. Trasmisión de movimiento en eje Z



Sobre las varillas de 3/8 se aseguran las piezas mostradas en la (figura 20), las cuales transmiten el movimiento desde el motor a través de una correa dentada de sincronización.

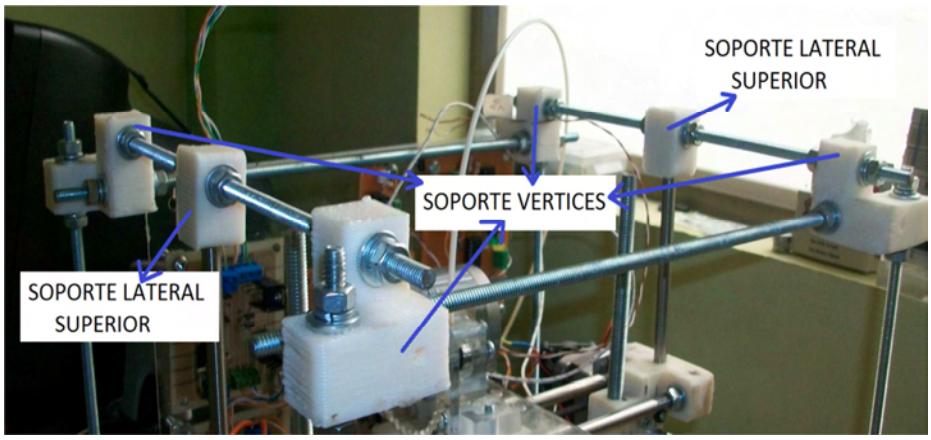
A su vez sobre las piezas de la (figura 20), se sujeta 2 varillas de acero lizo de 7mm de diámetro, estas varillas están paralelas al eje X, y sirve de base para colocar el extrusor. Una de estas piezas soporta el motor que genera el movimiento sobre el eje X, y la otra un piñón que transmite el movimiento.

Figura 27. Soportes para movimiento en X



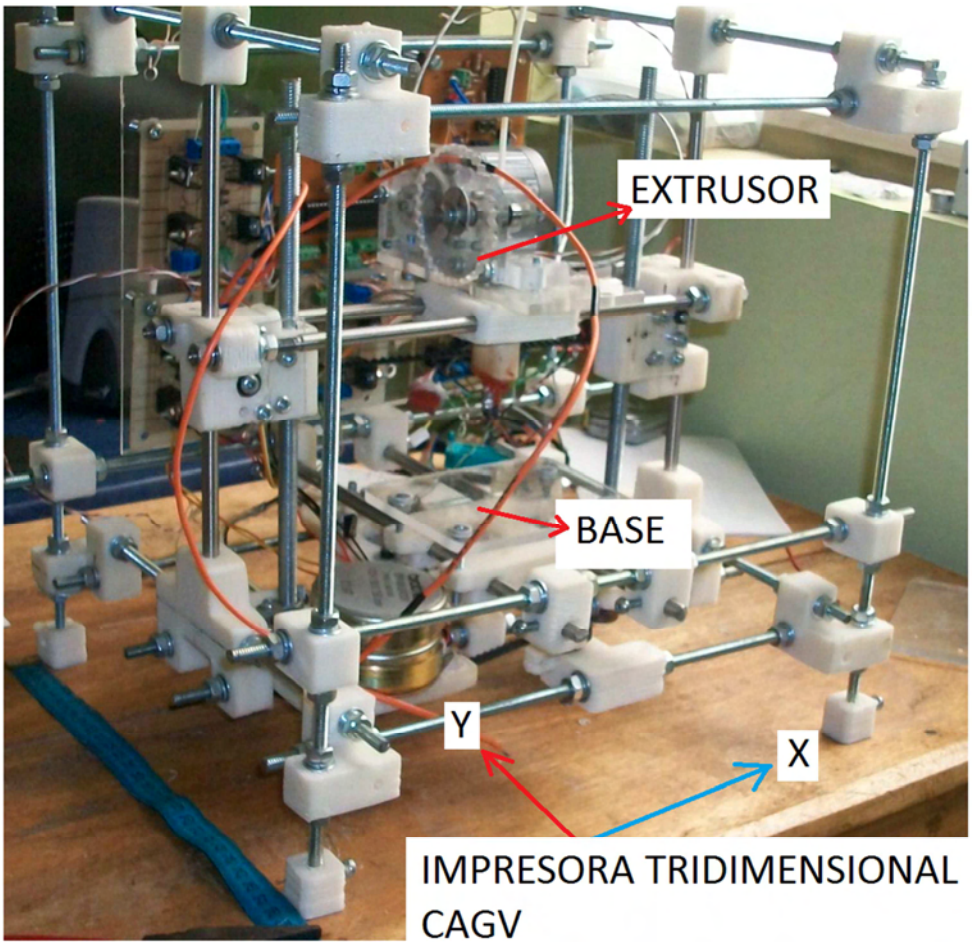
Finalmente se arma la base superior; está conformada por 4 soportes de vértices (figura 15) y 4 varillas roscadas de 1/4 de pulgada de diámetro. Entre las varillas paralelas al eje Y se encuentran las piezas base lateral superior (figura 18).

Figura 28. Base superior.



A continuación se muestra una imagen de la máquina con las piezas antes mencionadas ya instaladas.

Figura 29. Impresora Armada.



Las medidas en la parte externa de la máquina son. Largo 34 cms, ancho 30 cms y alto 36, es espacio suficiente para que las partes móviles alcancen movimientos de 5 cms en los ejes respectivamente.

5.3 MOVIMIENTO EN LA MÁQUINA.

Tomando el punto (0, 0, 0) en el plano, se tiene que es el lugar donde empieza el área de trabajo de la máquina donde se conforma el objeto diseñado en un programa modelador (CAD), con este punto de referencia se describe a continuación la forma como se realizan los movimientos relativos entre la punta del objeto extrusor y la base de la máquina.

La base es donde se deposita el material del cual se constituye el objeto, ésta tendrá un movimiento sobre un eje, para este caso se refiere al eje Y, por lo tanto

a medida que se va conformando el objeto este se desplaza conjuntamente con su base. Se cuenta con un sistema que permite obtener movimiento en el eje X, éste va soportado a la base externa tal como se muestra en la figura 20, este sistema también posee desplazamiento sobre el eje Z, de esta manera se completan los 3 movimientos esenciales para la conformación de los objetos. La base es de Acrílico de 5mm de espesor, se encuentra sujeta a la parte inferior de la estructura externa, para obtener una buena estabilidad se soporta mediante dos varillas de acero con exterior liso con diámetro de 7mm. El movimiento se logra mediante un motor PAP el cual transmite el movimiento a la base mediante una correa dentada y un arreglo de piñones.

El sistema con movimiento en los ejes X y Z, soporta el extrusor de material. Este se encuentra sobre la estructura externa, se sujeta verticalmente mediante dos varillas de acero liso con diámetro de 7mm, una a cada lado, también está sujeta a dos varillas roscadas de ¼ de pulgada a cada lado. Por estar unidos se genera movimiento en el eje Z a todo el sistema. Además el sistema consta de 2 varillas de acero liso puestas horizontalmente, el movimiento es generado por un motor PAP y transmitido a la base donde se sujeta el extrusor mediante una correa dentada y un arreglo de piñones.

5.4 TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO.

5.4.1 Correas. Un elemento que se utiliza para transmitir el movimiento en los diferentes ejes es la correa dentada (sincronización) de tipo XL, de 1/4 de pulgada de ancho. De acuerdo a las medidas para la parte física de la máquina, se determino que el largo suficiente de dichas correas es de 25 cm.

Los anchos comerciales de las correas dentadas tipo XL se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Anchos de correas XL

Tipo XL		
Designación	Pulgadas	mm
25	1/4	6'3
31	5/16	7'9
37	3/8	9'4

Las correas usadas en los ejes X y Y, se cortan para unirse a la estructura del extrusor y de la base respectivamente, por lo cual la distancia de estas correas es

un parámetro flexible; pero la del eje Z, debe coincidir exactamente con la distancia determinada en la estructura física.

5.4.2 Piñones. Como se mencionó anteriormente el paso entre las correas utilizadas y el paso de los piñones debe ser el mismo. Dentro del proyecto se utilizaron piñones de 20 dientes para generar los movimientos del eje z, y piñones de 8 dientes en los demás ejes.

5.5 DESPLAZAMIENTO EN LOS EJES

Los motores paso a paso utilizados para el desplazamiento en los ejes X y Y, son de 1.8 grados por paso, a estos motores se sujeta un piñón de 8 dientes de paso XL, la altura de los dientes es de 1,27 mm, y el diámetro de la circunferencia exterior es de 12.91mm, para determinar el desplazamiento por paso con estas característica se tiene.

$$L = 2 * PI * R \quad (16)$$

Donde R es el radio del piñón tomando como referencia el diámetro exterior. $L = 40{,}56mm$. Este es el valor de la longitud recorrida por el piñón al dar una vuelta completa. Para determinar la distancia por paso y teniendo en cuenta que el motor es de 200 pasos se tiene que la distancia por paso es de,

$$Dp = 0.2028mm$$

Al dar un paso en el motor encargado de generar movimiento en el eje X, se obtendrá un desplazamiento de $0.2028mm$ en dicho eje, de la misma manera se obtiene la relación de desplazamiento sobre el eje Y ya que tiene las mismas características en cuanto al piñón y al motor PAP.

Con el fin de obtener una mayor resolución en cuanto al desplazamiento se utilizan los motores a medio paso, por lo cual los desplazamientos obtenidos en los ejes X y Y son iguales a $0.1014mm$. De ahora en adelante cuando se hable de dar pasos en los ejes X y Y se tendrá en cuenta que recorrerá esta distancia, a no ser que se precise lo contrario.

Para el caso de obtener el desplazamiento en el eje Z con relación a los pasos del motor se tiene en cuenta las siguientes especificaciones, se utiliza un motor PAP de 7.5 grados por paso (48 pasos), a este se sujeta un piñón de 8 dientes de paso XL, se transmite el movimiento mediante una correa dentada a un segundo piñón de 20 dientes, a este segundo piñón se sujeta un tornillo de 3/8 de rosca ordinaria. Sobre el tornillo se recorre una distancia de 1.59mm por vuelta (360°), lo que por grado corresponde a 0,004416 mm.

La relación entre los 2 piñones está dada por,

$$r = {Z_2}/{Z_1} \tag{17}$$

Donde Z es el número de dientes de los piñones.

$r = \frac{8}{20}$; Por tanto r= 0.4

Esto quiere decir que por una vuelta en el piñón sujeto al motor o sea una rotación de 360°, se obtiene en el piñón sujeto a la varilla roscada una rotación de 144°.

Para obtener el desplazamiento por paso en el eje Z, se tiene.

$$Dz = \frac{Dt*r}{Np} \tag{18}$$

Donde Dt: desplazamiento por vuelta de la varilla roscada
r : Relación entre piñones
Np: numero de pasos del motor.

$$Dz = \frac{1{,}59mm*0.4}{48} \qquad Dz = 0{,}01325\ mmporpaso$$

Al dar un paso en el motor generador de movimiento en el eje Z, se obtiene un desplazamiento de $0{,}01325\ mm$. De esta manera se obtiene la resolución que tiene la máquina en los desplazamientos en los tres ejes.

Tabla 9. Distancia por paso en los ejes

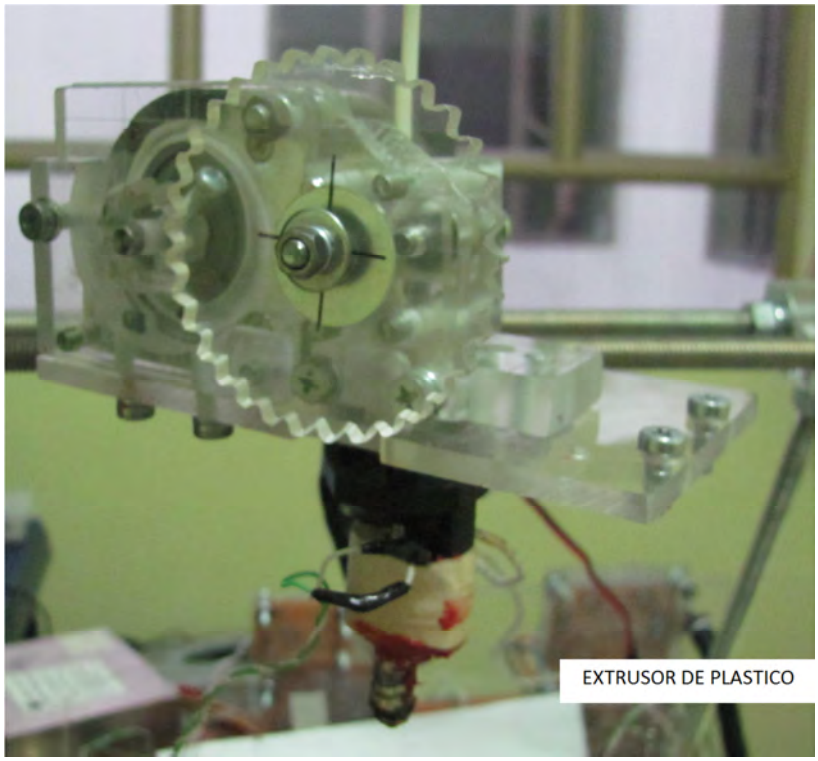
DISTANCIA RECORRIDA EN EJES (mm)		
X	Y	Z
0,1014	0,1014	0,01325

5.6 EL EXTRUSOR

Es el sistema encargado del calentamiento y deposición del plástico sobre la base para la conformación del objeto. Para el diseño se tiene en cuenta que el diámetro del hilo plástico utilizado es de 3mm. Este extrusor tiene como partes fundamentales, un motor paso a paso unipolar de 1.8 grados por paso, un juego de 2 piñones con el fin de obtener una ganancia en la potencia del motor, así como también controlar la relación de plástico a extruir vs pasos del motor, la relación entre los 2 piñones es de 1:3, 11 dientes para el piñón que esta directo al

motor y 33 dientes para el piñón que genera el movimiento que permite la extrusión de plástico. Otra parte fundamental dentro del extrusor es el calefactor, el cual calienta el plástico hasta aproximadamente 220 grados centígrados para que éste se pueda derretir y posteriormente depositar. La punta del extrusor es de bronce, tiene 4 cm de longitud y 0.6 cm de diámetro, sobre esta se enrolla un alambre de Nicrom que está constituido por una aleación de níquel 80% y cromo de 20%, tiene 10 Ω de resistencia. Mediante la aplicación de voltaje a este alambre se calienta la punta, para que al momento de pasar el plástico alcance la temperatura deseada para la deposición.

Figura 30. El extrusor



5.6.1 Resolución del Extrusor. A continuación se muestra la relación entre la cantidad de material plástico que entra, y sale del extrusor por paso del motor.

Este sistema cuenta con dos piñones, uno sujeto directamente al motor (de 11 dientes), y otro que está sujeto a una estructura que genera fricción sobre el hilo pastico, este piñón tiene 33 dientes. En este caso la relación entre los dos piñones es según la ecuación (17).

— Por tanto r= 0.3333

El elemento que hace fricción con el plástico es una pieza metálica y redonda, tiene un radio de 2,25mm. Por tanto la longitud recorrida por vuelta, y la cantidad de material que entra al extrusor está dada por.

$$C_E = 2 * PI * R \tag{19}$$

$$C_E = 14{,}13mm$$

Es decir que cuando el piñón de 33 dientes da una vuelta completa, dentro del extrusor se ha absorbido $14{,}13mm$ de hilo plástico.

Para obtener el número de vueltas que el piñón de 11 dientes debe dar para generar una vuelta completa en el piñón de 33 dientes se hace.

$$Vp = \frac{Vg}{r} \tag{20}$$

Donde;
Vp: vueltas en el piñón pequeño.
Vg: vueltas en el piñón grande.
r: Relación entre los piñones.

$$Vp = \frac{1}{0.333} Vp = 3$$

De esta manera también podemos obtener la relación de pasos del motor de extrusor y material que entra.

El motor utilizado es de 200 pasos por vuelta, para que en el extrusor entre $14{,}13mm$de hilo plástico es necesario que el motor de 600 pasos (3 vueltas).Para determinar la cantidad de material que entra por paso se tiene,

$$C_{EP} = \frac{C_E}{PasosMotor} \tag{21}$$

$$C_{EP} = \frac{14{,}13mm}{600} \qquad C_{EP} = 0{,}0235mm$$

Esto quiere decir que si el motor da un paso, en el extrusor entra $0{,}0235mm$ de hilo plástico. El diámetro del plástico que entra al extrusor es de 3mm, y el diámetro del hilo plástico que sale del extrusor es de 1mm, para hacer una relación de la cantidad de material que sale vs la cantidad de material que entra se tiene,

$$\text{Área del círculo} = \pi . r^2 \quad (22)$$

Para el hilo que entra, Área = π x (3mm)² Área = 28,27mm²
Para el hilo que sale, Área = π x (1mm)² Área = 3,14mm²

Por lo tanto la relación de entrada y salida de material es de,

$$R_{ES} = \frac{Hiloentrada}{Hilosalida} \quad (23)$$

$$R_{ES} = \frac{28{,}27\text{mm}^2}{3{,}14\text{mm}^2} = 9{,}003$$

Por cada 1mm de longitud de plástico que entra al extrusor, sale aproximadamente 9mm de longitud de material. Haciendo uso de esta relación y conociendo la longitud de material que entra al extrusor por paso, se puede obtener la longitud de material que sale por paso así,

$$C_{SP} = C_{EP} * R_{ES} \quad (24)$$

$$C_{SP} = 0{,}0235mm * 9 C_{SP} = 0{,}2115mm$$

Por cada paso del motor del extrusor sale $0{,}2115mm$ de longitud de hilo plástico de 1mm de diámetro. Igual que para generar los movimientos en los ejes X y Y, este motor se configura para trabajar a medios pasos, con lo cual se obtiene una distancia de $0{,}105mm$

La longitud del material extruido por medio paso, debe ser aproximadamente la misma que la distancia recorrida en los ejes X y Y por medio paso, en este caso y con las características mencionadas se cumple dicha relación ya que la diferencia entre las dos medidas es de milésimas de milímetro, esta relación es importante ya que a medida que se genera movimiento en cualquiera de los dos ejes se debe extruir material plastico para que se deposite sobre la superficie, y de esta manera se complete el objeto deseado.

5.6.2 Potencia del Calefactor. De acuerdo a la ley de Ohm, la potencia del sistema está dada por,

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (25)$$

Con una fuente de voltaje de 12V de CD, y una resistencia en el alambre de Nicrom de 10 Ω, se tiene que,

$$P = 14{,}4\ W$$

La corriente mínima necesaria de la fuente para alimentar el sistema se lo obtiene de acuerdo a la ecuación,

$$I = \frac{V}{R} \tag{26}$$

$$I = 1{,}2\ A$$

Con estas características es necesario que la fuente de alimentación del sistema sea superior a 1,2 Amperios. Con una potencia de 14,4W en el calefactor, es posible que en el interior de la punta del extrusor se alcance una temperatura de aproximadamente 300° centígrados, lo cual supera la temperatura de trabajo normal (para fundir el plástico) que es de 220° centígrados.

5.6.3 Sistema de Control de Temperatura de Calefactor. Mantener la temperatura adecuada dentro de la cámara del extrusor resulta crucial para obtener los resultados deseados (220℃ a 230℃), ya que si la temperatura es mayor el plástico se quema y pierde las propiedades, y por el contrario si es baja, este no alcanza la temperatura de fundición y no pega a medida que se extruye, por tal motivo es necesario la realización de un sistema especial dedicado para el control de dicha temperatura. Se utilizan el microcontrolador 16f873A para este fin.

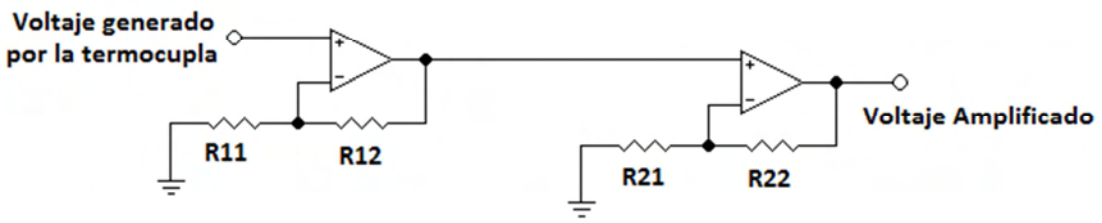
El sensor de temperatura utilizado se coloca a 2cm de la punta del extrusor por dificultades para sujetarlo dentro de la cámara, aquí hay 30℃ menos que en la parte más caliente de la cámara que es el lugar donde se derrite el plástico, por tanto hay que compensar este valor en la etapa de control.

Si se desea que dentro de la cámara haya una temperatura de 220℃, en el lugar donde está ubicado el sensor debe existir 190℃. Para este caso el valor del voltaje que genera la Termocupla es de 35mv y 4,2 el voltaje a la salida de la etapa que corresponde un valor de 214 en el registro del conversor ADC en el microcontrolador PIC 16F873A.

- Muestreo de Temperatura de la Cámara del Extrusor: Para este objeto se utiliza una termocupla tipo K, ésta genera un voltaje dependiendo de la temperatura a la que es expuesta, el orden de voltaje generado es de los milivolitios.

- Modulo de Amplificación de Voltaje: Por ser un voltaje muy pequeño es necesario que este se amplifique para poder ser utilizado en el microcontrolador. Para este caso se utiliza dos amplificadores operacionales en modo no inversor de la siguiente manera [4],

Figura 31. Etapa de amplificación de voltaje de Termocupla



Utilizando esta configuración, la relación entre el voltaje de entrada y salida se puede aproximar a,

— (27)

De esta manera por ejemplo para temperatura ambiente, la Termocupla genera un voltaje de 16mV, y usando los siguientes valores de resistencia R21=10k; R22=100K se tiene,

—

Usando dos etapas de amplificación con las mismas características se tiene que el voltaje de salida es de 1,936 Voltios. Por tanto la etapa de amplificación está dada por un factor de 121.

➢ Procesamiento de la Información: Se utiliza el PIC 16F873A para realizar el procesamiento y control de temperatura del calefactor, para este efecto, se usa diferentes módulos y funciones del PIC de esta manera [3].

- Modulo ADC. El voltaje que sale de la etapa de amplificación se aplica a una entrada análoga de PIC, aquí se hace la conversión de este dato a digital, (0V = 0; 5V = 255). Con la información en esta forma, la cual se encuentra en un registro (ADRESH), es posible hacer una relación directamente proporcional entre el voltaje de entrada y la temperatura a la que se encuentra la punta de la termocupla.

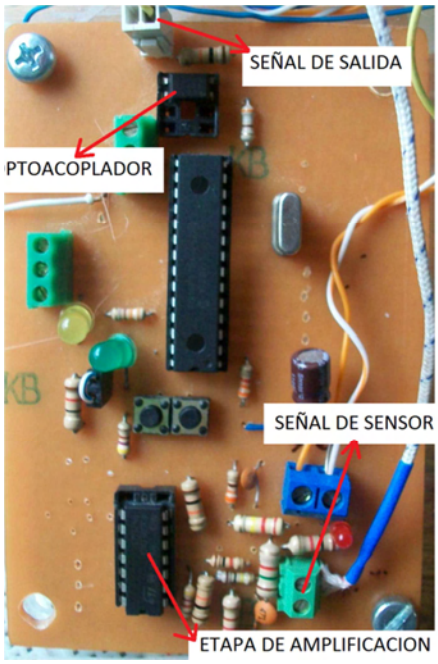
- Modulo PWM: Se genera pulsos de diferente ancho dependiendo de la temperatura deseada en el calefactor. Por lo anterior se usa el módulo (PWM) del microcontrolador, que envía pulsos de diferente ancho hacia un transistor de potencia para que a través de éste se modifique el valor promedio de

voltaje aplicado al calefactor. Para controlar el ancho de pulso generado se cambia el valor del registro (CCPR1L).

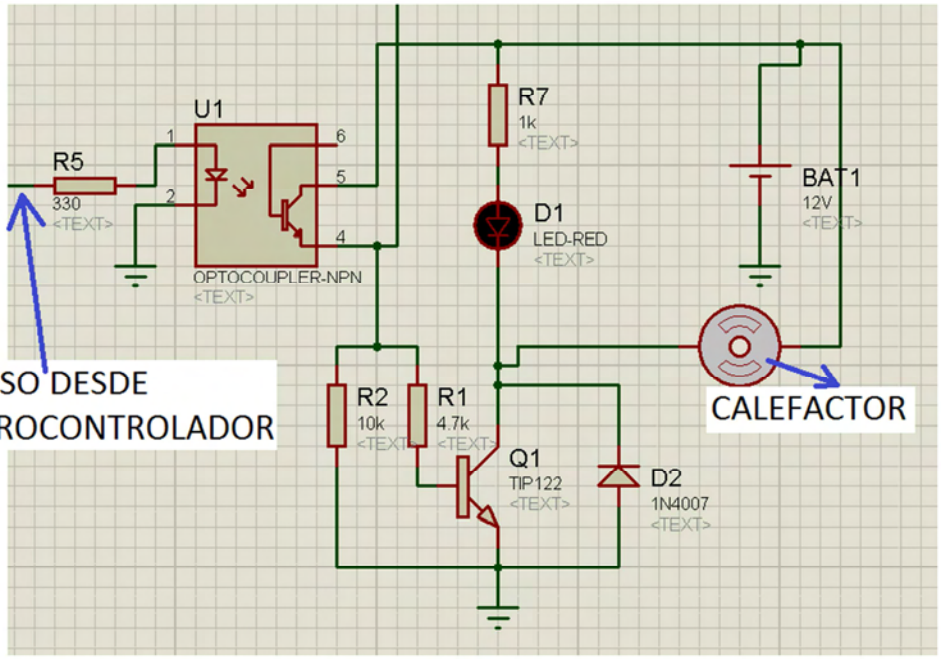
➢ Etapa de Potencia: El pulso del PIC es aplicado sobre la base del un transistor NPN (TIP 122) por medio de un opto-acoplador (PC817), este lleva en su colector la fuente de voltaje (12V), y su emisor aterrizado, lleva un diodo (1N4007) de protección entre colector-emisor, de esta manera se protege el microcontrolador cuando se aplica la fuente de voltaje sobre el calefactor [4].

5.6.4 Diagrama del circuito de control de Temperatura. A continuación se presenta una imagen del circuito de control de temperatura del extrusor, la parte fundamental del circuito es el microcontrolador pic 16f873A. También se muestra la etapa de potencia para el control de temperatura.

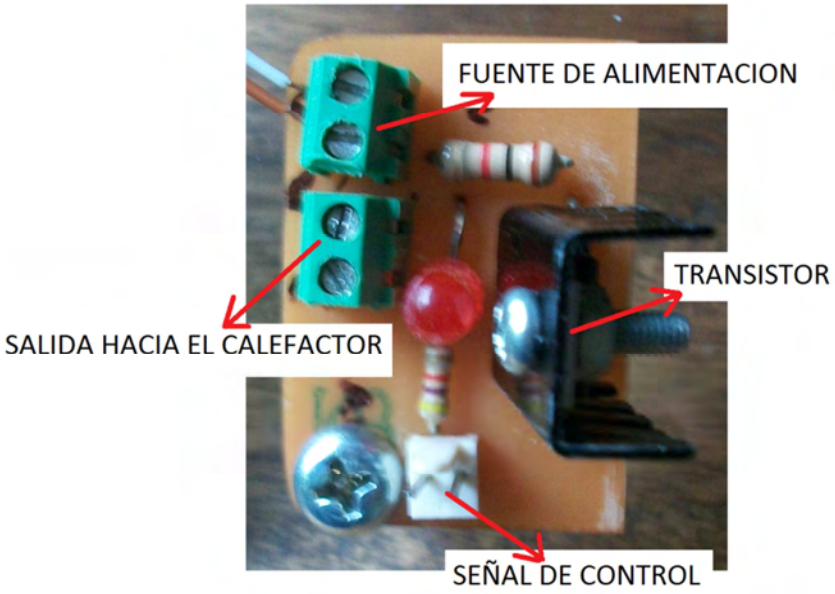
Figura 32. Diagrama de circuito de control. a) Modulo maestro circuito de control, b) Esquemático de circuito de potencia, c) Circuito de potencia montado



a)



b)



c)

5.6.5 Lista de componentes de circuito de control de temperatura.

A continuación se relaciona los componentes utilizados en el circuito de control de temperatura.

Tabla 10. Componentes Circuito Maestro Control Temperatura

DESCRIPCION	CANTIDAD
PIC 16F873A	1
LM 324	1
RESISTENCIA 10K	4
RESISTENCIA 1K	3
RESISTENCIA 220K	1
RESISTENCIA 100K	1
RESISTENCIA 4.7K	1
RESISTENCIA 47K	1
RESISTENCIA 330	3
RESISTENCIA 3.3 K	1
RESISTENCIA 1.5K	1
RESISTENCIA 2.2K	1
CONDENSADOR 470pF	2
CONECTOR 3 PINES	1
CONECTOR 2 PINES	3
PULSADORES	2
LED	2
CRISTAL 4MH	1
CONDENSADOR 15Pf	2
OPTOACOPLADOR	1

Tabla 11. Componentes Circuito de Potencia

DESCRIPCION	CANTIDAD
TIP 122	1
RESISTENCIA 4.7K	1
RESISTENCIA 1K	1
LED	1
CONECTOR 2 PINES	2

5.7 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para la alimentación del sistema de la impresora tridimensional se utiliza una fuente de computador la cual es capaz de suministrar 5v y 12v. La corriente es de

25A y 10A respectivamente, suficiente para el consumo de los motores y del calefactor.

5.8 REQUERIMIENTOS DE SOFTWARE

El lenguaje de desarrollo que se utilizó en el proyecto es JAVA JDK versión 1.6.0_18, y el entorno de desarrollo es eclipse versión indigo Release. Build id: 20110615-0604

5.9 RECURSOS MATERIALES

A continuación se detallan todos los recursos materiales que se utilizaron a lo largo del desarrollo de este proyecto

Tabla 12. Recursos materiales del Proyecto

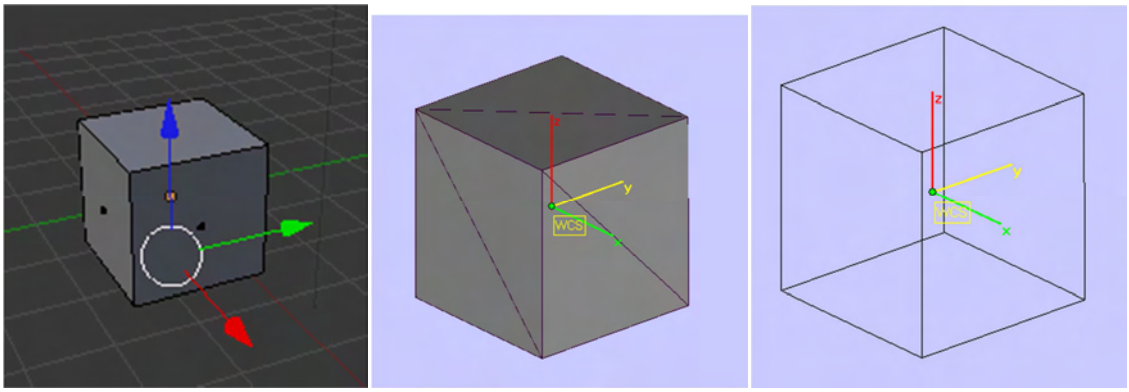
RECURSOS MATERIALES	CANTIDAD	VALOR UNITARIO ($)	TOTAL ($)
Equipo de oficina	1	60.000	60.000
motores paso a paso	4	60.000	240.000
metro de varilla roscada	6	5.000	30.000
remaches esquinas ()	36	3.000	108.000
Tuercas	90	200	18.000
Arandelas	90	50	4.500
metro de varilla de acero	4	25.000	100.000
Acrílico	1	200.000	200.000
Balineras	30	3.000	90.000
correas dentadas de caucho	3	25.000	75.000
Elemento de extrusión de material	1	200.000	200.000
Piñones	6	4.000	24.000
Tornillos de cobre 7mm	10	50.000	50.000
Protoboard	1	40.000	40.000
PIC	2	25.000	50.000
otros elementos electrónicos	1	150.000	150.000
		TOTAL	**1.439.500**

6. INFORMACIÓN DEL OBJETO

Para que la máquina logre la materialización de un objeto, con anterioridad este debió haber sido diseñado en un programa CAD 3D (en este caso se utiliza BLENDER por ser un programa de libre licencia). Una vez el objeto está listo con todas las especificaciones de forma y medidas, se procede a exportar un archivo generado por el programa, este archivo tiene la extensión .STL. El archivo debe exportarse en formato ASCII; dentro de este archivo se encuentra la información del objeto diseñado en forma de coordenadas de triángulos.

Por ejemplo, para un cubo de 2 unidades en todos sus lados y que se encuentra en el punto de coordenadas iniciales (0, 0, 0) en los ejes X,Y,Z, respectivamente, se tiene los siguientes triángulos con sus respectivas coordenadas.

Figura 33. Información de un cubo a materializar. a) Cubo realizado en Blender, b) Cubo con triángulos, c) cubo líneas externas



a) b) c)

Como se puede observar en la figura b), cada cara del cubo está conformada por 2 triángulos, para conformar todo el cubo se tienen 12 triángulos.

A continuación se muestra el archivo stl generado por BLENDER para el cubo anterior.

“solid Exported from blender
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 1.000000 1.000000 -1.000000
vertex 1.000000 -1.000000 -1.000000
vertex -1.000000 -1.000000 -1.000000
endloop
endfacet

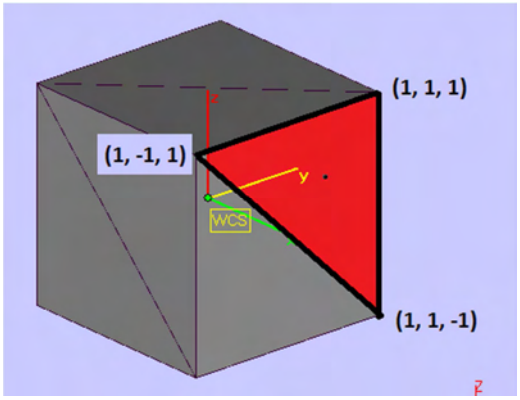
```
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex -1.000000 -1.000000 -
1.000000
vertex -1.000000 1.000000 -1.000000
vertex 1.000000 1.000000 -1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 1.000000 0.999999 1.000000
vertex -1.000000 1.000000 1.000000
vertex -1.000000 -1.000000 1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex -1.000000 -1.000000 1.000000
vertex 0.999999 -1.000001 1.000000
vertex 1.000000 0.999999 1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 1.000000 1.000000 -1.000000
vertex 1.000000 0.999999 1.000000
vertex 0.999999 -1.000001 1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 0.999999 -1.000001 1.000000
vertex 1.000000 -1.000000 -1.000000
vertex 1.000000 1.000000 -1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 1.000000 -1.000000 -1.000000
vertex 0.999999 -1.000001 1.000000
vertex -1.000000 -1.000000 1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex -1.000000 -1.000000 1.000000
vertex -1.000000 -1.000000 -
1.000000
vertex 1.000000 -1.000000 -1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex -1.000000 -1.000000 -
1.000000
vertex -1.000000 -1.000000 1.000000
vertex -1.000000 1.000000 1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex -1.000000 1.000000 1.000000
vertex -1.000000 1.000000 -1.000000
vertex -1.000000 -1.000000 -
1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex 1.000000 0.999999 1.000000
vertex 1.000000 1.000000 -1.000000
vertex -1.000000 1.000000 -1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0 0 0
outer loop
vertex -1.000000 1.000000 -1.000000
vertex -1.000000 1.000000 1.000000
vertex 1.000000 0.999999 1.000000
endloop
endfacet
endsolid Exported from blender ”
```

Como se puede observar existen valores en las coordenadas X, Y, Z, de los puntos que conforman 12 triángulos. El archivo de un sólido empieza con el encabezado “solid Exported from blender”, y finaliza con “end solid Exported from

blender". Los triángulos empiezan con "facet normal 0 0 0", seguido de"outer loop", y finalizan con "end loop" seguido de" end facet". Este es el archivo en el cual se encuentra toda la información necesaria para realizar el prototipado de un objeto diseñado en un programa CAD.

En este caso si verificamos la información para el quinto triangulo se tiene que corresponde al señalado en la siguiente figura.

Figura 34. Triangulo con coordenadas



La relación de las medidas en el sistema métrico decimal y unidades del objeto en el programa CAD está determinada por la resolución en el movimiento en los ejes X y Y. Dado que la resolución es de 0.101mm una unidad en el programa CAD correspondería a 1mm.

6.1 CAPTURA DE INFORMACIÓN JAVA

El primer paso que se debe dar es cargar la información en diferentes arreglos, haciendo uso del software de desarrollo JAVA [6], [7] y [8]. La información es proveniente del archivo stl generado por el programa de diseño (BLENDER).

En primer lugar se lee la ruta donde se encuentra guardado el archivo, a partir de este punto se procede a leer un flujo de datos utilizando la clase incluida en los paquete de JAVA "StreamTokenizer" la cual crea un flujo de datos que son leídos de forma ordenada.

En la primera línea del archivo se encuentra la palabra "solid" acompañada del software que lo generó, esta información sirve para identificar el punto de partida de lectura del archivo.

En segundo lugar se encuentra las palabras "facet normal" acompañado de su valor, este dato es guardado en un arreglo (ArrayList) como datos de tipo flotante.

En el software presente de análisis esta información no se tiene en cuenta. Solo sirve para identificar el segundo token.

En tercer lugar se encuentra las palabras “outerloop” que identifican que va ha empezar la información del triangulo. En este punto se encuentra la información de los vértices de los triángulos, cada vértice tiene coordenadas en X, Y y Z y empieza con la palabra “vertex”. En el programa de captura de datos se realiza un ciclo que lee tres vértices los cuales forman un triangulo. Esta información es guardada en un arreglo (ArrayList) de datos tipo flotante. Esta es la información primordial utilizada por el software de análisis.

Seguidamente la palabra “endloop” indica que ya finalizó la información de los vértices y “endfacet” final de la información completa de un triángulo. Se sigue con un nuevo ciclo para la lectura de información de otro triangulo, se continua de esta manera hasta que luego de la palabra “endfacet” se encuentre la palabra “endsolid” la cual indica que la información del objeto esta completa.

Una vez se tiene la información del archivo cargada, se crean puntos con coordenadas en tres dimensiones y posteriormente se crean triángulos con dichos puntos. Con la información en estas condiciones se procede a realizar el análisis pertinente para lograr señales de control para movimientos en los diferentes ejes.

6.2 OBTENCIÓN DE LÍNEAS

Con el fin de hacer uso de la información del archivo .STL se trazan líneas haciendo uso de los puntos de cada vértice del triangulo, ya que la técnica utilizada por esta máquina es la de deposición de hilo capa por capa, este proceso se lo puede hacer en dos coordenadas (X, Y), dejando la coordenada Z como constante. Por tal razón se procede a hacer el análisis en dos dimensiones, y se utiliza la ecuación de la recta, para este fin se procede a implementar un algoritmo en JAVA que calcule las coordenadas por donde esta debe pasar [6], [7] y [8].

Para construir las líneas rectas es necesario calcular las posiciones intermedias entre los puntos extremos que se obtienen de los vértices de los triángulos generados por el archivo STL.

Con estas consideraciones se procede a implementar el algoritmo de la recta, se tiene en cuenta la ecuación (1) para este proceso.

$$y = mx + b$$

Donde,

y: Coordenada en el eje Y (variable dependiente)

m: Pendiente de la recta
x: Coordenada en el eje X (variable independiente)
b: Constante (representa el corte con el eje Y)

El valor de la pendiente está dado por,

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \tag{28}$$

Donde,

y_2= coordenada final del eje Y
y_1= coordenada inicial del eje Y
x_2= coordenada final del eje X
x_1= coordenada inicial del eje X

El valor de b esta dado por la siguiente ecuación,

$$b = y_1 - mx_1 \tag{29}$$

Hay ocasiones como se verá más adelante, que es necesario tabular en función de Y, por tanto la ecuación de la recta se transforma en,

$$x = \frac{y - b}{m} \tag{30}$$

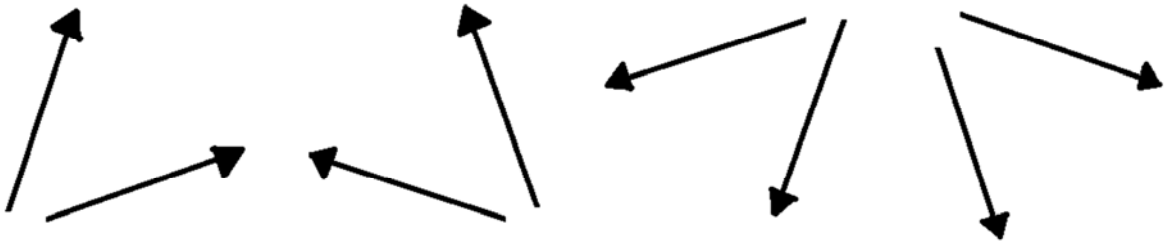
La utilización de esta ecuación depende de la prioridad de movimiento sobre un eje, que en este caso puede ser X o Y.

Las coordenadas X y Y, tanto iníciales como finales se las obtiene del archivo stl. El valor de las coordenadas independientes, se toma del valor de la resolución del eje en la parte mecánica, en este caso $0.1014mm$ para X yY. De esta manera se obtienen todos los puntos para hacer una línea recta con los puntos obtenidos de un triangulo generado por el programa CAD.

6.3 PRIORIDAD DE MOVIMIENTO EN LOS EJES

Para determinar los pasos que se deben dar para ir de un punto hacia otro, es necesario considerar la prioridad de movimiento en los ejes. Se hace teniendo en cuenta en que cuadrante es el desplazamiento y el valor de la pendiente de la recta que se va a trazar.

Figura 35. Movimiento en los cuadrantes. a) Cuadrante I, b) Cuadrante II, c) Cuadrante III, d) Cuadrante IV.



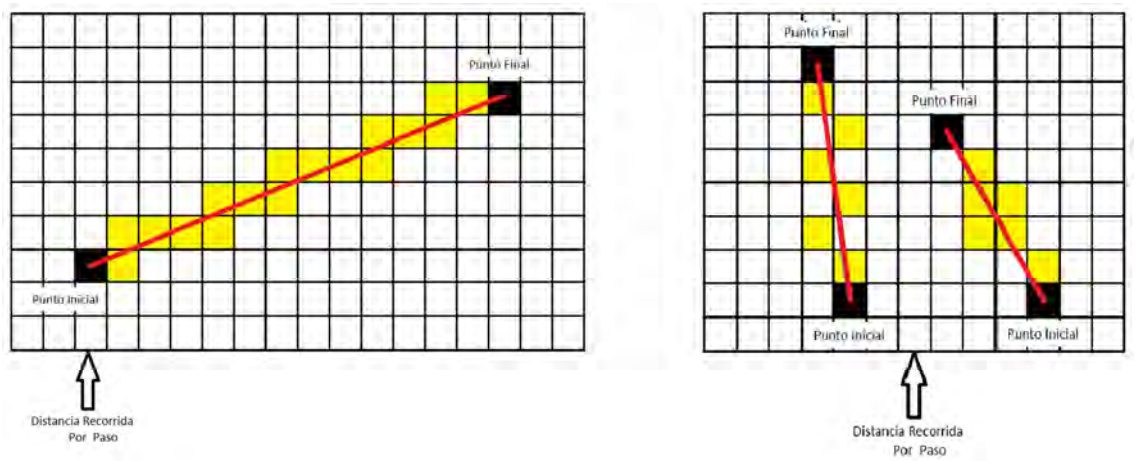
a) b) c) d)

En el algoritmo se debe procurar que los pasos generados por los motores correspondan lo más cerca posible a la distancia necesaria para dibujar una línea recta ideal.

En el proceso de trazar una línea recta con la máquina, se debe tener en cuenta que los movimientos generados dependen de los pasos de un motor PAP y cada paso se desplaza una determinada distancia fija, y los puntos obtenidos mediante los cálculos realizados por el Software no son enteros y por lo general no van a coincidir con la distancia recorrida por los pasos del motor, por tal razón se genera una inconsistencia o un error (aliasing) entre estos dos valores. El software debe contrarrestar este efecto lo más eficientemente posible.

A continuación se muestra una gráfica de obtención de una línea de forma correcta y otra que muestra una línea con deficiencias.

Figura 36. Trazo de líneas. a) Línea correcta, b) Líneas incorrectas.



a) b)

Con el fin de seguir el camino más adecuado se analiza en primer lugar el valor de la pendiente de la recta, para determinar la prioridad en los movimientos y con base a esto seleccionar sobre que eje tabular.
La pendiente se la determina haciendo uso de la ecuación (28). Haciendo una resta de las coordenadas en los ejes se establece sobre que cuadrante es el movimiento.

Tabla 13. Selección de cuadrante para el Movimiento

SELECCIÓN CUADRANTE	PARAMETRO
CUADRANTE I	$Y_2 - Y_1 > 0$ Y $X_2 - X_1 > 0$
CUADRANTE II	$Y_2 - Y_1 > 0$ Y $X_2 - X_1 < 0$
CUADRANTE III	$Y_2 - Y_1 < 0$ Y $X_2 - X_1 < 0$
CUADRANTE IV	$Y_2 - Y_1 < 0$ Y $X_2 - X_1 > 0$

Con la información de los cuadrantes y el valor de la pendiente de la recta se puede obtener la prioridad para el movimiento en los ejes y el sentido (positivo o negativo).

Tabla 14. Prioridad en Movimiento

PARAMETROS PARA PRIORIDAD		PRIORIDAD SOBRE EJE					DETALLES
VALOR DE PENDIENTE	CUADRANTE	X	Y	-X	-Y	NA	
M=0	(I-IV)	■					Moviemiento solo sobre eje X
	(II-III)			■			Moviemiento solo sobre eje -X
0<M>1	I	■					
	III			■			
M=1	I					■	La prioridad puede ser sobre X o Y
	III					■	La prioridad puede ser sobre -X o -Y
1<M>∞	I		■				
	III				■		
M=∞	(I-II)		■				Moviemiento solo sobre eje Y
	(III-IV)				■		Moviemiento solo sobre eje -Y
-∞<M>-1	II		■				
	IV				■		
M= -1	II					■	La prioridad puede ser sobre -X o Y
	IV					■	La prioridad puede ser sobre X o -Y
0<M>-1	II			■			
	IV	■					

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores es posible determinar y generar las señales de control para el movimiento en los ejes.

6.4 GENERACIÓN DE PUNTOS DE LINEA.

Una vez determinada la prioridad (X, Y, -X, -Y), se procede a tabular haciendo uso de la ecuación de la recta en 2D (1) o (33) según sea el caso, y se obtiene los puntos donde se debe desplazar. Por ejemplo si la prioridad es sobre el eje X, la coordenada independiente en la ecuación de la recta (1) corresponde al desplazamiento en X que es igual al valor de la resolución del eje en la parte mecánica, en este caso $0.10145mm$. El valor se va incrementando en esta cantidad cada vez que se da un paso. Haciendo la tabulación se encuentra el valor de Y para dicha coordenada en X, y se genera un punto de desplazamiento. De esta misma manera se hace con las demás prioridades [9].

7 DESPLAZAMIENTO SOBRE EJES

Como se observo anteriormente la definición de la prioridad, permite conocer con claridad cuál va a ser la ecuación de la recta utilizada para generar los puntos o sobre cual variable se va a tabular (X o Y). Sin embargo hasta el momento no se ha determinado el instante en que se deben generar los pasos tanto en el eje prioritario como en el no prioritario. A continuación se trata las consideraciones necesarias para los desplazamientos de acuerdo a las diferentes prioridades [10].

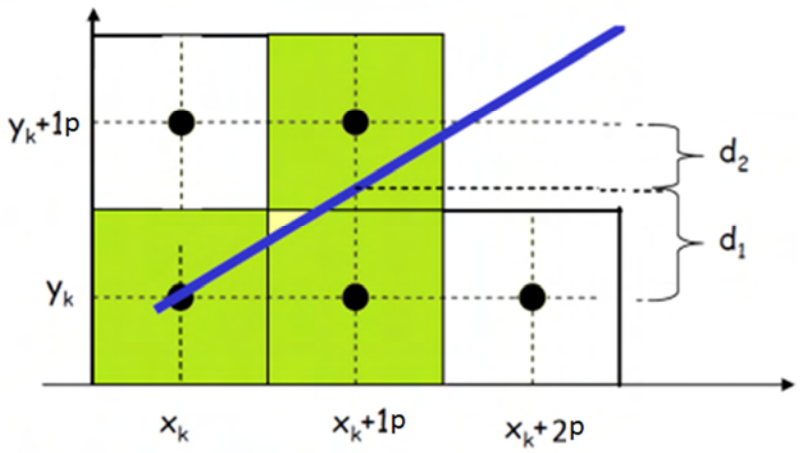
7.1 DESPLAZAMIENTOS CON PRIORIDAD EN X

Para realizar los desplazamientos cuando existe prioridad en X se presentan dos opciones de movimiento, uno cuando la recta esta sobre el cuadrante I y otra cuando la recta ésta sobre el cuadrante IV. Para este tipo de prioridad se utiliza la ecuación (1), o sea que X es la variable independiente.

7.1.1 Cuadrante I. A continuación se muestra cuales son las condiciones necesarias para generar un paso tanto en el eje X como en Y.

Tomando como punto inicial un punto cualquiera sobre la mesa de trabajo ( ), desde donde se empieza a trazar una línea se tiene que definir el eje sobre el cual será el próximo movimiento.

Figura 37. Prioridad en X – Cuadrante I



d1 y d2, corresponden a la distancia vertical entre los puntos reales de la línea, y los puntos en los cuales coincide la resolución del motor.

En la figura 37, se observa que para seguir la línea ideal y partiendo desde el punto (X_k, Y_k) hay dos opciones para el siguiente movimiento, sobre el eje X o eje Y (desplazarse a los puntos (X_k, Y_{k+1p}) o (X_{k+1p}, Y_k)). En este caso se escoge el punto X_{k+1p}, Y_k o sea un movimiento sobre el eje X, ya que este es el punto más cercano al valor de los puntos reales intermedios entre los extremos. Para este caso el subíndice 1p representa un medio paso del motor PAP que para efectos de distancia representa el valor de desplazamiento sobre el eje X cuando el motor da un medio paso ($0.1014mm$). Con estas condiciones en el algoritmo se determina que el primer paso se lo realiza en X, por tener la prioridad sobre este eje, de esta manera se traslada al punto (X_{k+1p}, Y_k).

Una vez en el punto (X_{k+1p}, Y_k), se presentan como siempre dos opciones de movimiento, que puede ser el punto (X_{k+2p}, Y_k) o el punto (X_{k+1p}, Y_{k+1p}), en este caso para hacer un desplazamiento uniforme se debe seleccionar la segunda opción (X_{k+1p}, Y_{k+1p}).

Para esta selección es necesario tener en cuenta la distancia vertical entre los puntos reales de la recta y los puntos en los cuales coincide la resolución del motor por paso (análisis similar al realizado en el algoritmo de Bresenham). La decisión de dar el paso se la toma cuando dicha distancia supera cierto valor relacionado con el desplazamiento por medio paso ($0.1014mm$). Para esta prioridad (X), la distancia a tener en cuenta es d1. Con estas consideraciones se tiene que,

La ecuación de la recta está dada por,

$$y = m(x_{k+1p}) + b \tag{31}$$

Las distancias d_1, están dadas por,

$$d_1 = y - y_k \tag{32}$$

$$d_1 = m(x_{k+1p}) + b - y_k$$

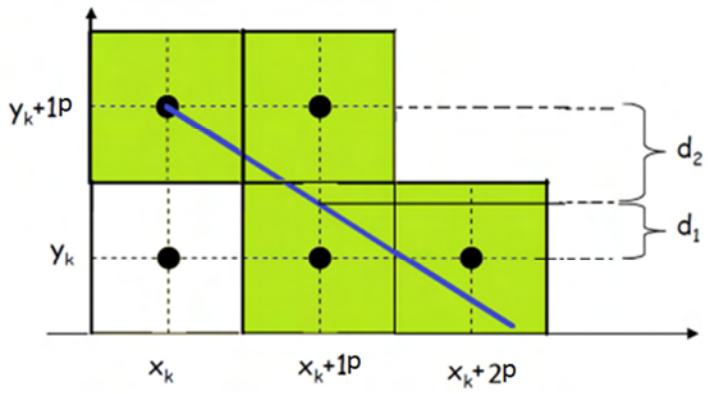
En el caso de que la distancia (d_1) no supere el valor relacionado con el desplazamiento del motor por medio paso, el desplazamiento siempre va a ser sobre el eje X (eje prioritario).
Cuando las condiciones se dan para un desplazamiento sobre el eje no prioritario (eje Y), debe ser seguido inmediatamente por un paso en el eje prioritario (X). Y se continúa con el mismo procedimiento de análisis para determinar los pasos sobre los ejes. Hay que tener en cuenta que una vez dado el paso sobre el eje no

prioritario (Y), en la próxima comparación de distancia ( ) se debe incrementar el valor de la coordenada en dicho eje en el valor de la resolución [6], [7], [8], [9] y [10].

7.1.2 Cuadrante IV. Las consideraciones en este caso son, prioridad en X y trazo de la recta sobre el cuadrante IV.

La toma de decisiones para dar pasos es similar a la definida en el proceso anterior. En esta ocasión se parte desde el punto ( ), desde donde se va a empezar a trazar una línea.

Figura 38. Prioridad en X – Cuadrante IV



Igual que el proceso anterior se trata de seguir la línea partiendo desde el punto inicial, hay dos opciones para el siguiente movimiento, sobre el eje X o eje Y, en este caso el desplazamiento se debe hacer hasta el punto ( ). Las demás consideraciones son las determinadas anteriormente.

En el algoritmo se establece que el primer paso se da sobre el eje con prioridad (eje X), con este hecho se llega hasta el punto , con lo cual se cumple el primer requerimiento.

Desde el punto , el siguiente movimiento debe hacerse hasta . Para esta selección nuevamente se tiene en cuenta la distancia vertical entre los puntos reales de la recta y los puntos en los cuales coincide la resolución del motor por paso. La decisión de dar el paso se la toma cuando dicha distancia supera cierto valor relacionado con el desplazamiento por paso ( ). En el siguiente punto se encuentra prácticamente la única diferencia con el primer proceso. En este caso como se puede ver en la figura 38, la distancia a tener en cuenta para esta decisión es . Con la utilización de la ecuación de la recta 34, se determina el valor de la distancia ,

(33)

Si la distancia ( ) no supera el valor relacionado con el desplazamiento del motor por paso (, el desplazamiento siempre va a ser sobre el eje X (eje prioritario).

Cuando se dan las condiciones para un desplazamiento sobre el eje no prioritario (eje Y), debe ser seguido inmediatamente por un paso en el eje prioritario (X). Y se continúa con el mismo procedimiento de análisis para determinar los pasos sobre los ejes [6], [7], [8], [9] y [10].

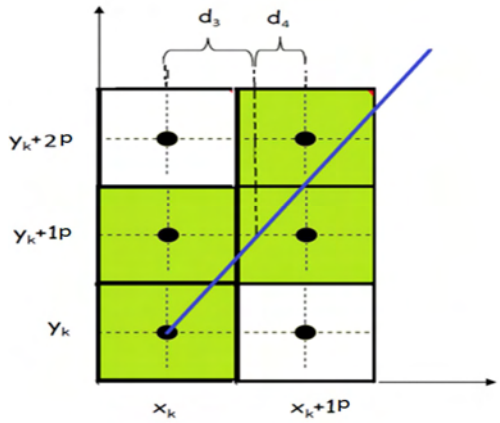
7.2 DESPLAZAMIENTO CON PRIORIDAD DE Y

A continuación se describen los movimientos cuando existe prioridad en Y. Al igual que en la prioridad en X, se presentan dos opciones de movimiento, uno cuando la recta esta sobre el cuadrante I y otra cuando la recta esta sobre el cuadrante II.

Para este tipo de prioridad en la recta se tabula respecto a Y, por tanto se usa la ecuación de la recta (33).

7.2.1 Cuadrante I. En este caso se muestra cuales son las condiciones necesarias para generar un paso tanto en el eje X como en el eje Y. Tomando como punto inicial un punto cualquiera sobre la mesa de trabajo ( ), se define el eje sobre el cual va a ser el próximo movimiento.

Figura 39. Prioridad Y – Cuadrante I



d3, d4, corresponden a la distancia horizontal entre los puntos reales de la línea, y los puntos en los cuales coincide la resolución del motor.

En la figura 39, para seguir la línea ideal se tiene la siguiente consideración, partiendo desde el punto (X_k, Y_k) hay dos opciones para el siguiente movimiento, sobre el eje X o eje Y. En este caso se escoge el punto X_k, Y_{k+1p} o sea un movimiento sobre el eje Y, ya que este es el punto más cercano al valor de los puntos reales intermedios entre los extremos. Como en la prioridad en X, aquí el subíndice 1p representa un paso del motor PAP que para efectos de distancia es igual al valor de desplazamiento sobre el eje Y cuando el motor da un medio paso.

Con estas condiciones en el algoritmo se determina que el primer paso se lo realiza en Y, por tener la prioridad sobre este eje, de esta manera se traslada al punto (X_k, Y_{k+1p}), y se cumple con el primer requerimiento.

Una vez en el punto (X_k, Y_{k+1p}), se presentan nuevamente dos opciones de movimiento, que bien puede ser el punto (X_k, Y_{k+2p}) o el punto (X_{k+1p}, Y_{k+1p}), en este caso para hacer un desplazamiento lo más cercano a lo ideal se debe seleccionar la segunda opción (X_{k+1p}, Y_{k+1p}).

Para esta selección es necesario tener en cuenta la distancia horizontal entre los puntos reales de la recta y los puntos en los cuales coincide la resolución del motor por medio paso. La decisión de dar el paso se la toma cuando dicha distancia supera cierto valor relacionado con el desplazamiento por paso $(0.1014mm)$. Para esta prioridad (Y), la distancia a tener en cuenta es d_3.

Con estas condiciones y con el fin de encontrar la coordenada de X en el punto conocido de Y, la ecuación de la recta está determinada por,

$$x = \frac{(y_{k+1p}) - b}{m} \tag{34}$$

Las distancias d3, están dadas por,

$$d_3 = x - x_k \tag{35}$$

$$d_3 = \frac{(y_{k+1p}) - b}{m} - x_k$$

En el caso de que la distancia (d_3) no supere el valor relacionado con el desplazamiento del motor por medio paso, el desplazamiento siempre va a ser sobre el eje Y (eje prioritario).

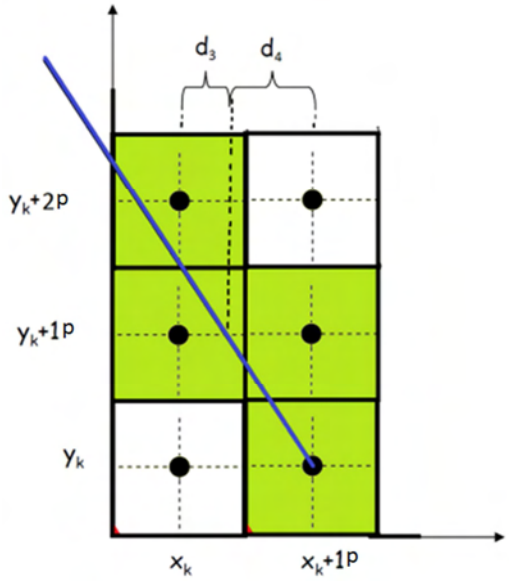
Cuando las condiciones se dan para un desplazamiento sobre el eje no prioritario (eje X), debe ser seguido inmediatamente por un paso en el eje prioritario (Y). Y se continúa con el mismo procedimiento de análisis para determinar los pasos sobre los ejes. Hay que tener en cuenta que una vez dado el paso sobre el eje no prioritario (Y), para la próxima comparación de distancia (d_3) se debe incrementar

el valor de la coordenada en dicho eje en el valor de la resolución [6], [7], [8], [9] y [10].

7.2.2 Cuadrante II. Para dar pasos en ambos ejes, con prioridad en Y, y cuando la recta se traza sobre el cuadrante II, se tiene en cuenta las siguientes consideraciones.

Las condiciones son similares a las definidas anteriormente. En esta ocasión se parte desde el punto ( ), desde donde se va a empezar a trazar una línea.

Figura 40. Prioridad Y – Cuadrante II



Con el objeto de seguir la línea ideal y partiendo desde el punto inicial, hay dos opciones para el siguiente movimiento, sobre el eje X o eje Y, en este caso el desplazamiento se debe hacer hasta el punto ( ).

En el algoritmo se determina que el primer paso se da sobre el eje con prioridad (eje Y), así se llega hasta dicho punto, con lo cual se cumple el primer requerimiento.

Desde el punto ( ), el siguiente movimiento debe hacerse hasta . Para esta selección nuevamente se tiene en cuenta la distancia horizontal entre los puntos reales de la recta y los puntos en los cuales coincide la resolución del motor por medio paso. La decisión de dar el paso se la toma cuando dicha distancia supera cierto valor relacionado con el desplazamiento por paso ( ). En este caso como se puede ver en la figura 40, la distancia a tener en cuenta para esta decisión es d4. Con la utilización de la ecuación de la recta (33), se determina el valor de la distancia ,

(36)

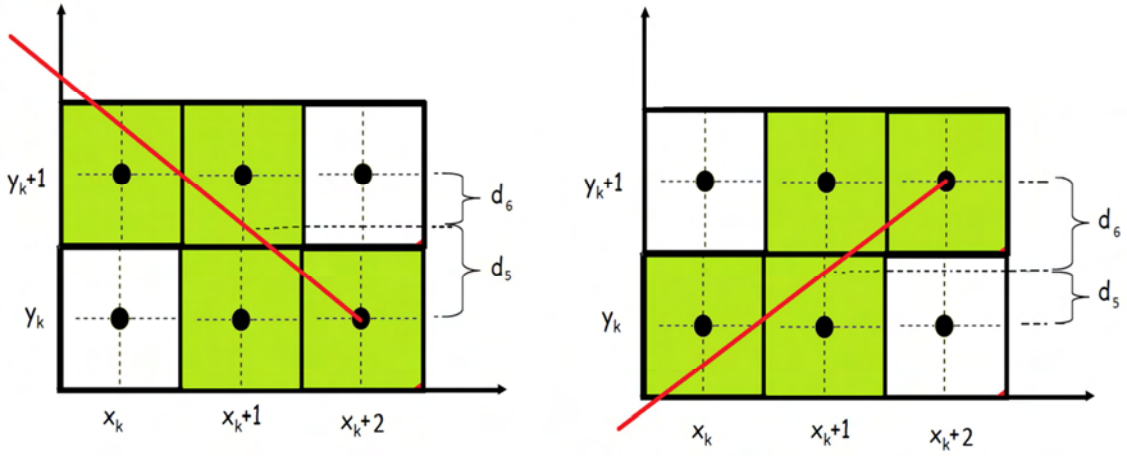
Si la distancia ( ) no supera el valor relacionado con el desplazamiento del motor por medio paso, el desplazamiento siempre va a ser sobre el eje Y (eje prioritario).

Cuando se dan las condiciones para un desplazamiento sobre el eje no prioritario (eje X), debe ser seguido inmediatamente por un medio paso en el eje prioritario (Y). Y se continúa con el mismo procedimiento de análisis para determinar los pasos sobre los ejes [6], [7], [8], [9] y [10].

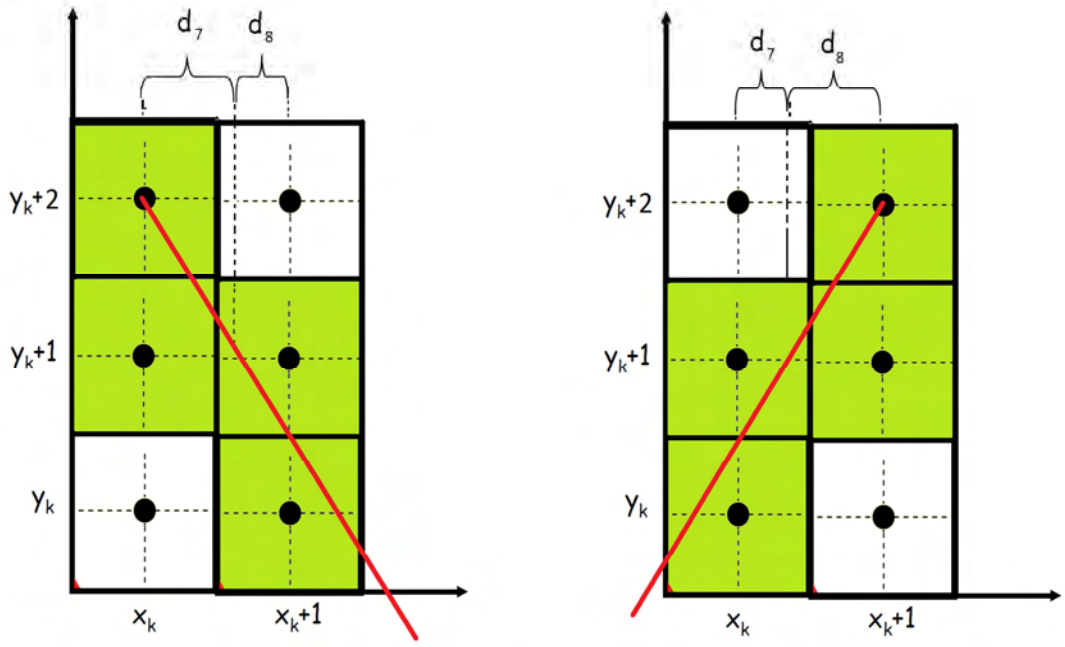
7.3 DESPLAZAMIENTO CON OTRAS PRIORIDADES.

Teniendo en cuenta las consideraciones descritas anteriormente se generan los pasos tanto en el eje X como en el eje Y, dependiendo de la prioridad y el cuadrante sobre el cual se traza la línea. A continuación se muestra la gráfica que describe los movimientos faltantes con su respectiva prioridad y cuadrante donde se realice.

Figura 41. Prioridades negativas y sus cuadrantes. a) Prioridad en X – Cuadrante I b) Prioridad en X – Cuadrante III, c) Prioridad en Y – Cuadrante IV, d) Prioridad en Y – Cuadrante III



a) b)



c) d)

En la siguiente tabla se muestra la Ecuación de distancia que se debe tener en cuenta para la comparación y toma de decisión de generación de pasos.

Tabla 15. Ecuaciones de Distancia en los ejes

PRIORIDAD	CUADRANTE	DISTANCIA REFERENCIA	
-X	II	d5 =	$m(x_k + 1) + b - y_k$
-X	III	d6 =	$y_k + 1 - m(x_k + 1) - b$
-Y	III	d8 =	$(x_k + 1) - \frac{(y_k + 1) + b}{m}$
-Y	IV	d7 =	$\frac{(y_k + 1) + b}{m} - x_k$

En el caso de no presentarse prioridad (NA), que es cuando la pendiente de la recta es igual a 1 y -1, tal como se señala en la tabla 9, puede seleccionarse cualquiera de las dos formas para la tabulación de la recta, ya sea con variable independiente X o Y. Dependiendo de cuál ecuación sea la seleccionada, se debe escoger el valor de la distancia a utilizar tal como se realizó en los casos anteriores.

Con lo descrito hasta el momento es posible identificar el valor de distancia de referencia, al momento de generar pasos en los ejes X y Y, dependiendo de la prioridad y del cuadrante.

Tabla 16. Distancia de Referencia

PRIORIDAD	CUADRANTE	DISTANCIA REFERENCIA
X	I	d1
	IV	d2
Y	I	d3
	II	d4
´-X	II	d5
	III	d6
´-Y	III	d8
	IV	d7

De esta manera se establecen las condiciones necesarias para elaborar el algoritmo en el proceso de generación de señales para el control de los pasos de los motores encargados del movimiento en los ejes [6], [7], [8], [9] y [10].

7.4 GENERACIÓN DE RUTAS

Una vez obtenida la información del objeto, se debe procesarla para obtener las diferentes rutas por donde se debe hacer la disposición de plástico. Para esto se hace uso del algoritmo de la recta descrito anteriormente.

Como se puede observar existe información en las coordenadas de los puntos tanto positiva como negativa, esta situación presenta inconvenientes en los procesos posteriores más específicamente al acoplarlo con el espacio físico de trabajo de la máquina, por tal motivo se la pasa a valores positivos.

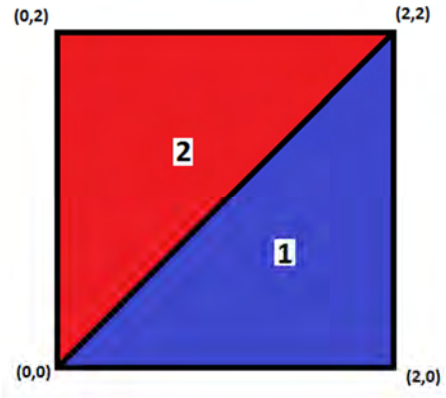
7.4.1 Ruta Externa. El análisis de la información se lo realiza capa por capa, en primer lugar se analizara la información de la capa inicial (inferior), en este caso se toma los triángulos cuya coordenada en el eje Z sean iguales y correspondan a dicha capa. Tomando como ejemplo el cubo analizado anteriormente y una vez realizado el cambio a valores positivos se tiene los siguientes triángulos a analizar (triángulos primera capa)

vertex 2.000000 2.000000 -0.000000
vertex 2.000000 -0.000000 -0.000000 Triángulo1
vertex -0.000000 -0.000000 -0.000000

vertex -0.000000 -0.000000 -0.000000
vertex -0.000000 2.000000 -0.000000 Triángulo2
vertex 2.000000 2.000000 -0.000000

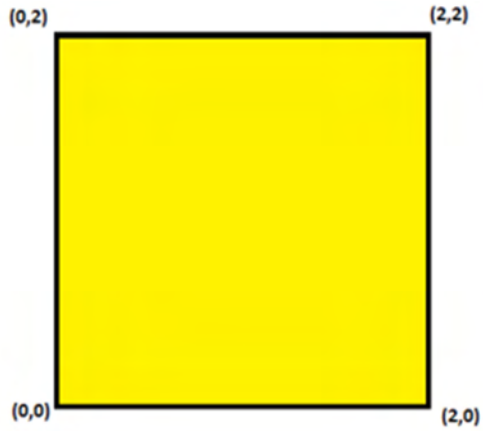
Como se puede ver el valor de Z en todos los puntos es igual y es de 0, este es el valor más bajo de Z y por tanto corresponden a la capa inferior. Para este caso se puede tomar dos dimensiones (X, Y). De esta manera se tiene que en la capa inferior consta de 6 líneas [6], [7] y [8].

Figura 42. Líneas en la parte inferior de un cubo



Con el fin de obtener la ruta externa de la primera capa del objeto se decide eliminar las líneas centrales (líneas que comparten los dos triángulos). Haciendo esto se logra una ruta con cuatro líneas,

Figura 43. Líneas de la ruta Externa de un Cubo



Para alcanzar este objetivo es necesario seguir puntos con coordenadas en los tres ejes, por tal motivo es necesario implementar la ecuación de la recta en el espacio.

- Ecuación de la recta en el espacio. Dada la forma de entregar la información el programa CAD es necesario la construcción de líneas en el espacio (IR□), para esto se desarrolla un algoritmo el cual calcule la forma vectorial y

paramétrica de dicha ecuación haciendo uso de dos puntos en el espacio, estos puntos son dados por dos vértices de un triangulo [6], [7] y [8].

Forma vectorial. Esta dada por la siguiente ecuación.

$$r = r_0 + tv \tag{37}$$

Donde, t pertenece a los Reales

$r_0 = < x_0 , y_0 , z_0 >$; Es un punto inicial conocido.

v= Es un vector que va desde el punto inicial al punto final,

$$v = < x_f - x_0 ; y_f - y_0 ; z_f - z_0 > \tag{38}$$

x_0, y_0, z_0 = Coordenadas del Punto inicial.
x_f, y_f, z_f = Coordenadas del Punto final.

Haciendo,

$$a = x_f - x_0; b = y_f - y_0; c = z_f - z_0 \tag{39}$$

Se obtiene la Ecuación Paramétrica.

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + at \\ y(t) &= y_0 + bt \\ z(t) &= z_0 + ct \end{aligned} \tag{40}$$

Para obtener los puntos en cada nivel, de $z(t)$se despeja t, y se obtiene,

$$t = \frac{z(t) - z_0}{c}$$

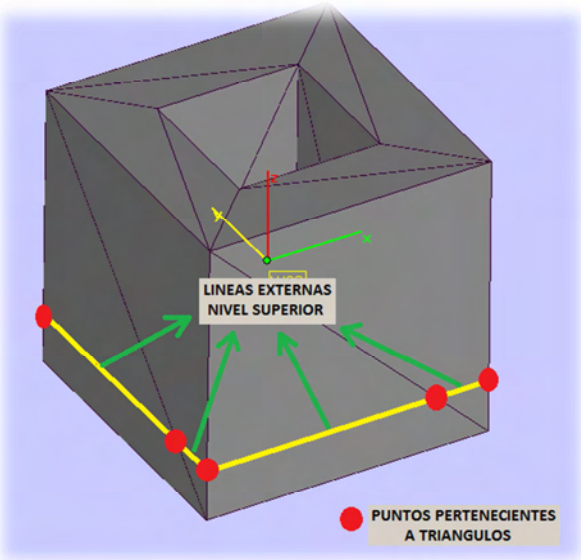
Con el fin de obtener la ruta externa del objeto se analizan los triángulos que están en forma vertical (no los de la primera capa), estos tienen información con la cual es posible obtener coordenadas en el eje Z a medida que se incrementa el nivel. En este caso como se conoce el valor de $z(t)$, que es el valor del diámetro de la punta del extrusor (De), (valor que sube por capa), Se puede obtener el valor de t. Luego con este dato se obtiene los valores de las coordenadas de $x(t)$ y $y(t)$ en este punto.

- Construcción de líneas Externas. Haciendo uso de la ecuación paramétrica de la línea en el espacio y de los triángulos verticales, se obtienen puntos sobre

un nivel (n) en el eje Z, el primer nivel corresponde al valor de la punta del extrusor.

Una vez se obtienen los puntos, se identifica si existen dos puntos sobre este nivel que pertenezcan al mismo triangulo, de ser afirmativo se traza una línea teniendo como coordenadas inicial y final a estos puntos, de esta manera se encuentran las líneas externas. Como se puede observar todos los puntos encontrados en un determinado nivel van a tener la misma coordenada Z, lo cual significa que están sobre una capa. Se puede trazar estas líneas tomando solamente las coordenadas en X y Y. para la generación de pasos sobre los ejes y poder seguir la ruta indicada por la línea se utiliza el algoritmo señalado en la sección desplazamiento sobre ejes.

Figura 44. Líneas externas de capas

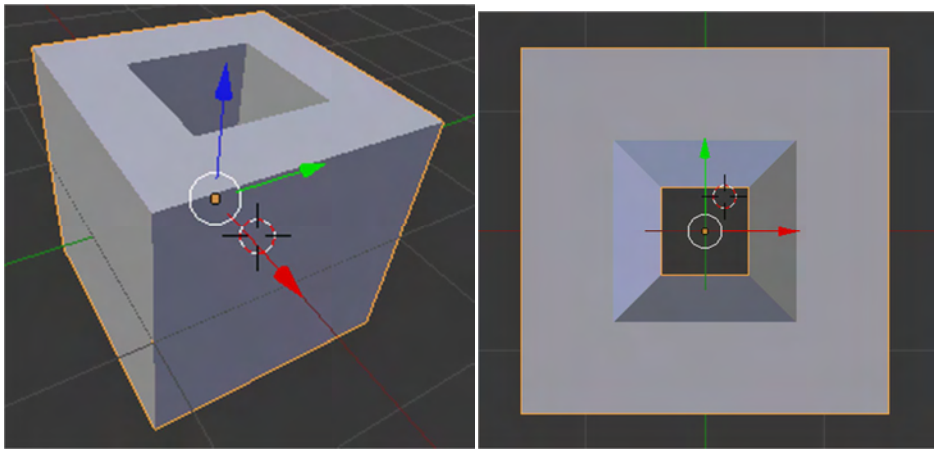


Con este mismo procedimiento se logra obtener la ruta externa de cualquier objeto que se vaya a materializar.

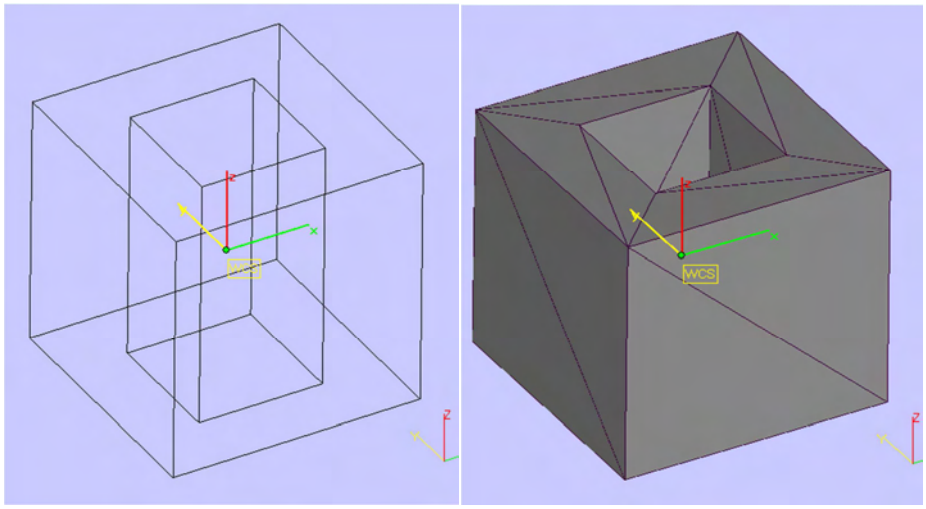
7.4.2 Rutas Internas. En algunos objetos es necesario dejar espacios huecos, por lo que se debe calcular rutas internas las cuales determinen el límite por donde se va a depositar el hilo de plástico. El cálculo de rutas internas es similar al realizado con las rutas externas, ya que para obtener las rutas se analizan la totalidad de los triángulos.

A continuación se muestra una gráfica donde se presenta esta situación.

Figura 45. Objeto con Espacios vacios. a) Vista lateral del objeto diseñado b) Vista superior del objeto diseñado, c) Líneas externas e internas d) Objeto con triángulos



a) b)



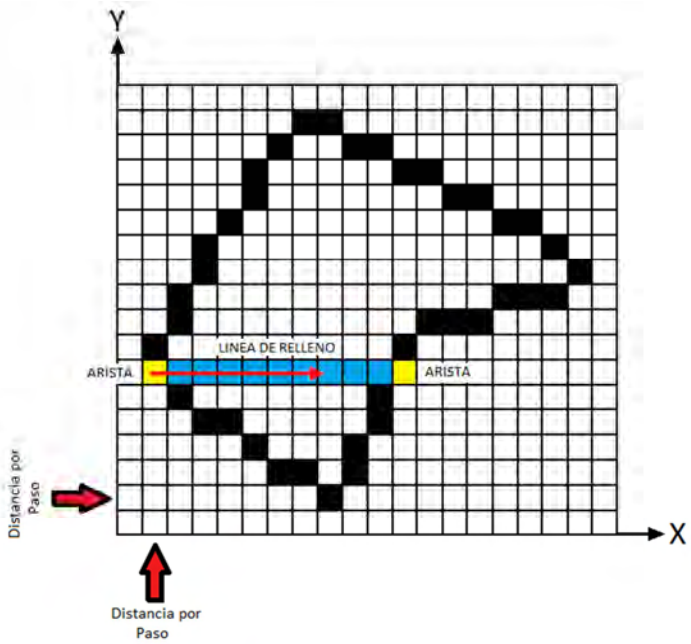
c) d)

Como se puede observar en la figura d, cuando se presentan espacios vacios se incrementan en forma considerable el numero de triángulos a analizar, por cuanto en estas condiciones el procesamiento de la información se vuelve mucho mas dispendioso y demorado, además que es susceptible la generación de ciertas inconsistencias, como por ejemplo obtener triángulos muy pequeños cuyas coordenadas sea muy cercanas, y dada la resolución no sea posible su análisis. En este caso el programa de diseño genera 32 triángulos.

7.5 RELLENO

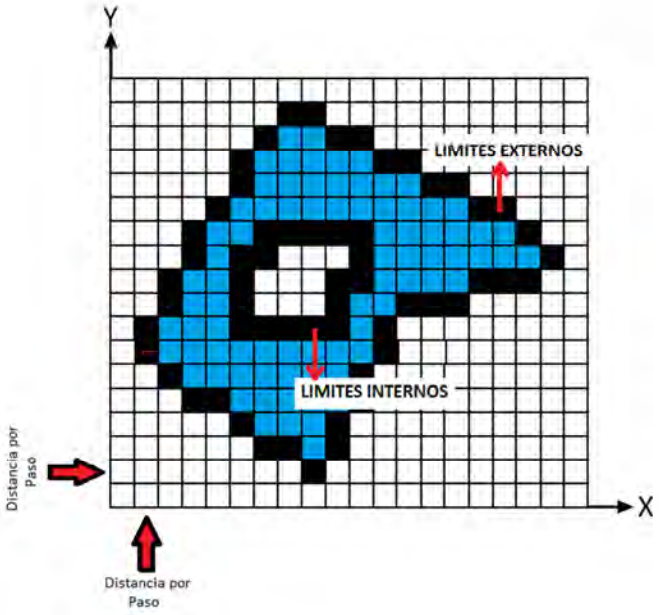
Para la obtención de un objeto capa a capa, siempre se va a encontrar áreas cerradas las cuales se deben rellenar, en este caso con plástico ABS. Para hacer dicho relleno se tiene en cuenta el algoritmo de “scan-line”, aunque es un algoritmo de relleno de color de una matriz de pixeles, se tiene en cuenta para la toma de decisiones en la generación de líneas internas para la deposición de plástico y así rellenar el área de cada capa. Para hacer este proceso se hace ciertas variaciones al algoritmo con el fin de que pueda ser usado y funcione apropiadamente con el objeto de obtener los resultados deseados en los desplazamientos en los ejes. Fila a fila se va siguiendo líneas entre las aristas, que en este caso están determinadas por las rutas externas e internas definidas para los objetos que se desean obtener. Una vez se identifican los extremos de relleno, se determina líneas entre estos puntos [6], [7], [8] y [9].

Figura 46. Línea de escaneo sobre dos aristas



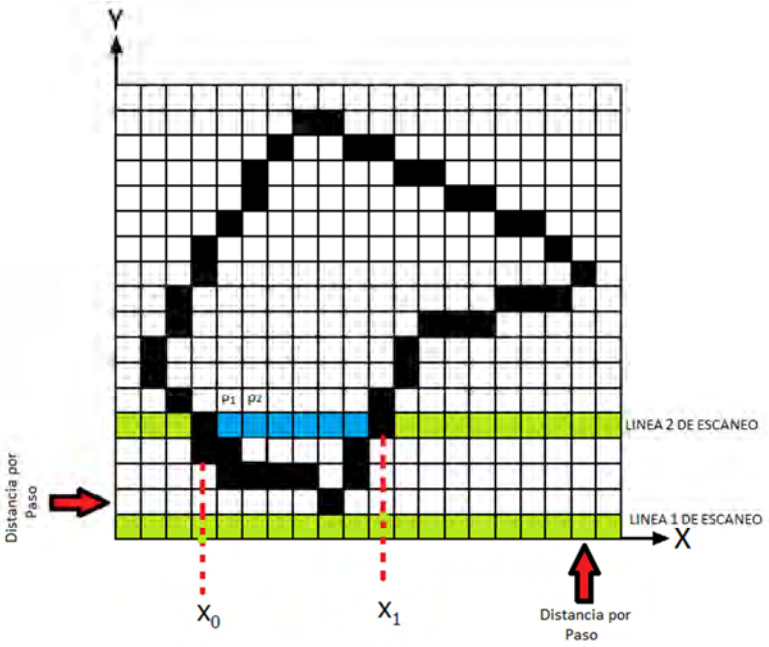
En primer lugar se crea un área, la cual está determinada por los limites externos de la figura a prototipar, para ello se hace uso de una función en 2D de java, en el caso de existir limites internos se genera un área con estos límites, y luego se hace una operación de intercepción entre las dos áreas encontradas y se elimina el resultado obtenido. Con la realización de este proceso se eliminan los espacios vacios si existieran en una figura, y se identifica plenamente el área a rellenar.

Figura 47. Área de relleno



Para determinar los puntos que se necesitan rellenar se realiza un escaneo punto a punto siguiendo una línea horizontal o vertical según sea el caso, con el fin de identificar si el punto analizado está dentro del área de relleno identificada anteriormente.

Figura 48. Puntos de una línea de Relleno

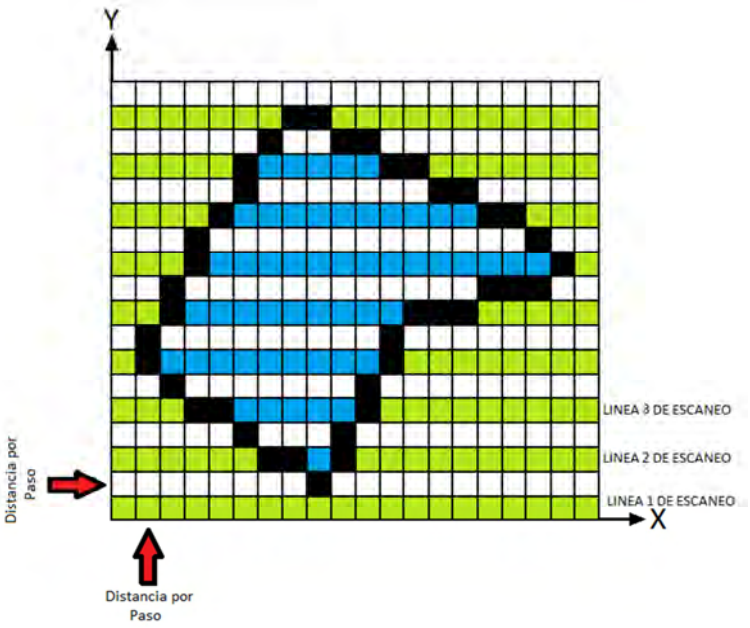


Este proceso se realiza escaneando la totalidad del área siguiendo líneas horizontales. Como se puede ver en la figura 48, sobre la línea de escaneo 1 no se encuentra puntos que estén dentro del área a prototipar, ósea que no existen puntos de relleno. En la línea 2 de escaneo, se encuentra 6 puntos que están dentro del área a prototipar, los cuales deben formar una línea de relleno. Es así como se encuentra la totalidad de las líneas que conforman el relleno en una determinada capa.

Los puntos encontrados antes de llegar al punto , no pertenecen al área del objeto. Desde el punto hasta el punto , pertenece al objeto, y por tanto se debe rellenar. De en adelante no hace parte del objeto y no se debe rellenar. Así se determinan los espacios de relleno dentro del área de un objeto.

Una vez encontrado un punto (P1) el cual debe ser rellenado, se verifica si existe otro punto (P2) pero en este caso corrido en un eje (X o Y dependiendo del caso a analizar) un valor igual a la resolución de distancia por paso (Rp), y se verifica además si este punto no pertenece a otra línea, de ser así se adiciona esta coordenada para luego formar una línea de relleno, de esta manera se va sumando uno a uno los puntos hasta llegar al punto final.

Figura 49. Líneas de relleno en una capa

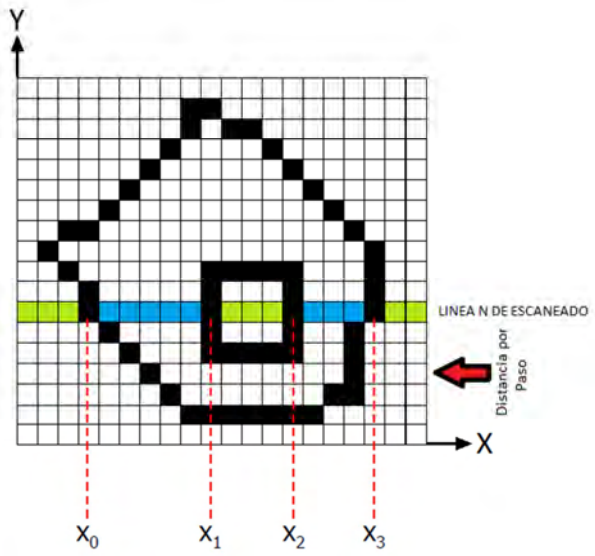


Las líneas de relleno se las realiza sobre los ejes de manera intercalada a medida que va subiendo de nivel. La primera capa se la realiza sobre el eje X, la segunda sobre el eje Y, y así sucesivamente. El relleno se lo realiza con hilo de 1mm de diámetro, y se deja un espacio sin rellenar de la misma distancia, se hace esto

para ahorrar materia prima, y tiempo de fabricación dejando una especie de malla en cada capa.

Para el caso en el cual se encuentran huecos internos el análisis para el relleno es el siguiente,

Figura 50. Relleno de Objetos con espacios vacios



Siguiendo la línea de escaneado los puntos encontrados antes de llegar al punto , no pertenecen al área del objeto. Desde el punto hasta el punto , pertenece al objeto, y por tanto se debe rellenar, desde hasta no se debe rellenar, desde hasta , se debe rellenar, y desde , en adelante no hace parte del objeto y no se debe rellenar. De esta manera se determinan tanto espacios de relleno como espacios vacios dentro del área de un objeto.

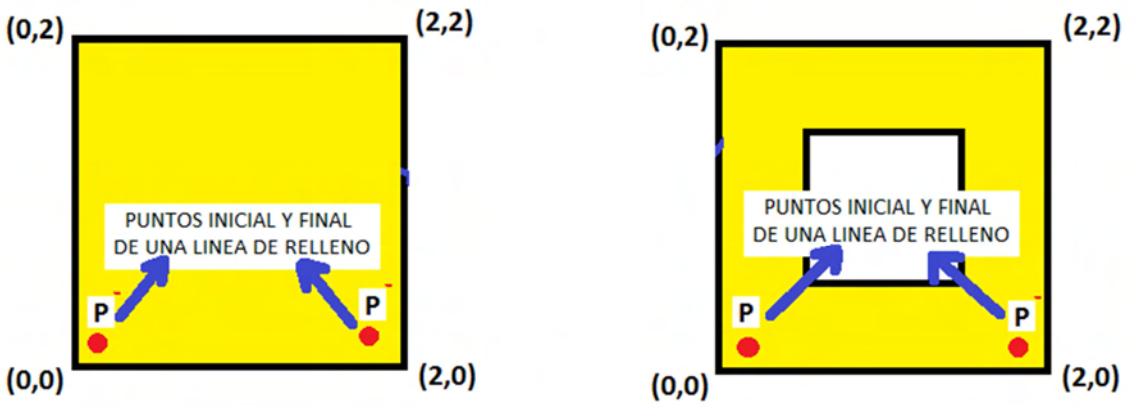
Para determinar las líneas necesarias para el relleno se verifica las intersecciones de la línea de barrido (escaneo) y las aristas del objeto, que en este caso son las líneas externas e internas del objeto, antes definidas. En la primera intersección empieza el área a rellenar, hasta la segunda. De la segunda intersección, hasta la tercera es vacio. De la tercera a la cuarta es área de relleno y así sucesivamente las veces que haya intersección. Cuando no existen rutas internas se entiende que toda el área dentro de las líneas del borde externo debe ser rellenada.

Hasta el momento los puntos a rellenar están identificados pero no se ha determinado que líneas se deben trazar para lograr dicho objetivo. El siguiente paso es utilizar la ecuación de la línea descrita en el apartado anterior para calcular los pasos que se deben generar tanto en el eje X como en el eje Y usando

las coordenadas de las intersecciones de la línea de rastreo con las líneas externas e internas que definen el objeto.

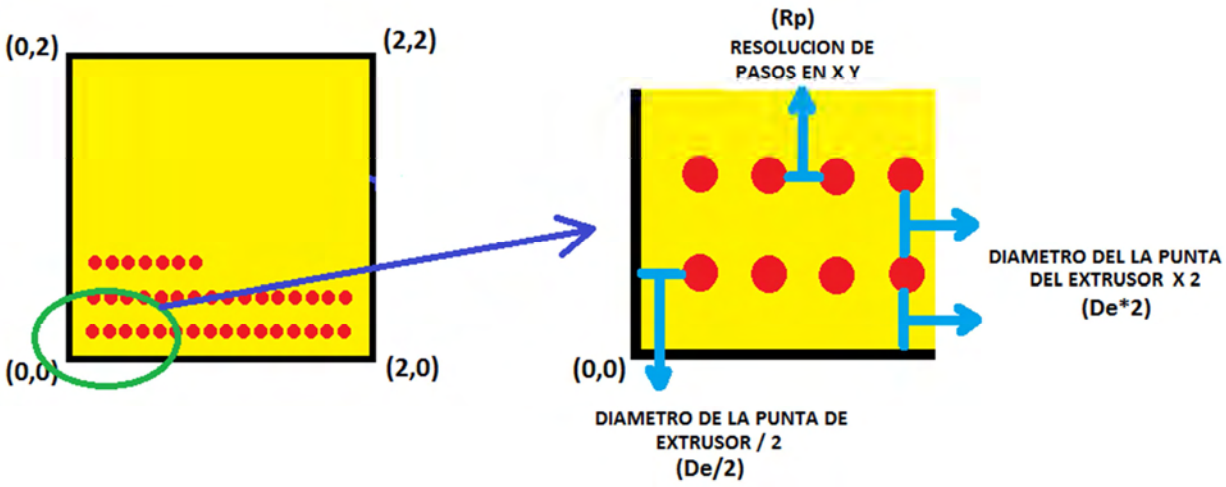
7.5.1 Calculo de Líneas de Relleno. Las líneas de relleno no deben empezar exactamente sobre las intercepciones, debido a que sobre este punto ya se ha depositado material plástico, lo cual ocasionaría una aglomeración de material y habría deformación del objeto. Por tal razón hay que tener ciertas consideraciones al identificar el punto inicial y final de cada línea de relleno.

Figura 51. Puntos Inicial y Final de Líneas de Relleno



La distancia entre cada punto P se la determina de acuerdo a la resolución de distancia recorrida en cada paso en los ejes X y Y. La distancia entre líneas se la determina de acuerdo al diámetro de la punta del extrusor, así como también la distancia de las líneas externas e internas con las líneas de relleno.

Figura 52. Espacios entre puntos y líneas Externas e Internas



7.5.2 Relleno Paralelo a Eje X. Se toma el punto con coordenada más baja sobre el eje Y (Y_k), a esta coordenada se le adiciona el valor del diámetro de la punta del extrusor multiplicado por 2. Con las condiciones descritas el valor a incrementar es de dos milímetros ($2mm$). Por tanto la coordenada Y del punto inicial de la primera línea de relleno corresponde a,

$$(Y_k + (D_e * 2)) \tag{41}$$

Para determinar la coordenada inicial en el eje X, a la coordenada más baja sobre este eje se le hace un incremento de la mitad del diámetro de la punta del extrusor, con el fin de que la nueva línea se intercepte con la líneas externas e internas, la coordenada del eje X será,

$$(X_k + (D_e/2)) \tag{42}$$

De esta manera las coordenadas del punto inicial de la primera línea de relleno corresponden a ($X_k + (D_e/2)$, $Y_k + (D_e * 2)$). Luego se verifica si existe un punto con la misma coordenada sobre el eje Y, pero corrido un valor de la resolución de distancia por paso sobre X (Rp), que cumpla las condiciones para hacer parte de la línea de relleno, asi el siguiente punto de desplazamiento corresponde a las coordenadas $(X_k + (D_e/2)$ + Rp ;$Y_k + (D_e * 2))$, de esta manera será el desplazamiento sobre el eje X para formar una línea de relleno paralela a dicho eje. Aquí las coordenadas de los puntos en el eje Y son las mismas, pero las del eje X se van incrementando (1Rp, 2Rp,3Rp, 4Rp, 5Rp……. …..nRp).

La coordenada máxima sobre el eje X tendrá el siguiente valor,

$$(X_k + nRp) \tag{43}$$

Donde X_k representa el valor más bajo sobre el eje, y(nRp) es el valor de la resolución por paso en el eje n veces (número de veces necesarias para llegar a dicho punto).

Se puede tener la siguiente consideración para establecer la coordenada final de la línea de relleno: En este caso con las características físicas de la máquina se puede establecer que (D_e=10Rp). Puesto que D_e=1mm, y $Rp = 0.1.1mm$.

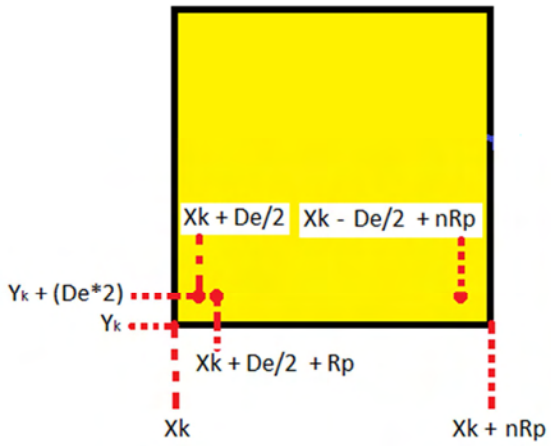
El punto final de la primera línea de relleno tendrá las siguientes coordenadas $(X_k + nRp - (D_e/2))$, utilizando la relación de diámetro del extrusor y resolución de desplazamiento de pasos se tiene que la coordenada final está dada por,

$$(X_k + (n-5)Rp) \tag{44}$$

De esta manera las coordenadas del punto final de la línea de relleno están dadas por,

$$(X_k + (n-5)Rp \ ; Y_k + 20Rp \ ) \tag{45}$$

Figura 53. Coordenadas de la línea de Relleno paralela a X

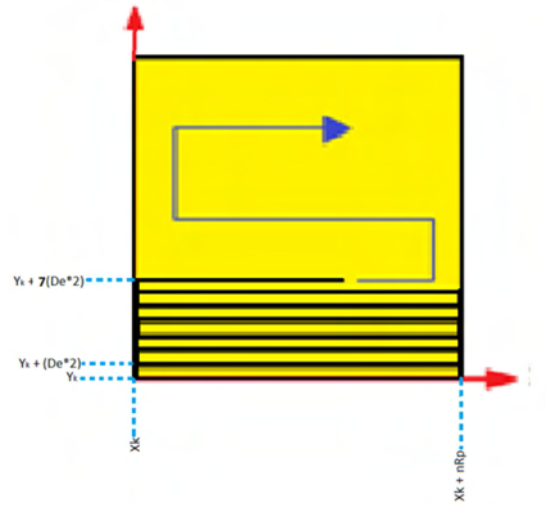


Una vez determinada la primera línea de relleno se sigue el mismo procedimiento para la segunda, tercera y así sucesivamente hasta la línea de relleno n.

Para la segunda line se debe hacer un incremento en las coordenadas del eje Y, en un valor igual al doble del diámetro de la punta del extrusor (De*2), las coordenadas de X se calculan de la misma forma como se realizó en la primera línea [6], [7], [8], [9] y [10].

En el siguiente grafico se muestra la formación de las líneas de relleno.

Figura 54. Líneas de relleno paralelas al eje X



7.5.3 Relleno Paralelo a Eje Y. El proceso es similar al realizado con el relleno en el eje X, se encuentra la coordenada más baja sobre el eje X (X_k), y se le incrementa el valor del diámetro de la punta del extrusor multiplicado por 2, con el fin de que esta línea de relleno este separada una distancia igual al diámetro de la punta del extrusor, con relación a las líneas externas del objeto. Para determinar la coordenada en Y del primer punto de la línea de relleno se selecciona la coordenada más baja sobre el eje (Y_k) y se le hace un incremento de la mitad del diámetro de la punta del extrusor. Por lo tanto las coordenadas del punto inicial de la primera línea de relleno estan dadas por,

$$(X_k + (D_e * 2) \ ; \ Y_k + (D_e/2) \tag{46}$$

En este caso como se desea obtener líneas de relleno paralelas al eje Y, se verifica si existe un punto con la misma coordenada sobre el eje X, pero corrido un valor de la resolución de distancia por paso sobre Y, tal que cumpla las condiciones para hacer parte de la línea de relleno, de esta manera el siguiente punto de desplazamiento corresponde a las coordenadas $(X_k + (D_e * 2)$;$Y_k + (D_e/2)$+ Rp), de esta manera será el desplazamiento sobre el eje Y para formar una línea de relleno paralela a dicho eje. Aquí las coordenadas de los puntos en el eje X son las mismas, pero las del eje Y se van incrementando para encontrar los puntos (1Rp, 2Rp, 3Rp, 4Rp, 5Rp……. …..nRp).

La coordenada máxima sobre el eje Y tendrá el siguiente valor,

$$(Y_k + nRp) \tag{47}$$

Donde Y_k representa el valor más bajo sobre el eje, y (nRp) es el valor de la resolución por paso en el eje n veces (número de veces necesarias para llegar a dicho punto).

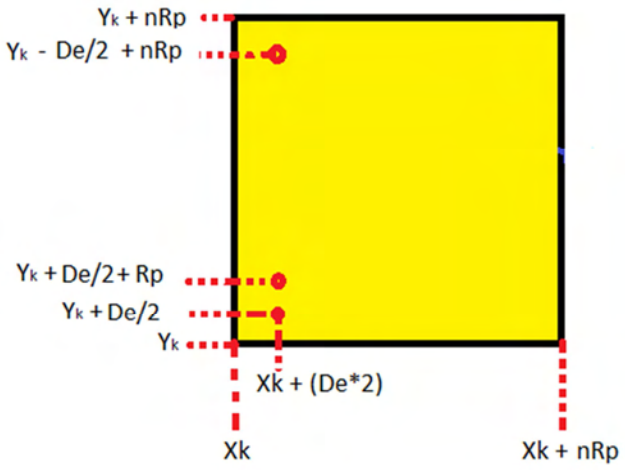
El punto final de la primera línea de relleno tendrá las siguientes coordenadas $(Y_k + nRp - (D_e/2))$, utilizando la relación de diámetro del extrusor y resolución de desplazamiento de pasos se tiene que la coordenada final está dada por,

$$(Y_k + (n-5)Rp) \tag{48}$$

De esta manera las coordenadas del punto final de la línea de relleno están dadas por,

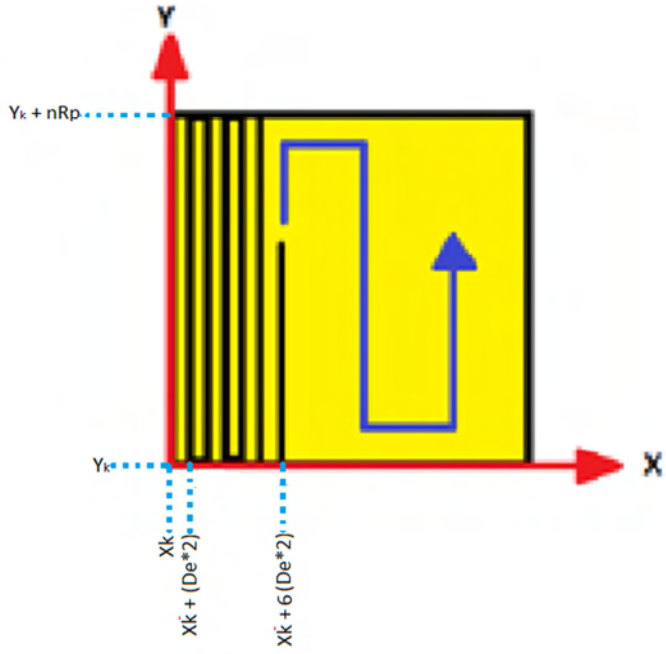
$$(X_k + 20Rp;Y_k + (n-5)Rp)) \tag{49}$$

Figura 55. Coordenadas de la línea de Relleno paralela a Y



Las siguientes líneas de relleno paralelas al eje Y se realizan siguiendo los mismos pasos tal como se hace la primera línea [6], [7], [8], [9] y [10]. En el siguiente grafico se muestra la formación de todas las líneas de relleno.

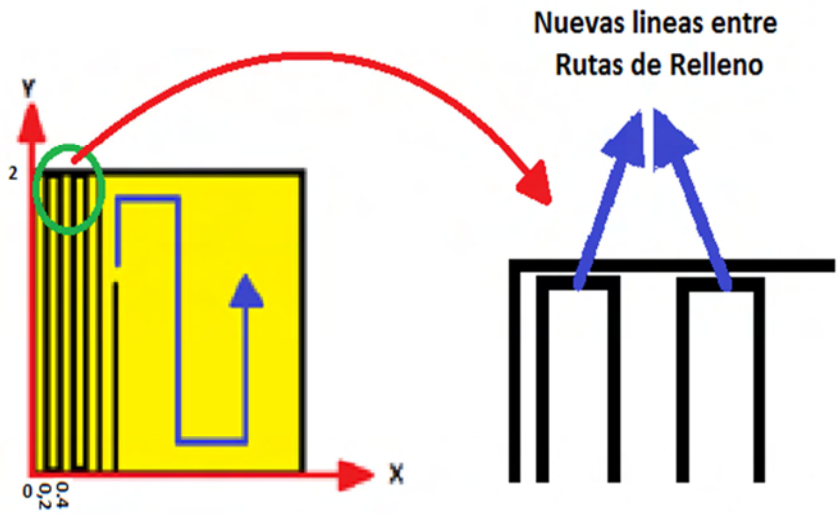
Figura 56. Líneas de relleno paralelas al eje Y



7.5.4 Líneas Perpendiculares de Relleno. Con el objeto de hacer una ruta de relleno más uniforme se realiza la creación de unas nuevas líneas de relleno, las

cuales unen cada una de las líneas de relleno paralelas a los ejes, obtenidas anteriormente.

Figura 57. Líneas perpendiculares



A continuación se describe algunas características de estas nuevas líneas tomando como ejemplo el relleno paralelo al eje Y, Las coordenadas del punto inicial de esta nueva línea corresponden a las coordenadas del punto final de la primera línea de relleno,

(50)

Y las coordenadas del punto final de la nueva línea corresponden a las coordenadas del punto final de la segunda línea de relleno,

(51)

Con estos parámetros se determina la primera nueva línea que une dos líneas de relleno antes encontradas. Una segunda nueva línea está determinada por las siguientes coordenadas, punto inicial igual al punto inicial de la segunda línea de relleno,

(52)

Y punto final igual al punto inicial de la tercera línea de relleno,

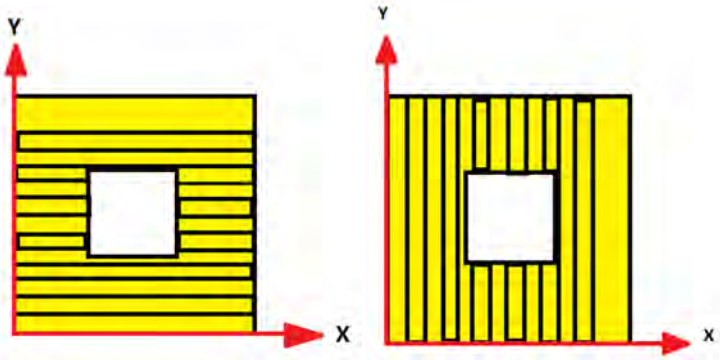
(53)

De esta manera se crean estas nuevas líneas tanto en el relleno paralelo al eje X como para el relleno paralelo al eje Y. para determinar los pasos que se deben dar se utiliza la generación de pasos antes descrita [6], [7], [8], [9] y [10].

7.5.5 Relleno para Diseños que presentan Huecos. El procedimiento es similar al llevado a cabo en objetos que no presentan huecos, aquí las líneas de relleno en ocasiones se pueden extender desde y hasta un punto en las líneas externas del objeto o también se pueden extender desde un punto en las líneas externas, hasta un punto en las líneas internas. Con estas combinaciones se logra el relleno para objetos que presentan huecos.

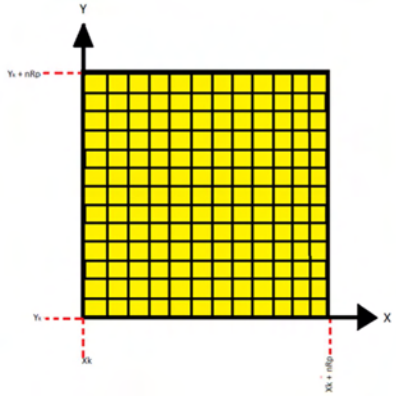
Aquí también se generan unas nuevas líneas con el fin de unir las diferentes líneas de relleno antes encontradas.

Figura 58. Relleno para Diseños Huecos



7.5.6 Incremento de Capas. Una vez se concluya una capa tanto en sus líneas externas, internas y de relleno, se genera la orden para que se haga un incremento en el eje Z igual al valor del diámetro de la punta del extrusor, con el fin de continuar con la siguiente capa. Como ya se menciono (paralelos al eje X y Y, de manera intercalada).

Figura 59. Relleno de varias capas

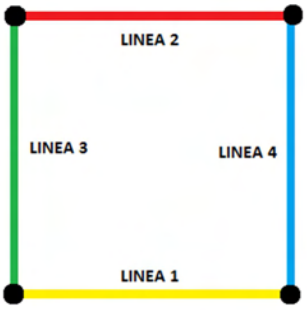


En la figura 59 se muestra como es el relleno por lo menos con dos capas, este forma una especie de rejilla, es posible realizar el relleno sin dejar espacios vacios entre cada línea de relleno, para esto simplemente se debe cambiar en el algoritmo la distancia de separación entre líneas (en este caso se establece igual al valor del diámetro de la punta del extrusor (De)), se hace el relleno de esta manera para ahorrar material utilizado en la fabricación y tiempo.

7.6 ORGANIZACIÓN DE LÍNEAS.

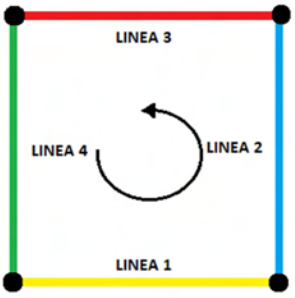
Las líneas externas e internas obtenidas se encuentran en forma desordenada, por tal motivo al momento de seguir la ruta, ésta queda entrecortada y se generan desplazamientos innecesarios, existiendo pérdida de tiempo y además la deposición de plástico sobre la superficie no se realiza de forma uniforme. Esto se presenta básicamente por la forma como el programa CAD 3D entrega la información.

Figura 60. Rutas con líneas desordenadas



Por tal motivo es necesario unir estas líneas en una sola ruta, de tal manera que el punto final de la línea 1 corresponda al punto inicial de la segunda línea, el punto final de la segunda línea corresponda al punto inicial de la tercera línea, y así hasta que el punto final de la última línea corresponda al punto inicial de la primera línea.

Figura 61. Ruta con líneas ordenadas



De esta manera se consigue una ruta uniforme y se optimiza el desplazamiento al momento de la deposición del plástico. La ruta puede ser dada en sentido horario, o sentido anti horario, esta situación se presenta por la entrega de la información del programa de diseño.

7.7 ENVIÓ DE INFORMACIÓN PARA DESPLAZAMIENTO

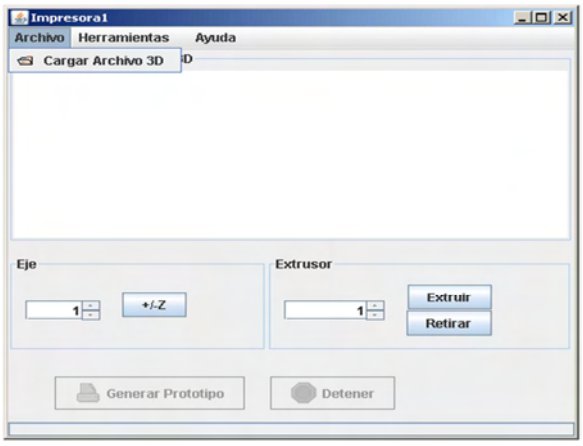
Hasta este momento se tiene una serie de rutas tanto externas, internas y de relleno, estas rutas están compuestas por líneas y a su vez estas líneas están compuestas por puntos, y estos puntos tienen coordenadas en el espacio. Para generar los movimientos en los diferentes ejes desde el PC se envía señales de control al circuito electrónico maestro, el cual se encarga de producir las señales necesarias para que los motores se energicen y produzcan un movimiento.

Con la información que se tiene de la resolución de desplazamiento por paso en los ejes X,Y y Z , los puntos de las líneas y la conversión de unidades del programa CAD a distancia en el sistema métrico, se generan las señales de control en el PC . por ejemplo si se desea un desplazamiento sobre el eje X en 1cm, y con la resolución de desplazamiento de 0.101mm por paso, el motor debe dar 99 pasos, entonces el software manda esta información al circuito electrónico maestro. De esta manera se hace la conversión de coordenadas a pasos en los motores.

8. INTERFACE DE USUARIO DEL PROGRAMA

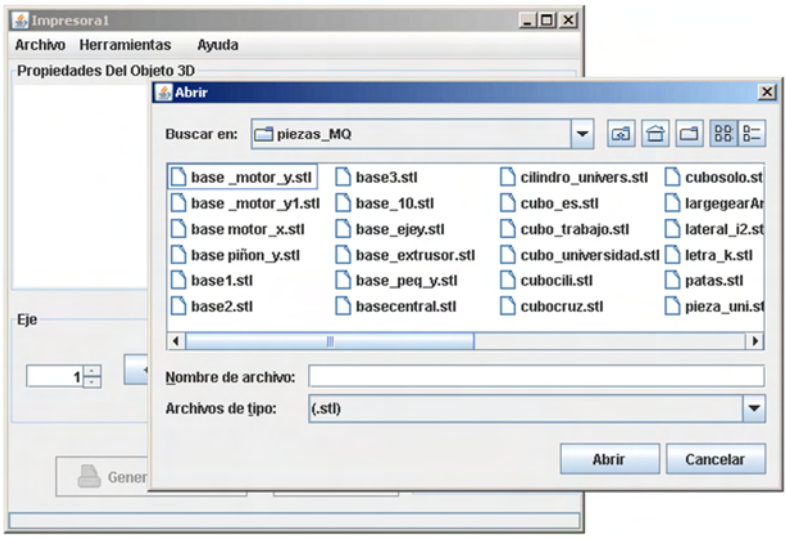
A continuación se presenta la interface de usuario del programa de la impresora, la cual permite cargar, analizar y mandar a “imprimir” el objeto diseñado. También permite generar pasos en el eje Z, así como en el extrusor de material. La aplicación aparece con el nombre de “Impresora1”

Figura 62. Interface de usuario



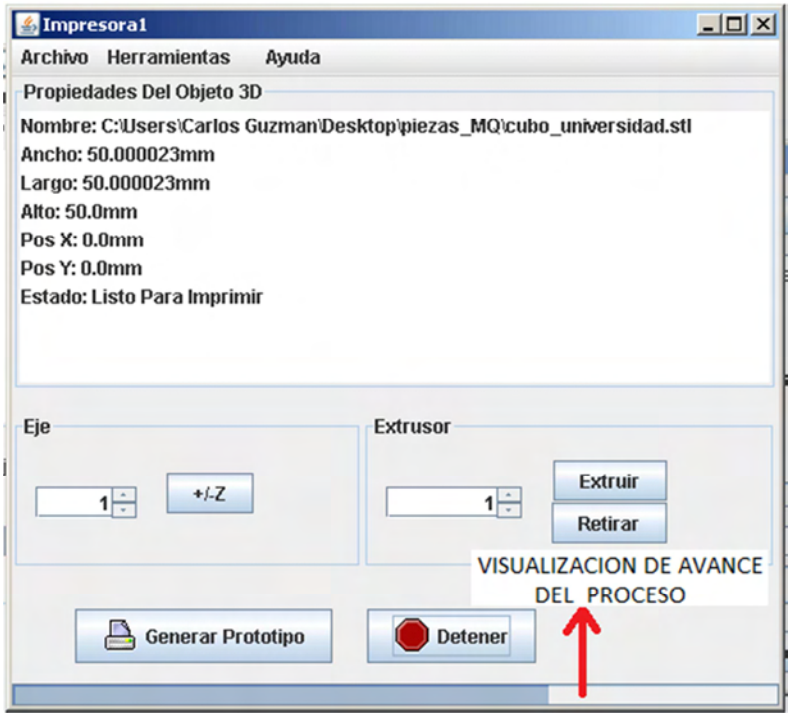
A través de la ruta Archivo, se despliega la opción “Cargar Archivo”, la cual permite cargar el archivo STL de un objeto cualquiera.

Figura 63. Cargar archivo



Como se puede observar en la figura 63, para cargar el archivo se debe dirigir a la ruta donde previamente fue guardado. Se puede seleccionar el deseado en la lista y luego se da la opción abrir. Si la ruta no es la correcta se puede dar la opción cancelar y empezar el proceso.

Figura 64. Análisis de la Información

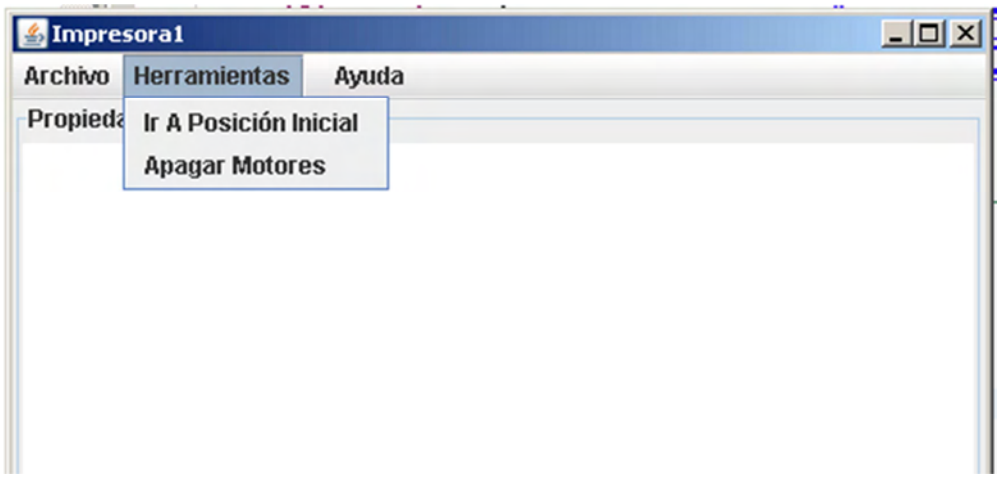


Una vez se abre el archivo, el análisis de la información empieza. En el recuadro “Propiedades del Objeto” aparecen algunas características de medida, como ancho, largo y alto, también aparece la ruta de donde se cargo el archivo. A medida que se realiza el análisis se indica el avance mediante una barra. En este punto se activan las opciones de generar pasos en eje Z, y en el extrusor, así como también se activan las opciones de “Generar Prototipo” y “Detener”.

Figura 65. Mensaje de terminación de análisis

Una vez el análisis ha terminado aparece el mensaje “Level has been Generated”. Luego se puede dar la opción “Generar prototipo” para empezar el proceso y que la máquina materialice el objeto. Si se desea parar el proceso el algún punto se puede dar la opción “Detener”.

Figura 66. Opciones de Manejo



La interface también ofrece otras opciones siguiendo la ruta Herramienta, aquí se despliegan dos opciones.

- Ir a posición inicial = el extrusor se dirige a una dirección preestablecida como inicial sobre los ejes X y Y.
- Apagar Motores = Mediante esta opción se des-energiza los motores de la máquina, con el fin de evitar calentamiento y consumo de energía.

9. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

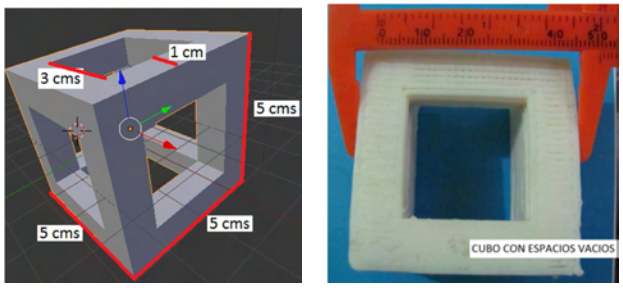
Este proceso se realizó con el fin de comparar e identificar si existe diferencia entre las medidas de un objeto diseñado en un programa CAD (BLENDER), y el objeto físico, obtenido en la máquina. Se uso dos objetos los cuales tienen formas básicas, pero que aportan información importante para dicho análisis.

Las medidas máximas que debe tener un objeto diseñado deben ser de 5cm en cada uno de las coordenadas, ya que éste es el máximo desplazamiento que ofrece la parte física de la máquina en los ejes.

9.1 CUBO

9.1.1 Forma y medidas. Se escoge esta figura ya que aporta y permite la toma de medidas de (ancho, largo y alto), de manera fácil sin ningún análisis adicional. Las dimensiones del cubo son de 5cm por lado, y con el fin de analizar conjuntamente la presencia de espacios vacios en el objeto, se deja sin rellenar 9cm ² en el centro y de altura la totalidad del espacio en el eje (z). Se deja el mismo espacio vacío en el eje X y eje Y.

Figura 67. Diseño de cubo vs Objeto fabricado. a) Diseño de cubo Hueco en BLENDER, b) Objeto Obtenido en la Máquina



a) b)

Como se puede ver en la figura 67, el diseño en BLENDER abarca cinco recuadros de su cuadricula, por lo tanto cada uno representa un centímetro. Se puede ver los espacios vacios en sus tres ejes.
Las medidas del objeto obtenido en su parte externa son:

- Ancho (eje X): 5.1cms
- Largo (eje Y): 5.1cms
- Alto (eje Z):4.9 cms

Ya que la figura presenta espacios sin relleno es posible hacer la medida de los huecos presentes así.

Tabla 17. Dimensión de los espacios

ESPACIO 1		ESPACIO 2		ESPACIO 3	
EJE X (cm)	EJE Y (cm)	EJE X (cm)	EJE Y (cm)	EJE X (cm)	EJE Z (cm)
2,9	2,9	2,95	2,95	3	3

ESPACIO 4		ESPACIO 5		ESPACIO 6	
EJE X (cm)	EJE Z (cm)	EJE Y (cm)	EJE Z (cm)	EJE Y (cm)	EJE Z (cm)
3	3	3	3	3	3

La diferencia máxima entre las medidas del objeto diseñado y el obtenido físicamente en su partes externas es de 0.1cms.

9.1.2 Cálculo de error. Se toma 5 medidas en lugares diferentes de la pieza por cada eje. Este proceso es realizado haciendo una medición directa sobre la pieza obtenida en la máquina. Con estas consideraciones se calcula el error absoluto para determinar así la diferencia entre los dos valores de medición, se usa la siguiente ecuación,

$$\text{Error Absoluto} = \text{Valor Medido} - \text{Valor Esperado} \tag{54}$$

Con el fin de determinar la precisión en la medida obtenida se encuentra también el error relativo, haciendo uso de la siguiente ecuación,

$$ErrorRelativo = \frac{ErrorAbsoluto}{ValorEsperado} \tag{55}$$

Tabla 18. Error en el eje X

CALCULO DE ERROR EN EL CUBO EJE X			
VALOR MEDIDO (cm)	VALOR ESPERADO (cm)	ERROR ABSOLUTO (cm)	ERROR RELATIVO (%)
5,10	5,00	0,10	2,00
5,12	5,00	0,12	2,40
5,08	5,00	0,08	1,60
5,10	5,00	0,10	2,00
5,11	5,00	0,11	2,20

Como es posible observar, el error más grande que se obtiene es de 2,4% que indica que no se presentan diferencias mayores a 0,12 cm entre las medidas del diseño y las obtenidas en el objeto fabricado sobre el eje X.

A continuación se muestra las medidas obtenidas para el eje Y, con sus respectivos errores.

Tabla 19. Error en el eje Y

CALCULO DE ERROR EN EL CUBO EJE Y			
VALOR MEDIDO (cm)	VALOR ESPERADO (cm)	ERROR ABSOLUTO (cm)	ERROR RELATIVO (%)
5,10	5,00	0,10	2,00
5,11	5,00	0,11	2,20
5,10	5,00	0,10	2,00
5,11	5,00	0,11	2,20
5,09	5,00	0,09	1,80

En este caso también es posible observar que el error más grande es de 2,2% que indica que no se presentan diferencias mayores a 0,11 cm entre las medidas del diseño y las obtenidas en el objeto fabricado sobre el eje Y.

Las medidas obtenidas para el eje Z, con sus respectivos errores se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Error en el eje Z

CALCULO DE ERROR EN EL CUBO EJE Z			
VALOR MEDIDO (cm)	VALOR ESPERADO (cm)	ERROR ABSOLUTO (cm)	ERROR RELATIVO (%)
4,88	5,00	-0,12	-2,40
4,90	5,00	-0,10	-2,00
4,91	5,00	-0,09	-1,80
4,88	5,00	-0,12	-2,40
4,90	5,00	-0,10	-2,00

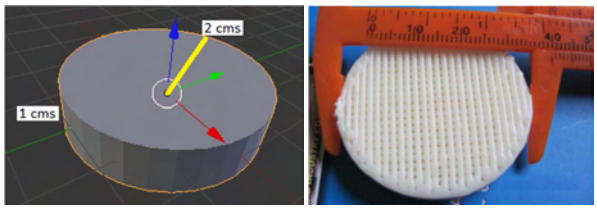
El mayor error que se obtiene sobre el eje Z es de 2,4% que indica que no se presentan diferencias superiores a 0,12 cm entre las medidas del diseño y las obtenidas en el objeto fabricado. El signo menos indica que las medidas del objeto son menores que las deseadas. Únicamente en este caso las medidas están por debajo, en los ejes X y Y las medidas obtenidas en el objeto son superiores a las deseadas.

9.2 CILINDRO.

9.2.1 Forma y medidas. Se selecciono esta forma geométrica ya que permite realizar un análisis cuando se presentan curvas en los objetos.

El cilindro diseñado tiene de radio 2.0 cm, altura de 1cm. Es una pieza rellena en su totalidad, así que no se debe presentar espacios vacios, excepto los dejados por la malla propia del relleno.

Figura 68. Diseño de cilindro vs Objeto fabricado. a) Diseño de cilindro en BLENDER b) Objeto Obtenido en la Máquina



a) b)

Las medidas del objeto obtenido en la máquina son:

- Radio: 2.01Cms
- Alto (eje Z): 0.9 cm

Como se puede ver en la figura obtenida en la máquina el relleno esta hecho en forma de rejilla, eso se debe a que el relleno se hace capa a capa y es paralelo a los ejes X y Y intercaladamente a medida que se avanza en el eje Z.

9.2.2 Cálculo de error. En este caso se enfatiza sobre las medidas del radio, ya que las de altura ya fueron tratadas en el cubo. Se toma 5 medidas en lugares diferentes de la pieza, se realiza haciendo una medición directa sobre la pieza obtenida en la máquina. Con estas consideraciones se calcula el error absoluto y relativo haciendo uso de las ecuaciones 54 y 55.

Tabla 21. Error en el radio del cilindro

CALCULO DE ERROR EN CILINDRO - RADIO			
VALOR MEDIDO (cm)	VALOR ESPERADO (cm)	ERROR ABSOLUTO (cm)	ERROR RELATIVO (%)
2,03	2,00	0,03	1,50
2,04	2,00	0,04	2,00
2,03	2,00	0,03	1,50
2,03	2,00	0,03	1,50
2,04	2,00	0,04	2,00

Como es posible observar el error más grande que se obtiene en la medición del radio es de 2,0% que indica que no se presentan diferencias mayores a 0,04 cm entre las medidas del diseño y las obtenidas en el objeto fabricado.

Las diferencias en medidas que presentan las piezas fabricadas por la máquina respecto a los diseños realizados en el programa CAD son relativamente bajos del orden de las decimas de milímetro. Esto es un buen resultado, ya que en un principio se había planteado diferencias de 4% para objetos de 5cms de lado en sus diferentes ejes. La forma del objeto obtenido físicamente coincide con el diseñado.

9.3 TIEMPO DE FABRICACIÓN.

Con las pruebas realizadas hasta el momento se puede calcular el tiempo en que tarda un objeto en fabricarse, una vez se haya calibrado y puesto en marcha el sistema.

A continuación se presenta una tabla donde se detalla el tiempo que tarda la máquina en hacer una capa de 1 mm de espesor de un objeto tanto en sus rutas externas, internas y de relleno.

Tabla 22. Tiempo de fabricación

AREA DEL OBJETO cm^2	**TIEMPO EN CAPA (sg)**	**TIEMPO $1cm^2$ (sg)**
12,5	100	8
12,5	104	8,32
12,5	103	8,24
12,5	102	8,16
12,5	104	8,32
4	34	8,5
4	33	8,25
4	33	8,25
4	34	8,5
4	35	8,75
	PROMEDIO $1cm^2$	8,329

Como se puede observar el sistema tarda en fabricar un área de $1cm^2$ alrededor de 8.32 segundos. Con este dato es posible realizar una aproximación del tiempo en que se tardará la máquina en fabricar cualquier pieza.

10. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado puede obtener físicamente modelos diseñados en un programa computacional 3D. El sistema consta de una parte física que permite obtener movimientos en los tres ejes cardinales de la punta de un extrusor respecto a la base donde se conforma el objeto, dicho sistema físico ofrece libertad de desplazamiento y permite seguir cualquier coordenada dentro de un área de trabajo.

El archivo stl de un programa CAD en este caso BLENDER, entrega coordenadas de vértices de triángulos los cuales conforman un objeto diseñado. Esta información junto con el valor de la normal de los triángulos es suficiente para hacer un análisis y obtener las diferentes rutas en las distintas capas que componen el objeto.

Dentro del prototipado Rápido, hacer un diseño en un programa 3D no siempre garantiza que este se pueda modelar, ya que se pueden presentar problemas en cuanto a la distancia entre coordenadas en los diferentes puntos los cuales componen el objeto. También puede haber problemas en el diseño tales como huecos, dobles caras, líneas inadecuadas que no son perceptibles en el diseño (visualmente), pero en el análisis son detectados y pueden causar errores relevantes dentro de la conformación, ya que si existe un error en una capa la falla puede amplificarse en la siguiente capa, puesto que la conformación se realiza por estratificación.

El archivo generado por el programa de diseño entrega la información en forma de vértices de triángulos que componen el objeto, el número de dichos triángulos depende del tamaño del objeto y de la forma. Por ejemplo un cubo consta de 12 triángulos, pero si a éste se le realiza un hueco cuadrado, la información se puede incrementar a 32 triángulos; si a este cubo se le realiza un hueco cilíndrico y no cuadrado el número de triángulos se va a incrementar aún más. El tiempo que tarda el software en analizar la información depende del tamaño de esta por consiguiente el tiempo de análisis es relativo y depende de cada objeto diseñado.

Al momento de realizar el diseño del objeto es necesario que éste no vaya a tener espacios vacios (diferentes a errores) sobre los cuales se tenga que hacer deposición de plástico en alguna capa superior, ya que ésta no tendría donde soportarse.

El sistema permite obtener objetos de formas básicas con medidas máximas de 5cm por lado, la restricción está dada fundamentalmente por la parte física de la máquina, ya que dicha estructura permite solamente estos desplazamientos máximos en los ejes. Así como se establece un rango máximo también es

recomendable que las medidas sean superiores a 0.5 cm ya que de ser menores no será posible la buena identificación del objeto, esto se debe prácticamente a la resolución del extrusor y al comportamiento del plástico el cual es inherente a este proyecto.

Controlar la temperatura a la cual se deposita el plástico resulta ser un proceso primordial dentro de la conformación, ya que debe estar dentro de un rango para que el plástico se comporte de manera adecuada; si la temperatura es baja el plástico no se adhiere a la capa inferior y por tanto el objeto no tendrá las características deseadas de forma y adherencia entre capas, si la temperatura es superior las propiedades del plástico se pierden e igualmente la pieza resulta con deficiencias. Además, este control resulta complejo dado que interfieren varios factores que varían constantemente como, la operación del extrusor en un momento determinado (extruir- no extruir). Si se extruye, entra plástico frio al extrusor y la temperatura baja y por el contrario si hay instrucciones donde no se requiere extruir la temperatura aumenta; otro factor es la temperatura del ambiente, y la capacidad de la fuente de alimentación para mantener un voltaje estable.

La resolución de movimiento obtenida en la parte física de la máquina de (0.1014mm en los ejes x y Y) resulta suficiente para obtener objetos de forma similar a la deseada, así como también se logra errores en las medidas inferiores a 2.5%.

La impresión tridimensional puede ser de gran utilidad en actividades en las que se requiera la construcción de objetos los cuales no tengan un modelo preestablecido. Ya que ofrece ventajas en cuanto a la calidad del producto referente a la exactitud de las medidas, forma del objeto, tiempo en la fabricación, mano de obra requerida, repetibilidad de los productos, material y herramientas utilizadas; también es posible conocer de una manera gráfica la forma y medidas del objeto antes de que éste se materialice siendo susceptible de cambios. En la región es una tecnología nueva que puede ser de gran utilidad para empresas dedicadas al diseño en general, y puede ofrecer una ventaja competitiva para quien use este tipo de herramienta.

El costo de la impresora fabricada es inferior al que presentan otro tipo de máquinas, dicha comparación se hace de acuerdo a la información suministrada por la Tabla 1 del presente informe “Características de las técnicas de prototipado” y los costos en los que se incurrió en el desarrollo de éste proyecto. El costo del prototipo desarrollado es de $ 1.439.500 y el costo de otras maquinas según la tabla oscilan entre los € 400.000 y € 75.000.

11. RECOMENDACIONES

La impresión tridimensional por ser una tecnología relativamente nueva tiene muchos campos en los que se puede mejorar a medida que se avanza en los sistemas de control, materiales utilizados y sistemas de análisis. Sin embargo, este trabajo de aplicación sirve como base para posteriores investigaciones referentes al tema. Por lo tanto se presenta a continuación algunas recomendaciones que pueden ser tenidas en cuenta en próximos desarrollos:

Construcción de un sistema físico con más resolución el cual permita dar un mejor acabado a las piezas obtenidas, así como también disminuir el porcentaje de error presente en las piezas.

Utilización de driver especializados para el control de los motores PAP, ya que de esta manera se puede disminuir los tiempos empleados en la fabricación del elemento, así como también se puede aplicar corrientes precisas a dichos motores ampliando de esta manera su vida útil.

Con el fin de mejorar la resolución del objeto se puede mejorar el software específicamente en generación de pasos sobre los ejes, para obtener líneas rectas más cercanas a las ideales.

Como se detalla en el presente informe, tanto las líneas externas, internas y de relleno, se organizan con el fin de que sigan un orden y no exista pérdidas de tiempo, sin embargo cuando se termina una ruta y el sistema ha detectado otra, existen desplazamientos los cuales en ocasiones son muy extensos, por tal motivo se puede analizar qué ruta es la más próxima para escogerla como la siguiente.

El sistema utiliza sensores de fin de carrera para dirigirse a un punto inicial dentro del área de trabajo, este punto está referido a los ejes X y Y, sin embargo este tipo de sensores no son adecuados en el caso del eje Z, ya que no es posible calibrar el sistema porque depende de la base sobre la cual se materialice el objeto, por lo que esta calibración se realiza de forma manual. Se puede utilizar un tipo de sensor diferente el cual no dependa del tipo de base que se usa sino que mida la distancia de separación entre ésta y la punta del extrusor para que así este eje se pueda calibrar de forma automática.

BIBLIOGRAFÍA

ALONSO RODRÍGUEZ, JOSÉ ANTONIO. Sistemas de prototipado rápido. [En línea]. http://webs.uvigo.es/disenoindustrial/docs/protorapid.pdf. [Citado el 11 de Agosto de 2011]. 31. p.

ANGULO, José y ANGULO, Ignacio.Microcontroladores-Pic Diseño Practico de aplicaciones. Chile: 2005. 300 p.

BOYLESTAD, Robert L. y NASHELSKY, Louis. Teoría de Circuitos Y Dispositivos Electrónicos. 2003. 450. p.

CADDY NEWS. El formato del fichero stl. [En línea]. http://www.caddyspain.com/noticias/stl.htm [citado el 21 de julio]

CEBALLOS, Fco Javier. Curso de programación Java 2, 2 ed. México: Alfaomega, 2003. 778. p.

COSMOCAX. Que es el cnc. [en línea]. http://cadcamcae.wordpress.com /2007/06/14/el-control-numerico-por-computadora-el-cnc/. [Citado el 15 de Octubre de 2011]

DIGITA2 TECNOLOGÍA & COMUNICACIONES. Prototipado rápido Modelos físicos y tridimensionales. [en línea]. http://www.protorapido.es/que.pdf [Citado el 11 de Agosto de 2011].

DONALD HKARN; M. PAULINE BAKF.R. Gráficos por computadora con opengl, Madrid: Pearson Educación S.A. 2006. 895. p.

ENRÍQUEZ, Harper. Fundamentos de control de motores eléctricos en la industria. México 2005. 250. p.

FOLEY, J.D;DAM, A; Van;FEINER S;HUGHES, J.F. Computer Graphics Principles and Practice.2ed.Addison-Welsey. 1997.

HKARN, Donald; BAKF.R, M. Pauline.Gráficos por computadora con opengl.Madrid: Pearson Educación S.A. 2006. 916. p.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. Taller de soluciones. [En línea] http://tallerdesoluciones.blogs.inti.gob.ar/2009/10/22/%C2%BFque-es-un-archivo-stl/ [Citado el 23 de Octubre de 2011]

JPICUSB. http://divideandconquer.com.ar/dyq/2009/01/jpicusb-comunicacion-pic-usb-usando-java/

LAMONT Wood, Rapid Automated Prototyping: An Introduction, Industrial Press, 1993. 141. p.
MARSHALL Burns, Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing, Prentice Hall, 1993. 369. p.

ORACLE AMERICA. License. [En línea]. http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/terms/license/index.html. [Citado el 22 de diciembre de 2011]

PÉREZ, Gustavo Guillermo, Aprendiendo Java y Programación Orientada a Objetos. http://www.compunauta.com/forums/linux/programacion/java/ebook.html

PLAN DE CONSOLIDACIÓN Y COMPETITIVIDAD DE LA PYME. Requisitos de uso de tecnologías de fabricación rápida en el sector de plástico. [en línea]. http://www.aserm.net/files/2009/11/Requisitos-de-uso-de-tecnolog%C3%ADas-de-fabricaci%C3%B3n-r%C3%A1pi.pdf. [Citado el 14 de septiembre de 201].

REXON. Manual técnico, correas industriales. [En línea] http://www.rexon.com.co/indexmarcasregistradas.html. [Citado el 17 de Julio de 2011]. 54.p.

ROJAS, María Cristina. Piñones. Diente por diente y vuelta por vuelta. [En línea]. http://www.metalactual.com/revista/9/pinones.pdf. [4 de Septiembre de 2011]. 50.p.

SAAVEDRA, JORGE. Lenguajes de programación. [En línea]. http://jorgesaavedra.wordpress.com/2007/05/05/lenguajes-de-programacion/. [Citado el 16 de julio de 2011]

SÁNCHEZ JIMÉNEZ, Javier; FERNÁNDEZ DE LA PUENTE, Arturo; LLORENTE GENIZ, Julián. Técnicas de prototipado Rápido En: XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA GRÁFICA. Universidad de Sevilla España, 8.p.

SCHILDT, Herbert. Manual de referencia java 2, 4 ed, McGraw-hill, 2001.

TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS. ABS. [En línea]. http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html. [Citado el 10 de octubre de 2011]

TORRES TORRITI, Miguel. Tutorial Microcontroladores pic inicialización rápida. [En línea] http://web.ing.puc.cl/~mtorrest/downloads/pic/tutorial_pic.pdf. [Citado el 2 de Octubre de 2011]. 29. p.

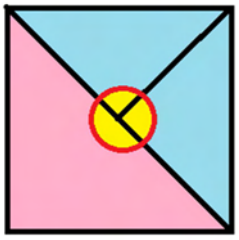
VIDAL VALENZUELA, Javier. Algoritmos gráficos en 2 dimensiones [En línea] http://asignaturas.inf.udec.cl/cgraf/public_html/algoritmos2d.pdf, taller de computación gráfica.[Citado el 29 de noviembre de 2011]. 25. p.

WIKIPEDIA. Blender. [En línea]. http://es.wikipedia.org/wiki/Blender. [Citado el 21 de octubre de 2011]

ANEXOS

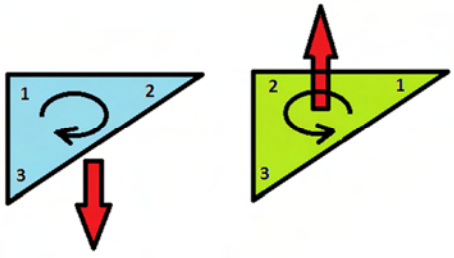
ANEXO A. PROBLEMAS EN DISEÑO PARA PROTOTIPADO

1. Regla vértice-a-vértice. “El error más común en un archivo .stl es que no respete la regla Vértice-a-Vértice. Las especificaciones .stl requieren que todos los triángulos adyacentes compartan dos vértices en común. Para que esto sea válido bajo la regla Vértice-a-Vértice, el triángulo inferior debe ser subdividido. Ésta es la causa típica de que queden agujeros.



Problema de Vértices en archivo STL

2. Normales invertidas. Otro error común de los archivos .stl es que las normales de superficie (polígonos) estén incorrectamente orientadas. El signo visible de una normal invertida se confunde fácilmente con un hueco o agujero en el objeto. Este error es causado por una construcción manual incorrecta de cara, o la aplicación inadecuada de la reparación automática (unificar o recalcular normales). La operaciones booleanas también pueden causar errores bajo algunas circunstancias; muy habitualmente a causa de malos operandos.



Normales invertidas

3. Dobles caras y bordes múltiples. Las dobles caras y bordes múltiples son lo que su nombre sugiere. Estos errores .stl ocurren donde, por diversos motivos, las caras y los bordes duplicados pertenecen a un objeto. Si hay

duplicados de objetos completos, el arreglo es simple: encuentra los duplicados y bórralos para dejar una copia intacta .stl del objeto que se está manipulando. La otra posible causa de este error es que los fragmentos de objetos cercanos fueran agrupados de manera inadvertida en la misma malla y el programa los reconozca como duplicados.

4. Huecos, agujeros, puntas y aristas abiertas. Agrupamos estos errores porque tienen una misma razón de ser. Los huecos son errores comunes debidos a una triangulación inapropiada de las superficies de B-spline (NURBS, parches Bezier, etc.). Cualquier proceso (construcción automática de facetas o parametrización automática) que no asegure un objeto sólido hermético tiende a producir huecos.

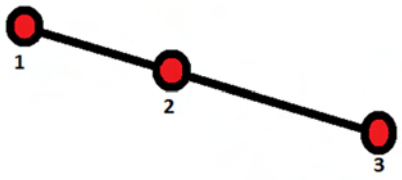
Los agujeros son similares a los huecos, excepto que son normalmente más visibles y habitualmente consecuencia de booleanos inapropiados y soldado inapropiado de una capa superficial (o perdiendo capas accidentalmente). Los agujeros son también comunes en el escaneado 3D y en los sistemas de proceso de nube de puntos, como los que se utilizan en aplicaciones de ingeniería inversa. Los agujeros son exactamente lo que su nombre sugiere: son caras perdidas en superficies que de otra manera serían contiguas.

Las puntas son rasgos del estilo de una península que tienen aristas abiertas a lo largo de sus costas (extremos).

Las aristas abiertas son normalmente los bordes de un hueco o un agujero, o los límites de una punta. En los casos, en los que no hay ni un hueco ni un agujero ni una punta presentes, las aristas abiertas son el resultado de un soldado inapropiado o incompleto.

5. Caras degeneradas. Aunque el problema de las facetas degeneradas no es crítico, eso no significa que puedan ser ignoradas. Primero, los datos de facetas incrementan el tamaño del archivo. En segundo lugar, y más importante aún, esas facetas pueden confundir a los algoritmos de análisis de la aplicación de pre-procesado y hacer la actividad de edición de soporte mucho más tediosa. Estos errores son usualmente un síntoma de una configuración errónea de importación/exportación, de las limitaciones de la exportación .stl de tu paquete 3D, o el resultado de una variedad de booleanos inapropiados, optimización y otras operaciones de malla.

Los tipos de caras degeneradas incluyen: los tres vértices de la faceta son co-lineales o se transforman en co-lineales cuando el algoritmo de la aplicación importadora trunca las coordenadas previamente no co-lineales.



Caras no Degeneradas

Los tres vértices de la faceta son coincidentes o se transforman en coincidentes cuando el algoritmo de de la aplicación importadora trunca las coordenadas no coincidentes previamente

Esta información esta citada en la página, http://www.caddyspain.com/noticias/stl.htm

ANEXO B. PASOS BÁSICOS PARA LA REALIZACIÓN DE UN OBJETO

A continuación se describe los pasos para obtener un objeto, iniciando con el diseño en un programa CAD, hasta la fabricación del prototipo físico.

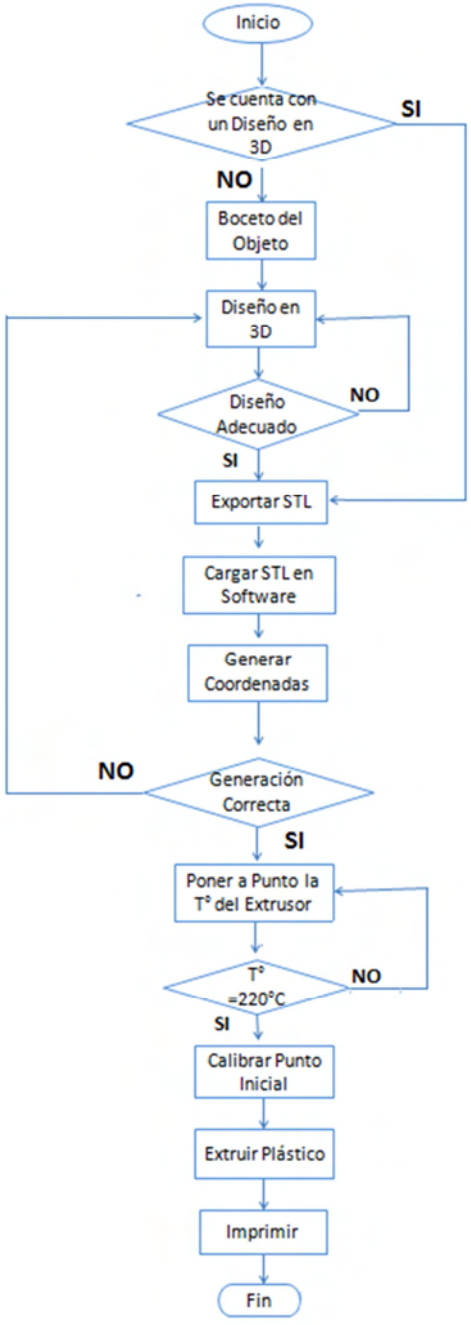


Diagrama de flujo de pasos para imprimir

1. VERIFICACIÓN DE EXISTENCIA DE DISEÑO

Si ya se cuenta con un objeto diseñado y se ha verificado que éste no presenta inconsistencias, y también ya se tiene el archivo STL guardado, se puede seguir con el proceso de cargar el archivo STL en el Software, de lo contrario se debe realizar un boceto del objeto que se desea.

2. BOCETO DEL OBJETO

En primer lugar se define una idea del objeto que se desee obtener, puede ser mediante un boceto realizado en papel, por tanto este diseño será en dos dimensiones, se puede definir la forma y las medidas exactas del objeto deseado, así como también la forma y número de huecos que va a tener.

3. DISEÑO EN 3D

Con el boceto antes definido, se procede a realizar el objeto en el programa CAD 3D, en este caso como ya se mencionó se utiliza Blender para la realización de este proceso. Las funciones más utilizadas para el diseño son Extrude, Bevel, Boolean, Mirror, subdivide, Duplicate.

4. VERIFICACIÓN DEL DISEÑO

Una vez terminado el diseño en el programa CAD, se procede a verificar que este no presente inconsistencias tales como Huecos inadecuados, dobles caras, líneas en el interior del objeto que no forman una superficie. Por lo general los huecos se presentan por aplicación de Booleanos, las dobles caras y líneas pueden ser causadas por unión de superficies. Como se preciso anteriormente, hacer el diseño de un objeto en 3D no garantiza que se pueda prototipar o “imprimir”, porque se necesita especificaciones precisas para que el Software de análisis de información pueda interpretarlo y generar órdenes correctas.

5. EXPORTAR STL

Cuando ya se tenga el diseño en 3D y éste no presente inconsistencias, se procede a exportar el archivo STL correspondiente al diseño, este archivo debe estar en formato ASCII. Para garantizar que el archivo se exporte correctamente primero se puede guardar el diseño con extensión (.blender), luego se sigue la dirección (file – export - stl), y se selecciona una ubicación deseada donde se guarda el archivo.

6. CARGAR STL EN SOFTWARE

El software creado para analizar la información del archivo STL, y enviar información para seguir unas coordenadas determinadas se maneja a través de una interface de usuario. Aquí existe la opción “cargar archivo STL”, a través de la cual se sigue la ruta donde antes se había guardado el archivo perteneciente al diseño que se quiere fabricar.

7. GENERAR COORDENADAS

La interface de usuario también ofrece la opción “generar coordenadas”, en este caso el software hace el procesamiento más importante, que consiste en tomar la información del archivo STL, y generar señales de control para generar movimiento en los ejes X, Y, y Z. este proceso toma un tiempo relativo el cual depende de la complejidad del diseño. Si hay un error en la generación de coordenadas se debe revisar nuevamente el diseño del objeto realizado en 3D y seguir con el proceso desde este punto (4).

8. PONER A PUNTO LA TEMPERATURA DE EXTRUSOR

Es necesario que el plástico alcance una temperatura adecuada para que este se pueda extruir, por tal motivo es necesario encender el calefactor antes de empezar a fabricar las piezas. El tiempo que toma el calefactor en alcanzar la temperatura adecuada depende de la potencia que tenga la red eléctrica en ese momento, (alrededor de 2 minutos).

9. CALIBRAR PUNTO INICIAL

Para llegar al punto inicial se hace uso de los sensores que tiene la maquina en los ejes X y Y, por tanto estos ejes son calibrados por software, sin embargo el eje Z se lo calibra manualmente ya que la posición fluctúa de acuerdo al espesor de la base sobre la cual se deposita el plástico fundido. En consecuencia lo que se realiza en este paso es calibrar el eje Z. La distancia entre la base y la punta del extrusor debe ser de (1mm – factor corrección). El factor de corrección está referido solamente a la primera capa, ya que es necesario que el hilo sea prensado para que se adhiera sobre la superficie de la base, con las pruebas realizadas se determino que este factor de corrección debe ser igual a 0.4mm, para que la primera capa se conforme adecuadamente.

10. EXTRUIR PLÁSTICO

Una vez se ha calibrado el punto inicial sobre el eje Z, es necesario que se extruya una cierta cantidad de plástico hasta que el hilo salga de una forma uniforme, ya que al inicio de la extrusión se pueden presentar vacios que causan que por momentos no haya hilo plástico para extruir.

11. IMPRIMIR

Aquí ya está puesta a punto la máquina para que empiece el proceso de conformación capa por capa de un objeto diseñado en 3D. La interface de usuario ofrece la opción “imprimir” y con esto el proceso comienza. El tiempo de impresión depende del tamaño del objeto.